

T

ISSN 1992-3252

ТРАНСПОРТА

WORLD OF TRANSPORT
AND TRANSPORTATION

6²⁰²³
Том / Vol. 21



Вклейка
Insert

На ВДНХ открылась выставка «Россия в движении»

25 ноября 2023 года в рамках международной выставки-форума «Россия» открылась экспозиция Министерства транспорта Российской Федерации «Россия в движении».

Впервые в новейшей истории в легендарном павильоне № 15 на ВДНХ представлены достижения всей транспортной индустрии, перспективы транспортных, инфраструктурных и логистических проектов страны от Камчатки до Калининграда. Открыли экспозицию первый заместитель Председателя Правительства Андрей Белоусов и Министр транспорта Виталий Савельев.

Андрей Белоусов высоко оценил экспозицию Минтранса России. «В этом павильоне на довольно небольшой площади удалось собрать полноценное представление о работе транспортной отрасли за последние 6–10 лет. Что очень важно – многое сделано в интерактивной форме», – отметил первый вице-премьер. Также он отметил, что скоро транспорт России отметит свое 215-летие. «При этом судя по артефактам, представленным на экспозиции, посвященной строительству М-11, транспортной отрасли в России не менее тысячи лет», – рассказал Андрей Белоусов.



«Сегодня мы открываем павильон, посвященный транспортному комплексу России. В следующем году транспортному комплексу исполнится 215 лет. Мы как продолжатели этой истории сделаем все возможное, чтобы жители нашей страны получали возможность хорошего передвижения. Передвижение – это один из главных факторов качества жизни», – сказал Министр транспорта Виталий Савельев.

Руководители предприятий транспортного комплекса рассказали собравшимся на открытии выставки о представленных компаниями проектах, а также главных достижениях отрасли.

На выставке отражены все сферы деятельности Минтранса: воздушный, железнодорожный, морской и внутренний водный транспорт, строительство дорог и инфраструктурных объектов, дорожное хозяйство, цифровизация, лизинг, безопасность и пункты пропуска.

В России учреждена премия в области транспортной науки и техники им. В. Н. Образцова

Начиная с 2024 года в России будут присуждаться премии в области транспортной науки и техники имени Владимира Николаевича Образцова – российского и советского ученого, родоначальника отечественной школы проектирования железнодорожных станций и транспортных узлов, комплексного изучения и развития всех видов транспорта. Соответствующее постановление подписал Председатель Правительства Российской Федерации Михаил Мишустин.

Премии в размере по 1 млн рублей каждая будут вручаться в трех номинациях – за заслуги в области транспортной науки и транспортного образования, за вклад в развитие транспорта и транспортного строительства, за внедрение инновационных технологических решений на

транспорте и в сфере транспортного строительства.

Учрежденная награда даст возможность поддерживать отраслевые научные школы, выявлять интересные решения и открытия, способствующие повышению скорости и безопасности движения, а также отметить лучшие примеры строительства транспортной инфраструктуры.

Вручение премии будет приурочено ко Дню работника транспорта, который отмечается 20 ноября.

По материалам пресс-центра
Министерства транспорта Российской
Федерации: <https://mintrans.gov.ru/press-center/news/11008>, <https://mintrans.gov.ru/press-center/news/11001> ●

ТРАНСПОРТ МИР

• ТЕОРИЯ • ИСТОРИЯ
• КОНСТРУИРОВАНИЕ БУДУЩЕГО

6²⁰²³
(109)

Издаётся
Российским университетом
транспорта.

Учреждён МИИТ в 2003 году
Редакционный совет:

И. Н. Розенберг – доктор технических наук, профессор, член-корреспондент Российской академии наук, научный руководитель РУТ (МИИТ), председатель совета

А. К. Головнич – доктор технических наук, доцент Белорусского государственного университета транспорта

А. Д. Гвишиани – доктор физико-математических наук, профессор, академик РАН

А. А. Горбунов – доктор политических наук, профессор РУТ

Б. В. Гусев – доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РАН

Н. А. Духно – доктор юридических наук, профессор РУТ

Д. Г. Евсеев – доктор технических наук, профессор РУТ

Н. С. Касимов – доктор географических наук, профессор, академик РАН

В. И. Колесников – академик РАН, профессор Ростовского государственного университета путей сообщения

К. Л. Комаров – доктор технических наук, профессор Сибирского государственного университета путей сообщения

Б. М. Куанышев – доктор технических наук, профессор, заместитель председателя КАЗПРОФТРАНС (Республика Казахстан)

Б. М. Лапидус – доктор экономических наук, профессор

Г. Г. Матишов – доктор географических наук, профессор, академик РАН

Д. А. Мачерет – доктор экономических наук, профессор РУТ, первый заместитель председателя Объединённого учёного совета ОАО «РЖД»

Л. Б. Миротин – доктор технических наук, профессор Московского автомобильного государственного технического университета (МАДИ)

К. А. Пашков – доктор медицинских наук, профессор РАН, профессор Московского государственного медико-стоматологического университета им. А. И. Евдокимова

А. В. Сладковски – доктор технических наук, профессор Силезского технологического университета (Республика Польша)

Ю. И. Соколов – доктор экономических наук, профессор РУТ

А. А. Соловьев – доктор физико-математических наук, профессор РАН, член-корреспондент РАН

Тран Дак Су – доктор технических наук, профессор Университета транспорта и коммуникаций (Ханой, Вьетнам)

В. Я. Цветков – доктор технических наук, доктор экономических наук

Т. В. Шепитько – доктор технических наук, профессор РУТ

СОДЕРЖАНИЕ

ВОПРОСЫ ТЕОРИИ

Игорь РОЗЕНБЕРГ, Сергей СОКОЛОВ, Ирина ДУБЧАК

Методы формирования цифрового двойника акватории для навигации беспилотных судов 6

Артур КАРЛОВ, Олег ЕВСЕЕВ

О подходах к методологическому обоснованию формирования Единой опорной транспортной сети и приоритизации проектов развития транспортной инфраструктуры 14

Галина БУБНОВА, Олег ПОКУСАЕВ, Андрей АКИМОВ

Качество общественного транспорта мегаполиса в мультимодальных перевозках маятниковой миграции населения 22

НАУКА И ТЕХНИКА

Кирилл ДОРОШЕНКО, Евгений АШПИЗ, Вячеслав КОРОСТЕЛЕВ

Лабораторные исследования материала подбалластного защитного слоя с применением вяжущих материалов 34

Сергей ШАНТАРЕНКО, Сергей САВИНКИН

Повышение динамических качеств локомотива за счет изменения положения концевых витков пружин кузовного рессорного подвешивания 40

Михаил ЯРОСЛАВЦЕВ

Унификация бортовых тяговых накопителей энергии для подвижного состава железных дорог 48

Александр ЗУЕВ, Михаил ГЛУЩЕНКО

Исследование асинхронного тягового электродвигателя с наклонными пазами ротора 60

Дмитрий ЕВСЕЕВ, Андрей ШИНКАРУК, Юрий КУЛИКОВ

Цифровизация элементной базы пассажирского вагона на примере ремонта колесной пары 65

Андрей БАТАЕВ, Ян ВАТУЛИН, Владимир КАВКАЗСКИЙ

Моделирование динамического воздействия высокоскоростного подвижного состава на заглубленные сооружения тоннельного типа 72

УПРАВЛЕНИЕ И ЭКОНОМИКА

Александр БАНДУРИН, Сергей МАТЮХА

Модель взаимодействия участников рынка региональных авиаперевозок в условиях ограниченной конкуренции 86

**РЕДАКЦИОННАЯ
КОЛЛЕГИЯ**

И. Н. РОЗЕНБЕРГ –
главный редактор
Е. Ю. ЗАРЕЧКИН –
заместитель главного редактора

**ЧЛЕНЫ
РЕДКОЛЛЕГИИ**

Е. С. АШПИЗ –
д.т.н., доцент РУТ
Л. А. БАРАНОВ –
д.т.н., профессор РУТ
А. М. БЕЛОСТОЦКИЙ –
д.т.н., профессор РУТ
Г. В. БУБНОВА –
д.э.н., профессор РУТ
Ю. А. БЫКОВ –
д.т.н., профессор РУТ
В. А. ГРЕЧИШНИКОВ –
д.т.н., доцент РУТ
М. М. ЖЕЛЕЗНОВ –
д.т.н., профессор, доцент МГСУ
В. Б. ЗЫЛЁВ –
д.т.н., профессор РУТ
В. И. КОНДРАЩЕНКО –
д.т.н., старший научный
сотрудник РУТ
А. А. ЛОКТЕВ –
д.ф.-м.н., профессор РУТ
С. Я. ЛУЦКИЙ –
д.т.н., профессор РУТ
О. Е. ПУДОВИКОВ –
д.т.н., доцент РУТ
В. Н. СИДОРОВ –
д.т.н., профессор РУТ
Н. П. ТЕРЁШИНА –
д.э.н., профессор РУТ
В. С. ФЁДОРОВ –
д.т.н., профессор РУТ
Н. А. ФИЛИПОВА –
д. т. н., профессор, доцент МАДИ
В. М. ФРИДКИН –
д.т.н., старший научный
сотрудник РУТ
С. С. ЧИБУХЧЯН –
к.т.н., доцент Национального
политехнического университета
Армении, заместитель
Председателя республиканского
союза работодателей Армении
В. А. ШАРОВ –
д.т.н., профессор РУТ
А. К. ШЕЛИХОВА –
руководитель редакции

РЕДАКЦИЯ

Н. К. ОЛЕЙНИК –
технический редактор
М. В. МАСЛОВА –
английский перевод

При перепечатке ссылка
на журнал «Мир транспорта»
обязательна.
© «Мир транспорта», 2023

Георгий ГОГРИЧИАНИ, Наталья КОРНИЕНКО

Повышение пропускной способности
локомотивного депо путем определения приоритета
организационно-технических мероприятий 96

Евгений НЕСТЕРОВ, Виктор ЦВЕТКОВ

Транспортная кибербезопасность 103

Алексей ЕПИХИН, Сергей КОНДРАТЬЕВ, Евгений ХЕКЕРТ

Диагностика судовых двигателей на основе
вейвлет-нейронной сети и сканирования изображений с помощью
программируемой логической логической схемы 110

Никита ОСИНЦЕВ, Александр ЦЫГАНОВ,

Александр РАХМАНГУЛОВ, Вера БАГИНОВА

Мультикритериальное сравнение контейнерных систем 119

Елена КУРЗИНА, Нина КОРНИЕНКО, Ангелина КУРЗИНА

Обоснование транспортных издержек при перевозке
насыпных грузов в контейнерах интегральным методом 131

КОЛЕСО ИСТОРИИ

Бакытжан КУАНЫШЕВ

Вспоминая научную Alma mater 138

Дмитрий ЛЕВИН

С. Ю. Витте – создатель теории железнодорожных
тарифов. Часть 2. 146

КНИЖНАЯ ЛОЦИЯ

Дмитрий ЕФАНОВ

Безопасные железные дороги (рецензия
на монографию «Функциональная безопасность
систем управления на железнодорожном транспорте») 160

Авторефераты диссертаций 163

Новые книги о транспорте 168

Содержание номеров журнала «Мир транспорта»,
вышедших в 2023 году в томе 21 169

Журнал зарегистрирован в Министерстве Российской Федерации
по делам печати, телерадиовещания и средств массовых
коммуникаций 20 декабря 2002 г. Регистрационный номер
ПИ № 77-14165.

Журнал выходит 6 раз в год. Номер подписан в печать 29.12.2023.

Тираж 150 экз. Цена свободная.

Отпечатано с оригинал-макета ИП Копыльцов Павел Иванович,
г. Воронеж, ул. Маршала Неделина, д. 27, кв. 56.

Ознакомиться с содержанием вышедших номеров можно
на сайте научной электронной библиотеки elibrary.ru или
на сайте <https://mirtr.elpub.ru>, с условиями публикации –
на сайте <https://mirtr.elpub.ru>.

**Журнал включён в Российский индекс научного цитирования,
информация размещается в базах данных РГБ, Соционет,
Ulrich's Periodicals Directory, WorldCat.org.**

World of Transport and Transportation

•THEORY
•HISTORY
•ENGINEERING
OF THE FUTURE

Vol. 21 2023
Iss. 6

The journal is published
by Russian University
of Transport.

Founded in 2003 by MIIT.

EDITORIAL COUNCIL

Igor N. Rozenberg, D.Sc. (Engineering),
Professor, Corresponding Member of
the Russian Academy of Sciences, Chief
Scientific Officer of Russian University
of Transport, chairman of the Editorial
council

Alexander C. Golovnich, D.Sc.
(Engineering), Associate Professor of
Belarusian State Transport University

Alexander A. Gorbunov, D.Sc. (Political
Science), Professor of Russian University
of Transport

Boris V. Gusev, D.Sc. (Engineering),
Professor, Corresponding Member of the
Russian Academy of Sciences

Alexey D. Gvishiani, D.Sc. (Physics and
Mathematics), Professor, Member of the
Russian Academy of Sciences

Nickolay A. Duhno, D.Sc. (Law),
Professor of Russian University of
Transport

Dmitry G. Evseev, D.Sc. (Engineering),
Professor of Russian University of
Transport

Nikolai S. Kasimov, D.Sc. (Geography),
Professor, Member of the Russian
Academy of Sciences

Vladimir I. Kolesnikov, D.Sc.
(Engineering), Member of the Russian
Academy of Sciences, Professor of
Rostov State Transport University

Constantine L. Komarov, D.Sc.
(Engineering), Professor of Siberian
Transport University

Bakytzhan M. Kuanyshov, D.Sc.
(Engineering), Professor, Deputy
Chairman of KAZPROFTRANS (Republic
of Kazakhstan)

Boris M. Lapidus, D.Sc. (Economics),
Professor

Dmitry A. Macheret, D.Sc. (Economics),
Professor of Russian University of
Transport, First Deputy Chairman of
Joint Scientific Council of JSC Russian
Railways

Gennady G. Matishov, D.Sc.
(Geography), Professor, Member of the
Russian Academy of Sciences

Leonid B. Mirotn, D.Sc. (Engineering),
Professor of Moscow State Automobile
and Road Technical University

Konstantin A. Pashkov, D.Sc.
(Medicine), Professor of the Russian
Academy of Sciences, Professor of A.I.
Yevdokimov Moscow State University of
Medicine and Dentistry

Taisiya V. Shepitko, D.Sc. (Engineering),
Professor of Russian University of
Transport

Aleksander V. Sladkowski, D.Sc.
(Engineering), Professor of Silesian
University of Technology (Republic of
Poland)

Yury I. Sokolov, D.Sc. (Economics),
Professor of Russian University of
Transport

Anatoly A. Soloviev, D.Sc. (Physics and
Mathematics), Corresponding Member
of the Russian Academy of Sciences,
Professor of the Russian Academy of
Sciences

Tran Duc Su, D.Sc. (Engineering),
Professor of the University of Transport
and Communications (Hanoi, Vietnam)

Victor Ya. Tsvetkov, D.Sc. (Economics),
D.Sc. (Engineering)

CONTENTS

Page numbering below refers to the texts in English

THEORY

- Igor N. ROSENBERG, Sergey S. SOKOLOV, Irina A. DUBCHAK*
Methods for Development of a Digital Twin of the Water
Area for Navigation of Unmanned Vessels 176
- Arthur V. KARLOV, Oleg V. EVSEEV*
Approaches to Methodological Rationale of Development
of Single Backbone Transport Network and Prioritisation
of Transport Infrastructure Development Projects 183
- Galina V. BUBNOVA, Oleg N. POKUSAEV, Andrey V. AKIMOV*
The Quality of Public Transport Services in Multimodal
Commuting in a Megalopolis 191

SCIENCE AND ENGINEERING

- Kirill A. DOROSHENKO, Evgeny S. ASHPIZ, Vyacheslav A. KOROSTELEV*
Material Laboratory Testing of the Sub-Ballast Protective
Layer with Binding Agents 202
- Sergey G. SHANTARENKO, Sergey V. SAVINKIN*
Increasing the Dynamic Characteristics of the Locomotive
by Changing the Position of the End Coils of the Springs
of the Body Spring Suspension 208
- Mikhail V. YAROSLAVTSEV*
Unification of Onboard Traction Energy Storage Devices
for Railway Rolling Stock 216
- Alexander S. ZUEV, Mikhail D. GLUSHCHENKO*
Study of an Asynchronous Traction Motor with Inclined Slot Rotor 227
- Dmitry G. EVSEEV, Andrey S. SHINKARUK, Yury M. KULIKOV*
Digitalisation of the Database of Passenger Coach's Elements
Using the Example of Wheelset Repair 232
- Andrey S. VATAEV, Yan S. VATULIN, Vladimir N. KAVKAZSKY*
Simulation of the Dynamic Impact of High-Speed Rolling
Stock on Buried Structures of the Tunnel Type

EDITORIAL BOARD

Igor N. Rozenberg, Editor-in-Chief

Evgeny Yu. Zarechkin, Deputy Editor-in-Chief

BOARD MEMBERS

Evgeny S. Ashpiz, D.Sc. (Engineering), Associate Professor of Russian University of Transport

Leonid A. Baranov, D.Sc. (Engineering), Professor of Russian University of Transport

Alexander M. Belostotskiy, D.Sc. (Engineering), Professor of Russian University of Transport

Galina V. Bubnova, D.Sc. (Economics), Professor of Russian University of Transport

Yury A. Bykov, D.Sc. (Engineering), Professor of Russian University of Transport

Suren S. Chibukhchyan, Ph.D. (Engineering), Associate Professor of the National Polytechnic University of Armenia, Vice-Chairman of National Employer's Union

Victor S. Fedorov, D.Sc. (Engineering), Professor of Russian University of Transport

Vladimir M. Fridkin, D.Sc. (Engineering), senior researcher of Russian University of Transport

Victor A. Grechishnikov, D.Sc. (Engineering), Associate Professor of Russian University of Transport

Valeriy I. Kondraschenko, D.Sc. (Engineering), senior researcher of Russian University of Transport

Alexey A. Loktev, D.Sc. (Physics and Mathematics), Professor of Russian University of Transport

Svyatoslav Y. Lutskiy, D.Sc. (Engineering), Professor of Russian University of Transport

Nadezhda A. Filippova, D.Sc. (Engineering), Professor, Associate Professor of MADI university

Oleg E. Pudovikov, D.Sc. (Engineering), Associate Professor of Russian University of Transport

Victor A. Sharov, D.Sc. (Engineering), Professor of Russian University of Transport

Alla K. Shelikhova, head of Editorial office

Vladimir N. Sidorov, D.Sc. (Engineering), Professor of Russian University of Transport

Natalia P. Teryoshina, D.Sc. (Economics), Professor of Russian University of Transport

Maxim M. Zheleznov, D.Sc. (Engineering), Professor, Associate Professor of MGSU university

Vladimir B. Zyl'ov, D.Sc. (Engineering), Professor of Russian University of Transport

MANAGEMENT, CONTROL AND ECONOMICS

Alexander V. BANDURIN, Sergey V. MATYUKHA

Interaction Model of Regional Air Transportation Market Participants under the Conditions of Limited Competition 252

Georgy V. GOGRICHLANI, Natalia V. KORNIENKO

Increasing the Capacity of a Locomotive Depot by Prioritising Organisational and Technical Measures 261

Evgeny A. NESTEROV, Viktor Ya. TSVETKOV

Transport Cybersecurity 268

Alexey I. EPIKHIN, Sergey I. KONDRATIEV, Evgeny V. KHEKERT

Diagnostics of Ship Engines Based on Wavelet Neural Network and Image Scanning Using Programmable Logic Circuit 275

Nikita A. OSINTSEV, Alexander V. TSYGANOV,

Alexander N. RAKHMANGULOV, Vera V. BAGINOVA
Multicriteria Comparison of Piggyback Systems 283

Elena G. KURZINA, Nina A. KORNIENKO, Angelina M. KURZINA

Rationale for Transport Costs when Transporting Bulk Cargo in Containers with the Integral Method 295

HISTORY WHEEL

Bakytzhan M. KUANYSHYEV

Remembering the Scientific Alma Mater 302

Dmitry Yu. LEVIN

S. Yu. Witte – Originator of Railway Tariffs Theory. Part 2. 309

BIBLIO-DIRECTIONS

Dmitry V. EFANOV

Safe Railways

(Review of the monograph «Functional Safety of Railway Control Systems») 322

Selected Abstracts of D.Sc. and Ph. D. Theses Submitted at Russian Transport Universities 325

New Books on Transport and Transportation 328

Contents of the issues of World of Transport and Transportation Journal, published in Vol. 21 (2023) 329

Published quarterly since 2003. Bimonthly since 2013.

109 issues have been published since 2003.

Current issues are circulated in 150 hard copies available on subscription.

All articles in the journal are published in Russian and English, both versions being entirely identical. The emails of corresponding authors are marked with ✉.

The open accessed full texts of the articles, editorial politics and guidelines for the authors are available at the Website of the journal at <https://mirtr.elpub.ru/jour> (both in Russian and English). The authors can submit their articles either in Russian or in English. The journal uses double-blind peer reviewing.

The full texts in Russian and key information in English are also available at the Website of the Russian scientific electronic library at <https://www.elibrary.ru> (upon free registration).

The journal is indexed in Russian scientific citation index system, Russian state library, Socionet, Ulrichsweb, WorldCat.org, etc.

Any reproduction in whole or in part on any medium or use of English translation of the articles contained herein is prohibited for commercial use without the prior written consent of World of Transport and Transportation.



ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ

6

Анализ методов создания цифровых двойников акватории и поиск оптимальных инструментов как условие для развития речного автономного судоходства.

ЕДИНАЯ ОПОРНАЯ ТРАНСПОРТНАЯ СЕТЬ

14

Методологическое обоснование формирования ЕОТС и приоритизации инфраструктурных проектов: теория, методы, расчёты.

ВОПРОСЫ ТЕОРИИ



ОБЩЕСТВЕННЫЙ ТРАНСПОРТ

22

Методология комплексной оценки качества со стороны пользователя, критерии, приоритеты, сложности и чувствительность к выбору оптимального маршрута. Влияние оценки на деятельность общественного транспорта.



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 629.55: 004.942

DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-6-1>

Методы формирования цифрового двойника акватории для навигации беспилотных судов



Игорь РОЗЕНБЕРГ



Сергей СОКОЛОВ



Ирина ДУБЧАК

Игорь Наумович Розенберг¹, Сергей Сергеевич Соколов², Ирина Александровна Дубчак³

^{1, 2, 3} Российский университет транспорта (МИИТ), Москва, Россия.

¹ ORCID 0000-0001-9589-6783; Scopus Author ID: 15136568900; РИНЦ SPIN-код: 2958-4186; РИНЦ Author ID: 652172.

² ORCID 0000-0002-4581-2518; WoS Researcher ID: A-9507-2015; Scopus Author ID: 56606754000; РИНЦ SPIN-код: 3175-5350; РИНЦ Author ID: 207642.

³ РИНЦ SPIN-код: 1330-5849; РИНЦ Author ID: 1152475.

✉ ³ info@science-ru.ru.

АННОТАЦИЯ

В статье рассмотрен комплекс методов, с помощью которых возможно формирование цифрового двойника акватории для осуществления автономной навигации речного судна для решения задач моделирования движения автономного судна в акватории при различных параметрах окружающей среды (скорости течения, скорости ветра и пр.), в том числе динамически изменяемых в процессе движения, отработки алгоритмов действия автономного судна в условиях возникающих угроз и чрезвычайных происшествий. Предложенные методы включают в себя аэрофотосъемку с беспилотных авиационных систем, воздушное лазерное сканирование и координирование результатов их обработки с применением геодезического оборудования, функционирующего

с использованием глобальных навигационных спутниковых систем и служащего для увязки всех получаемых пространственных данных в единую систему координат, для формирования высокоточных компонентов цифрового двойника акватории, включая линию уреза воды и части надводных элементов.

Для формирования донной части цифрового двойника акватории рассмотрена возможность применения данных батиметрической съемки многолучевым эхолотом, а также данных аэрофотосъемки с беспилотного воздушного судна, оснащенного высокоточным геодезическим приемником и бортовой инерциальной системой для закладки маршрутов батиметрической съемки.

Ключевые слова: цифровой двойник акватории, автономное судовождение, цифровая модель рельефа, цифровая модель дна, воздушное лазерное сканирование, аэрофотосъемка, водный транспорт.

Для цитирования: Розенберг И. Н., Соколов С. С., Дубчак И. А. Методы формирования цифрового двойника акватории для навигации беспилотных судов // Мир транспорта. 2023. Т. 21. № 6 (109). С. 6–13. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-6-1>.

Полный текст статьи на английском языке публикуется во второй части данного выпуска.
The full text of the article in English is published in the second part of the issue.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время во всем мире растёт интерес к созданию автоматизированных беспилотных (безэкипажных) судов [1]. Управление безэкипажным судном представляет собой сложнейшую техническую проблему, одной из компонент которой является цифровой двойник акватории (ЦДА), содержащий в себе всю полноту данных, требуемых для навигации беспилотных (автономных) судов [2].

В 2002 году концепция цифрового двойника была первоначально представлена как «модель отражения информации» профессором Мичиганского университета Майклом Гривзом [3; 4]. Термин «цифровой двойник» (ЦД) был официально принят в 2010 году, когда Национальное управление по аэронавтике и исследованию космического пространства (NASA) США предоставило подробную концепцию. Это описание относится к комплексному использованию физических моделей, датчиков, исторических эксплуатационных данных и соответствующей дополнительной информации для моделирования междисциплинарных и многомасштабных процессов. Цель состоит в том, чтобы создать виртуальное представление, которое может отражать весь жизненный цикл соответствующего физического объекта [5]. По сути, предлагаемая модель ЦД включает в себя три основных компонента: физический продукт, виртуальный продукт и связь между этими двумя продуктами.

Хотя концепция ЦД первоначально появилась в аэрокосмической и производственной областях, с тех пор она эволюционировала, распространив своё применение на нематериальные процессы, такие как умные города [6], прецизионное здравоохранение [7–9], цифровую Землю и даже метавселенную [10–14]. ЦД вошел в десятку ключевых технологических трендов цифровой индустрии 2019 года по версии Gartner [15]. Ярким примером применения ЦД является проект «Destination Earth», инициированный Европейским союзом в марте 2021 года. Этот проект направлен на создание чрезвычайно точного ЦД Земли для непрерывного и точного мониторинга здоровья планеты. Кроме того, он направлен на содействие высокоточному прогнозированию стихийных бедствий и антропогенной деградации окружающей среды, а также на изучение социально-

экономических последствий изменения климата и серьёзных стихийных бедствий [13].

С развитием технологии ЦД диапазон её применения постепенно расширяется, включает в том числе морскую среду, тем самым способствуя появлению цифрового двойника океана (ЦДО). На сегодняшний день реализовано множество применений ЦД в различных сценариях [16]. Например, с помощью реконструкции волн и прогнозирования движения судов были разработаны системы ЦД, обеспечивающие в режиме реального времени работу морских судов [17]. С применением технологии ЦД созданы высокоточные системы моделирования для беспилотных подводных глайдеров [18].

ГОСТ определяет «цифровой двойник изделия» как «систему, состоящую из цифровой модели изделия и двусторонних информационных связей с изделием (при наличии изделия) и (или) его составными частями»¹. Если расширять понятие цифрового двойника за рамки «изделия», то получило признание определение «цифрового двойника как цифровой (виртуальной) модели любых объектов, систем, процессов или людей, точно воспроизводящей форму и действия оригинала и синхронизированной с ним»². Цифровой двойник необходим «для моделирования процессов в оригинале в тех или иных условиях»².

Согласно определению, данному в Водном кодексе Российской Федерации, акватория – «водное пространство в пределах естественных, искусственных или условных границ», то есть некоторая водная поверхность, ограниченная условно или физически. Однако в процессе навигации используется в первую очередь информация о глубинах акватории, рельефе дна, течениях, береговых навигационных знаках, препятствиях и пр.

Отсюда следует, что цифровой двойник акватории (ЦДА) – это копия в виртуальной среде подводной и береговых частей акватории, а также её водной толщи, в полноте и достоверности достаточной для осуществ-

¹ ГОСТ Р 57700.37-2021 «Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения».

² Что такое цифровые двойники и где их используют // РБК Тренды. [Электронный ресурс]: <https://trends.rbc.ru/trends/industry/6107e5339a79478125166eeb?from=copy>. Доступ 02.11.2023.





вления автономного судовождения, являющаяся синтезом 3D-моделей этих частей, картографической и семантической информации об объектах, на них расположенных, и динамических процессов, протекающих на их территории.

С помощью ЦДА возможно решение спектра задач, включающих, например, моделирование движения в акватории автономного судна при различных параметрах окружающей среды (скорости течения, скорости ветра), в том числе динамически изменяемых в процессе движения, отработка алгоритмов действия автономного судна в условиях возникающих угроз и ЧП [19], моделирование маршрутов судна в зависимости от задач (самый быстрый маршрут, самый экономный маршрут), использование при осуществлении навигации для точного позиционирования судна путем сравнения данных с внешних датчиков с данными ЦДА [20] и выбора дальнейших действий в зависимости от обстановки и текущих задач.

Целью исследования являлось определение комплекса методов, с помощью которых возможно формирование цифрового двойника акватории для осуществления автономной навигации речного судна для решения задач моделирования его движения в акватории при различных параметрах окружающей среды, в том числе динамически изменяемых в процессе движения.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Объекты и структура цифрового двойника акватории

Для успешного функционирования ЦДА следует наполнить его всеми данными, используемыми для навигации судов. Основное требование к данным ЦДА – все данные должны быть увязаны между собой и находиться в единой системе координат. Компоненты ЦДА по отношению к изменению координат в пространстве и к своей форме подразделяются на статические, переходные и динамические. Кроме того, в ЦДА динамические объекты зависят от факторов – переменных величин, влияющих на состояние объекта.

К статическим объектам ЦДА относятся объекты, не меняющие своего пространственного положения: это большинство антропогенных объектов – мосты, причалы, навигационные знаки, плотины и пр. Также к стати-

ческим объектам в большинстве случаев можно отнести береговую линию.

К переходным объектам ЦДА относятся объекты, обладающие возможностью изменять свою форму и координаты с течением времени. Как правило, это объекты, перемещающиеся и меняющие форму в реках под воздействием русловых потоков. Также к переходным объектам следует отнести часть антропогенных объектов, таких как бакены, вехи и иные, изменяющих свое положение в зависимости от ветра и течения, а также, в каждую новую навигацию, – из-за ошибок места постановки якоря плавучего знака.

К динамическим объектам ЦДА относятся движущиеся в пределах акватории объекты – суда, паромы, плавучие препятствия и т.д. Движение динамических объектов зависит от факторов – переменных величин, влияющих на состояние объекта, – скорости и направления течения и ветра.

Компоненты ЦДА объединены между собой в единую структуру данных, представляющую собой совокупность элементов данных, между которыми установлены определенные связи, а также способ организации данных для более эффективного использования. Структура данных в рамках цифрового двойника акватории представляет собой атрибутивную информацию, заложенную в каждый слой каждого компонента.

Слои или объекты обозначаются тремя следующими типами знаков: площадные (полигональные), линейные и точечные.

Площадными знаками отмечаются объекты, изображаемые в масштабе карты, то есть такие, размеры которых (длину, ширину и площадь) можно измерить по карте, например, крупное озеро, река и др. Нормативные документы ранее давали такое определение: «Площадной знак состоит из контура изображаемого объекта и заполняющих его фоновой окраски, цветовой штриховки или сетки одинаковых значков. Контурные объектов показываются на карте сплошными линиями или пунктиром в соответствии с их очертаниями на местности»³.

Линейными знаками изображаются узкие протяженные объекты, шириной которых

³ Приказ Министерства регионального развития Российской Федерации от 31 января 2007 года N 4 «Об утверждении Требований к способам отображения на картах (схемах) точечных, линейных и площадных объектов, предусмотренных Положением о составе схем территориального планирования Российской Федерации».

в масштабе карты можно пренебречь, а длины которых выражаются в масштабе карты (железнодорожные пути, дороги, водотоки, ЛЭП, продуктопроводы и другие объекты).

Точечные объекты – это объекты, расположенные только в одной точке пространства в масштабе карты (одинокое дерево, дома, колодцы, пункты государственной геодезической сети). Точечные объекты могут быть обозначены координатами своего местоположения.

В зависимости от требуемого масштаба формируемого плана один и тот же объект может изображаться по-разному, то есть при создании плана крупных масштабов объект может быть обозначен площадным знаком, а при создании плана мелкого масштаба – точечным.

В каждом слое содержится собственная атрибутивная информация, которая в свою очередь подразделяется на два типа: позиционная и непозиционная.

Позиционная информация описывает положение объектов в пространстве в двухмерных или трёхмерных координатах.

К непозиционной информации относятся качественные характеристики объектов – семантические данные, а также количественные – статистика. Непозиционная информация представляется в виде текстовых и/или числовых параметров. В большинстве случаев при непосредственной работе с данными тип объекта маркируется и опознается по его атрибутивным параметрам (например, мост имеет название и идентифицируется по строительным материалам (железобетонный, металлический, каменный, деревянный), ширине, высоте, наличию судоходных пролетов, количеству судоходных пролетов).

Таким образом, атрибутивная информация объектов различных компонентов ЦДА будет содержать в себе следующие данные:

- позиционные – положение объекта в пространстве: X , Y , Z . Данный тип информации наиболее применим к точечным объектам, однако для площадных и линейных объектов также возможен вывод пространственной информации в атрибуты путём создания отдельного точечного слоя с извлеченными из полигона или линии вершинами;

- непозиционные – семантическое и статистическое описание объекта: номер объекта, имя объекта, характеристика объекта,

связь с пространственной природой объекта (площадь, периметр, ширина, высота).

Методы формирования цифрового двойника акватории

Сбор пространственных данных для формирования цифрового двойника акватории производится одновременно несколькими способами – путём воздушного лазерного сканирования, аэрофотосъёмки, наземной геодезией и батиметрической съёмкой.

Воздушное лазерное сканирование, аэрофотосъёмка, наземная геодезия применяются для создания элементов береговой и надводной части ЦДА. Для подводной части ЦДА используется батиметрическая съёмка.

Воздушное лазерное сканирование

Воздушное лазерное сканирование (ВЛС) или лидарная съёмка – технология, позволяющая создавать на основе полученных облаков точек цифровые модели рельефа, цифровые модели местности и трёхмерные модели объектов.

Данный метод является самым быстрым, полным и достоверным способом сбора пространственно-геометрической информации о местности. Сутью метода воздушного лазерного сканирования является процесс записи координат X , Y , Z для каждого из отражений. Благодаря этому в результате получается пространственно-определённая модель местности.

Метод воздушного лазерного сканирования осуществляется при помощи вращающегося зеркала на модуле лидара, угол поворота которого измеряется энкодером, установленным на оси вращения зеркала. Энкодер – поворотный датчик, который имеет специальный поворотный круг, разделенный на секторы, именно благодаря ему данная конструкция позволяет быстро определить угол поворота. При движении воздушного судна сканирующий лазерный пучок направляется на различные объекты местности в плоскости, перпендикулярной оси вращения зеркала. Отраженный сигнал сканирующего лазерного пучка попадает на зеркало и регистрируется приёмником излучения, а затем преобразуется в привычные координаты X , Y , Z .

Результатом воздушного лазерного сканирования является облако точек лазерных отражений (ТЛО), которое в дальнейшем



преобразуется в облако точек достаточной плотности для последующего создания цифровых моделей.

Один из важнейших этапов обработки данных ВЛС – классификация плотного облака. Данный процесс позволяет разбить на классы облако точек, что в дальнейшем упрощает процесс работы с данными. Суть классификации плотного облака точек – вынос группы точек по различным признакам в определённый класс. Данный процесс является автоматическим, но требует контроля.

Аэрофотосъёмка

«Современная аэрогеодезия базируется на методах сбора геопространственной информации с движущихся носителей – цифровой аэро- и космической фотосъёмке (АФС), методах прямого геопозиционирования и методах цифровых преобразований результатов условно статических и динамических съёмки объектов к их статическим моделям в заданной системе координат» [21].

«Ортофотоплан – фотографический план местности на точной геодезической опоре, полученный путём аэрофотосъёмки с последующим преобразованием аэроснимков (из центральной проекции в ортогональную) на основе эффективного метода их дифференциального ортофототрансформирования» [22], и представляет из себя топографический цифровой фотоплан, составленный из ортофотоснимков, полученных в результате ортотрансформирования. Ортофотоплан создаётся в рамках номенклатурных листов или в заданных границах и характеризуется определённым номинальным пространственным разрешением.

Процесс создания ортофотоплана состоит из нескольких этапов: это фототриангуляция, увязка с наземным обоснованием, уточнение параметров внешнего ориентирования снимков, ортотрансформирование снимков [23].

Завершающий этап в построении ортофотоплана – ортотрансформирование снимков. Ортотрансформирование – математически строгое преобразование исходного изображения (снимка) в ортогональную проекцию и устранение искажений, вызванных рельефом, условиями съёмки и типом камеры.

Наземное геодезическое обоснование

Для точной привязки воздушного лазерного сканирования и аэрофотосъёмки необ-

ходимо выполнить геодезическое обоснование береговой части полигона ЦДА путём измерения координат центров авиационных опознаков на территории проведения ВЛС и АФС. Для этого требуется предварительное размещение авиационных опознаков на точках с известными координатами с целью последующей точной координатной привязки результатов фотограмметрической обработки материалов АФС и ВЛС.

В качестве опознаков рекомендуется использовать имеющие «твёрдые контуры на местности, контрастные с окружающим фоном и хорошо различимые на аэрофотоснимках» объекты. «Рекомендуется производить надёжное маркирование опознаков. При необходимости опознаки наносятся краской на дорожное покрытие. Форма опознака должна обеспечивать безошибочное определение его центра», в связи с чем рекомендуется использовать «опознаки типа «мишень», полукрест или крест»⁴.

Расположение авиационных опознаков должно подчиняться следующим принципам:

- на прямоугольных участках опознаки располагаются по схеме «конверт», предусматривающей установку не менее пяти знаков; четыре авиационных опознака устанавливаются в углах прямоугольника и один в зоне пересечений диагоналей. При увеличении геометрической сложности границ полигона АФС, сложности застройки и рельефа количество опознаков должно увеличиваться с равномерным распределением внутри площади съёмки и в каждой угловой зоне (рис. 1);

- при выполнении съёмки линейно-протяжённого объекта опознаки располагаются попарно в начале и конце участка съёмки и далее по линии трассы участка не реже чем через каждые 500 м вдоль оси (рис. 2);

- «при проектировании нескольких полётных заданий с планируемыми зонами перекрытия, необходимо установить не менее 2-х опознаков в зоне перекрытия. При ширине перекрытия полётных заданий более 1 км рекомендуется устанавливать опознаки не реже чем через 250 м»⁴;

⁴ ОДМ 218.9.017-2019. Отраслевой дорожный методический документ. Методические рекомендации по производству аэрофототопографических работ с использованием беспилотных летательных аппаратов при изысканиях в целях строительства и реконструкции автомобильных дорог. Федеральное дорожное агентство (РОСАВТОДОР). Москва, 2021.

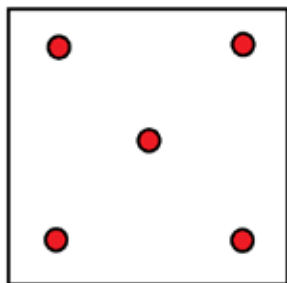


Рис. 1. Расположение опознаков при площадной АФС [выполнено авторами].

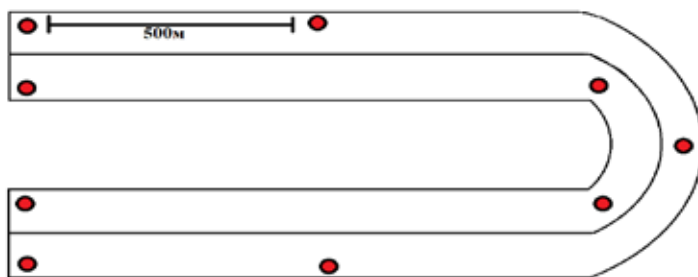


Рис. 2. Расположение опознаков при коридорной АФС [выполнено авторами].

– «на участках с разницей высот более 20 м, рекомендуется устанавливать дополнительные опознаки в характерных переломных точках»⁴;

– предпочтительное размещение опознаков – на уровне земли;

– над опознаком не должно быть объектов, загораживающих его от АФС в надири, включая деревья, контактные сети и провода ЛЭП;

– не размещать авиационные опознаки рядом с высокими объектами, включая заборы, столбы, деревья и пр.

Измерение координат центров опознаков целесообразно выполнять с применением оборудования глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС) геодезического класса в режиме дифференциальной коррекции для сокращения времени измерений.

Дифференциальная коррекция – это метод улучшения точности собираемых ГНСС-данных. Метод дифференциальной коррекции состоит в улучшении точности ГНСС-приёмника за счёт учёта навигационных поправок, получаемых со сторонних источников. Как правило, для выделения поправок используется ГНСС-приёмник, неподвижно расположенный в точке с известными координатами (базовая станция). Это позволяет выделять «шум» основного сигнала, обусловленный различными искажениями (неоднородности атмосферы, помехи от статичных и движущихся объектов, перетражения сигнала), формировать поправки и передавать их по каналу связи на второй подвижный приёмник (ровер), используемый для измерения точек с неизвестными координатами, что позволяет устранить ошибки в координатах, полученных на передвижном приёмнике, и с большей точностью определить его координаты.

Суть выполнения геодезических ГНСС-измерений в режиме реального времени

(кинематика реального времени, РТК) – получение дифференциальных поправок базовой станцией от каждого спутника на орбите, к которому она подключена, обработка этих дифференциальных поправок в онлайн-режиме и передача их (посредством мобильной связи или радиосвязи) в ровер.

В результате данных действий ровер, получивший поправки, автоматически уточняет своё местоположение, выводит дифференциально скорректированные координаты на экран, а также записывает эти координаты в каталог при непосредственном выполнении измерений.

В случае выполнения ГНСС-измерений с последующей камеральной обработкой (кинематика в пост-обработке, РРК) базовая станция записывает все полученные от спутника дифференциальные поправки, в то время как ровер записывает телеметрию.

Далее в камеральных условиях файл с дифференциальными поправками объединяется с телеметрией ровера в специализированном программном обеспечении, к ним добавляется файл эфемерид и производится обработка.

В результате получается каталог уточнённых геодезических измерений.

Также существует возможность произвести постобработку ГНСС-измерений, выполненных в режиме РТК, на случай если сигнал, передающий дифференциальные поправки от базовой станции к роверу, прервётся. Ровер, даже после потери сигнала, продолжит записывать данные телеметрии, которые позволят в постобработке получить каталог измеренных точек.

Батиметрическая съёмка

Батиметрические съёмки на водных объектах (реках, озерах, водохранилищах и в прибрежной зоне моря) выполняются



для картирования рельефа дна. В зависимости от ожидаемой сложности рельефа дна формируется сеть точек измерений, по которой в дальнейшем проводится измерение глубин.

Промеры производят по маршрутам, расположенным таким образом, чтобы минимизировать объем работ при заданной точности съёмки подводного рельефа [24].

Оптимизация маршрутов батиметрической съёмки может выполняться на основе аэрокосмической съёмки, так как видимая часть солнечного спектра хорошо пропускается водой и, как следствие, позволяет оценивать глубину с хорошей точностью [25]. К ограничивающим факторам определения донного рельефа аэрокосмическими методами относятся прозрачность воды (мутность), отсутствие хорошего освещения и наличие на поверхности воды возмущений (ряби).

Современная батиметрическая съёмка выполняется, как правило, с использованием многолучевого эхолота (МЛЭ) [26], выполняющего трёхмерное картирование рельефа дна на основании данных гидролокатора, сканирующего дно в плоскости, перпендикулярной направлению движения носителя. При этом для правильной привязки данных батиметрической съёмки носитель МЛЭ должен точно определять свое положение в пространстве. Определение положения в пространстве носителя осуществляется, как правило, с применением ГНСС-методов, либо в режиме RTK, либо в режиме PPK.

Современное гидроакустическое оборудование совместно «с программным обеспечением для производства гидрографических работ позволяет с высокой точностью производить сбор и обработку данных о рельефе дна» [27]. Гидроакустическое оборудование может устанавливаться на «гидрографические и специализированные суда, ...автономные и дистанционно управляемые подводные аппараты» [27].

«Данные, собранные и обработанные бортовым гидроакустическим комплексом, характеризуют уникальные особенности донного рельефа, как правило, представленные массивом глубин с географическими координатами. Полученные значения глубины характеризуются неопределенностями, вызываемыми отличием расчетных и фактических значений скорости звука в воде, и из-за аку-

стического рассеивания и поглощения донным грунтом» [27].

Многолучевой эхолот является одной из самых современных, эффективных и наиболее информативных систем для выполнения площадной гидроакустической съёмки и поэтому заслуживает внимания с точки зрения применения в целях навигационного ориентирования беспилотных автономных судов.

Датчик МЛЭ монтируется на днище судна. Подобное место размещения способствует получению более точных данных, снижает влияние на сигнал различных помех и искажений. Установленный МЛЭ при помощи преобразователей излучает короткие акустические импульсы в направлении дна акватории, формируя диаграммы направленности: широкую (120° – 150°), расположенную перпендикулярно ходу судна, и узкую (порядка 1° для высокоточных систем), расположенную вдоль хода судна.

«Таким образом, система выполняет пространственную фильтрацию акустических импульсов, отраженных от различных дискретных областей дна акватории вдоль полосы обзора, называемых пятнами облучения или пятнами засветки луча» [28]. Так во времени задержки акустического импульса и угла прихода луча формируется цифровой двойник рельефа дна.

КРАТКИЕ ВЫВОДЫ

Таким образом, для создания цифрового двойника акватории целесообразно применять комбинированные методы сбора информации. Для формирования береговой части ЦДА и надводных элементов эффективно использовать облако точек и трехмерные модели, построенные по данным аэрофотосъёмки и воздушного лазерного сканирования с геопривязкой по опознакам, измеренным геодезическими ГНСС-приемниками. Кроме того, данные аэрофотосъёмки могут использоваться для закладки маршрутов батиметрической съёмки.

Для формирования донной части ЦДА целесообразно использовать данные батиметрической съёмки МЛЭ.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Кириллова М. А., Рожко А. И. Перспективы развития безэкипажных судов в Российской Федерации // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. – 2020. – № 3. – С. 16–22. DOI: <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2020-3-16-22>.

2. Титов А. В., Баракат Л., Хаизаран А. Состояние и перспективы реализации технологии е-Навигации // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. – 2019. – Т. 11. – № 4. – С. 621–630. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-621-630.
3. Grieves, M. W. Product lifecycle management: the new paradigm for enterprises. International Journal of Product Development, 2005, Vol. 2, Iss. 1–2, pp. 71–84. DOI: <https://doi.org/10.1504/IJPD.2005.006669>.
4. Grieves, M. W. Digital Twins: Past, Present, and Future. In: The Digital Twin. Springer International Publishing, Cham, 2023, pp. 97–121. DOI: 10.1007/978-3-031-21343-4.
5. Glaessgen, E., Stargel, D. The Digital Twin Paradigm for Future NASA and U. S. Air Force Vehicles. Structural Dynamics and Materials Conference, Honolulu, 2012, 1818. DOI: 10.2514/6.2012-1818.
6. Qi, Y., Li, H., Pang, Z., Gao, W., Liu, C. A Case Study of the Relationship Between Vegetation Coverage and Urban Heat Island in a Coastal City by Applying Digital Twins. Frontiers in Plant Science, 2022, Vol. 13, 861768. DOI: 10.3389/fpls.2022.861768.
7. Torkamani, A., Andersen, K. G., Steinhubl, S. R., Topol, E. J. High-Definition Medicine. Cell, 2017, Vol. 170, Iss. 5, pp. 828–843. DOI: 10.1016/j.cell.2017.08.007.
8. Rozenberg, O., Greenbaum, D. Making It Count: Extracting Real World Data from Compassionate use and Expanded Access Programs. American Journal of Bioethics, 2020, Vol. 20, Iss. 7, pp. 89–92. DOI: 10.1080/15265161.2020.1779857.
9. Barat, S., Parchure, R., Darak, S., Kulkarni, V., Paranjape, A., Gajrani, M. [et al]. An Agent-Based Digital Twin for Exploring Localized Non-Pharmaceutical Interventions to Control COVID-19 Pandemic. Transactions of the Indian National Academy of Engineering, 2021, Vol. 6, Iss. 2, pp. 323–353. DOI: 10.1007/s41403-020-00197-5.
10. Tao, F., Zhang, H., Liu, A., Nee, A. Y. C. Digital Twin in Industry: State-of-the-Art. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, Vol. 15, Iss. 4, pp. 2405–2415. DOI: 10.1109/TII.2018.2873186.
11. Huang, S., Wang, G., Yan, Y., Fang, X. Blockchain-based data management for digital twin of product. Journal of Manufacturing Systems, 2020, Vol. 54, pp. 361–371. DOI: 10.1016/j.jmsy.2020.01.009.
12. Shen, W., Hu, T., Zhang, C., Ma, S. Secure sharing of big digital twin data for smart manufacturing based on blockchain. Journal of Manufacturing Systems, 2020, Vol. 61, pp. 338–350. DOI: 10.1016/j.jmsy.2021.09.014.
13. Bauer, P., Stevens, B., Hazeleger, W. A digital twin of Earth for the green transition. Nature Climate Change, 2021, Vol. 11, pp. 80–83. DOI: 10.1038/s41558-021-00986-y.
14. Wu, Y., Zhang, K., Zhang, Y. Digital Twin Networks: A Survey. IEEE Internet of Things Journal, 2021, Vol. 8, Iss. 18, pp. 13789–13804. DOI: 10.1109/IIOT.2021.3079510.
15. Panetta, K. Gartner Top 10 strategic technology trends for 2019. October 15, 2018. [Электронный ресурс]: <https://www.gartner.com/smarterwithgartner/gartner-top-10-strategic-technology-trends-for-2019>. Доступ 02.11.2023.
16. Qu, Q., Nurgaliev, I., Muzammal, M., Jensen, C. S., Fan, J. On spatio-temporal blockchain query processing. Future Generation Computer Systems, 2019, Vol. 98, pp. 208–218. DOI: 10.1016/j.future.2019.03.038.
17. Lee, J.-H., Nam, Y.-S., Kim, Y., Liu, Y., Lee, J., Yang, H. Real-time digital twin for ship operation in waves. Ocean Engineering, 2022, Vol. 266, Part 2, 112867. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2022.112867.
18. Hu, S., Liang, Q., Huang, H., Yang, C. Construction of a digital twin system for the blended-wing-body underwater glider. Ocean Engineering, 2023, Vol. 270, 113610. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2022.113610.
19. Сорокин А. Ю., Иванов Е. В., Безвесильная А. А., Клишкин А. А. О подходе к повышению точности цифровых двойников рельефа местности на основе анализа цифровых пространственных геоданных // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. – 2022. – № 1 (52). – С. 50–61. [Электронный ресурс]: <https://amchs.ru/upload/iblock/bba/ZHurnal-2022-1.pdf> [полный текст выпуска]. Доступ 23.11.2023.
20. Пинский А. С. Е-навигация и безэкипажное судовождение // Транспорт Российской Федерации. – 2016. – № 4 (65). – С. 50–54. EDN: WMAHYT.
21. Зотов Р. В. Аэрогеодезия: Учеб. пособие: в 2 книгах. Книга 1 – Омск: СибАДИ, 2012. – 216 с.
22. Большая советская энциклопедия: [в 30 т.] / гл. ред. А. М. Прохоров. – 3-е изд. – М.: Советская энциклопедия, 1969–1978.
23. Павловский А. А., Карелов А. И., Щеглов М. А., Нуйкин А. В. Применение беспилотных авиационных систем при проведении топографо-геодезических изысканий на железнодорожном транспорте // Автоматика, связь, информатика. – 2021. – № 3. – С. 21–24. DOI: 10.34649/AT.2021.3.3.003.
24. Мустафин М. Г., Вальков В. А., Павлов Н. С., Виноградов К. П., Боголюбова А. А. Мониторинг водных объектов дистанционными методами // Вестник Сибирского государственного университета геосистем и технологий (СГУГиТ). – 2023. – Т. 28. – № 2. – С. 67–75. DOI: 10.33764/2411-1759-2023-28-2-67-75.
25. Ткаченко К. С. Использование аэрокосмической съемки в гидробиологических исследованиях // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2012. – Т. 14. – № 1. – С. 15–31. EDN: PDBWOJ.
26. Фирсов Ю. Г. Основные требования к обеспечению качества современной батиметрической (топографической) съемки // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. – 2014. – № 3 (25). – С. 171–179. EDN: SFNIAF.
27. Попко А. О. Учет неопределенности съемки дна многолучевым эхолотом при формировании гидроакустических образов рельефа для целей навигационного ориентирования // Национальная Ассоциация Ученых. – 2015. – № 5–2 (10). – С. 76–80. EDN: YFTQHD.
28. Колосков Е. Н., Корнипаев Б. А. Способы сбора данных обратного рассеивания морского дна, реализованные в современных многолучевых эхолотах // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. – 2016. – № 6 (40). – С. 96–105. EDN: XHLRKY.

Информация об авторах:

Розенберг Игорь Наумович – доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РАН, научный руководитель Российского университета транспорта, Москва, Россия, info@science-rut.ru.

Соколов Сергей Сергеевич – доктор технических наук, доцент, проректор Российского университета транспорта, Москва, Россия, sokolov.ss@mit.ru.

Дубчак Ирина Александровна – начальница управления новых проектов и технологий Российского университета транспорта, Москва, Россия, info@science-rut.ru.

Статья поступила в редакцию 02.11.2023, одобрена после рецензирования 24.12.2023, принята к публикации 29.12.2023.





НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 338.47:656.078

DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-6-2>

О подходах к методологическому обоснованию формирования Единой опорной транспортной сети и приоритизации проектов развития транспортной инфраструктуры



Артур КАРЛОВ



Олег ЕВСЕЕВ

Артур Владимирович Карлов ¹,
Олег Владимирович Евсеев ²

¹ Российский университет транспорта, Москва, Россия.

² Научный центр по комплексным транспортным проблемам Министерства транспорта Российской Федерации (ФГБУ «НЦКТП Минтранса России»), Москва, Россия.

¹ ORCID 0000-0001-7147-8501; РИНЦ SPIN-код: 1409-3481; РИНЦ Author ID: 1080516.

² ORCID 0000-0002-2437-6497; Scopus Author ID 57215525670; РИНЦ SPIN-код: 9447-9075; РИНЦ Author ID: 187.

✉ ¹ karlov@edu.rut-miit.ru.

АННОТАЦИЯ

В статье рассмотрены подходы к обоснованию формирования Единой опорной транспортной сети (ЕОТС) – определены политические, научные и математические предпосылки для выделения ключевой инфраструктуры. В Транспортной стратегии Российской Федерации на период до 2030 года с прогнозом до 2035 года приведены базовые критерии для каждой из опорных сетей по видам транспорта, при этом отдельно обозначено, что развитие ЕОТС осуществляется с использованием инструментов транспортно-экономического баланса. В статье исследованы возможности для прикладного применения научных методов при реализации государственной транспортной политики на базе существующей нормативной базы.

В качестве механизма отбора ключевой (опорной) транспортной инфраструктуры предложено использовать алгоритм Краскала, а также соответствующие методы оптимизации с использованием принципов связанности, безальтернативности и интенсивности. Описаны подходы

к формированию связанного графа сети, а также его рёбер и вершин. В результате применения описанных алгоритмов строятся сегменты ЕОТС, образующие связанную транспортную сеть, включающую базовый транспортный каркас Единой сети, а также дополнительные участки сети, обеспечивающие пропуск транспортных потоков с наибольшим грузо- и пассажирооборотом, удовлетворяющие в совокупности ограничению на финансирование их содержания и ремонта.

Предложенная методология может использоваться в том числе при формировании инструментов транспортно-экономического баланса, а также при разработке специализированного программного обеспечения для моделирования транспортных потоков.

Таким образом, в статье представлено обоснование для научного сопровождения реализации государственной транспортной политики с целью повышения ее качества за счёт продвижения доказательного подхода.

Ключевые слова: транспортная политика, транспортная инфраструктура, анализ государственного управления, методы принятия решений.

Для цитирования: Карлов А. В., Евсеев О. В. О подходах к методологическому обоснованию формирования Единой опорной транспортной сети и приоритизации проектов развития транспортной инфраструктуры // Мир транспорта. 2023. Т. 21. № 6 (109). С. 14–21. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-6-2>.

Полный текст статьи на английском языке публикуется во второй части данного выпуска.
The full text of the article in English is published in the second part of the issue.

ВВЕДЕНИЕ

В 2021 году Правительство Российской Федерации утвердило новую редакцию Транспортной стратегии страны (далее – Стратегия) – на период до 2030 года с прогнозом до 2035 года. Впервые в ключевом документе транспортной отрасли были заложены основы для системного подхода к управлению развитием отрасли – развитие транспортной системы страны должно осуществляться на базе определённых Стратегией приоритетов, правил и установок. Положения Стратегии являются обязательными при принятии решений как для федерального Правительства, так и региональных властей, а также для руководителей предприятий транспортной отрасли.

Стратегия является инструментом реализации транспортной политики, которая, в свою очередь, при её реализации на качественном уровне опирается на так называемый «доказательный подход». В научных исследованиях в области методологии государственного управления данный вопрос изучен достаточно подробно [1], рассматривают его в отношении отдельных отраслей экономики и российские учёные [2]. Следует отметить, что в Стратегии заложены предпосылки для использования именно такого подхода, а также научных методов при формировании государственной транспортной политики. Так, важнейшей новацией Стратегии стало введение, определение и детализация Единой опорной транспортной сети (далее – ЕОТС) – согласно Стратегии это «сбалансированная и связанная транспортная сеть, объединяющая в себе важнейшие объекты транспортной инфраструктуры для всех видов транспорта и обеспечивающая функциональное единство транспортной системы, устойчивую взаимосвязь и пространственное развитие крупнейших населённых пунктов, экономических центров, основных минерально-сырьевых и производственных зон, геостратегических территорий, объектов культурного наследия Российской Федерации, наиболее востребованных объектов туризма и рекреационных районов».

В Стратегии приведены базовые критерии для каждой из опорных сетей по видам транспорта, при этом отдельно обозначено, что развитие ЕОТС осуществляется с использованием инструментов транспортно-экономического баланса: «Актуализация и корректировка генеральной схемы развития Единой опорной сети осуществляются на основе

транспортно-экономического баланса – комплекса экономико-математических и транспортных моделей, характеризующих зависимость спроса на перевозки и его распределение по видам транспорта от экономических факторов и параметров развития инфраструктуры».

Таким образом, в Стратегии заложены основы для применения «доказательного подхода» в государственной политике. Аналогичные подходы внедряются и в других отраслях экономики, что также отмечают и российские учёные. Кроме того, в Стратегии сформированы базовые параметры транспортной политики в области приоритизации расходования средств бюджетов всех уровней на модернизацию, содержание и развитие определённой транспортной инфраструктуры. Такого рода приоритизация является основой для дальнейшей проработки экономического обоснования механизмов принятия решений в транспортной отрасли и повышения эффективности экономики страны, в том числе с учётом необходимости повышения качества инвестиционных решений [3].

Текущая геополитическая обстановка и экономическая конъюнктура требуют трансформации условий работы транспортной отрасли, повышения эффективности и системности государственной транспортной политики.

Уровень развития транспортной системы напрямую связан с потенциалом развития экономики, что не раз отмечалось в научных исследованиях, проведённых с применением различных эмпирических подходов и иных методов оценки [4–6].

Существующая система управления развитием транспортной отрасли не в полной мере обеспечивает достаточную взаимосвязь задач развития различных видов транспорта и преимущественное достижение сквозной цели по обеспечению связанности и оптимизации всех видов транспортной инфраструктуры, что необходимо для оптимального распределения грузо- и пассажиропотоков с учётом текущих вызовов и задач развития Российской Федерации.

Представляется, что востребована разработка обоснования развития ЕОТС, объединяющей в себе важнейшие объекты транспортной инфраструктуры для всех видов транспорта и обеспечивающей функциональное единство транспортной системы за счёт инструмента транспортно-экономического





Рис. 1. Система приоритизации проектов развития в транспортной отрасли на базе концепции Единой опорной транспортной сети [схема авторов].

баланса, предусматривающего оптимальное планирование соответствующих инфраструктурных проектов.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Несмотря на то, что Стратегия достаточно подробно описывает критерии отбора объектов и участков инфраструктуры в составы опорных сетей по видам транспорта, отбор потребует дальнейшей детализации, уточнения критериев и формализации самой процедуры отбора для построения связного графа ЕОТС.

Одновременно необходимо установить процедуры принятия решения – какие именно проекты следует отбирать для целей развития ЕОТС. Процедуры отбора могут базироваться на инструментах поддержки принятия решений – системах ранжирования и отбора проектов на базе методов «затраты-выгоды» и мультикритериального отбора [7].

Таким образом, в рамках данного исследования и для целей настоящей статьи предлагается рассматривать двухступенчатую систему принятия решений о параметрах развития транспортной инфраструктуры в долгосрочных программах развития отрасли:

1. Сужение альтернатив в процедуре отбора: приоритизация и отбор критически важной и перспективной инфраструктуры – её формализация в реестр (перечни) инфраструктуры ЕОТС.

2. Отбор мероприятий по развитию инфраструктуры ЕОТС по их значимости в условиях ограниченного финансирования на базе процедур мультикритериального анализа и методов «затраты-выгоды».

Схематически процедура отбора изображена на рис. 1.

РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Методологический подход к формированию графа ЕОТС

Для целей отбора объектов ЕОТС предложим следующий методологический подход, уточняющий механизмы Стратегии.

ЕОТС разделяется на сегменты с учётом максимизации обслуживаемых транспортных потоков в пределах ограничений на содержание и ремонт объектов транспортной инфраструктуры.

Сегменты формируются в порядке увеличения объёма транспортных потоков, проходящих через сеть, в пределах лимита финансирования ее содержания и ремонта.

Для определения границ ЕОТС предлагается алгоритм сегментации сети.

1) Сегмент 1 – базовый транспортный каркас ЕОТС – минимальное связное дерево транспортной сети, покрывающее все ключевые транспортные зоны и обеспечивающее их связность друг с другом. Объекты базового транспортного каркаса должны обеспечи-

ваться содержанием и ремонтом в обязательном порядке.

2) Сегмент 2 и последующие сегменты образованы объектами транспортной инфраструктуры, присоединяемыми к транспортному каркасу и обеспечивающими сокращение расстояний и времени перевозок (повышение связности сети).

Присоединение осуществляется последовательно по уровням, исходя из максимизации транспортных потоков, обслуживаемых добавляемыми объектами, и удовлетворения заданного ограничения на ресурсы содержания и ремонта этих объектов. Транспортный каркас ЕОТС с добавленными к нему объектами образует сеть общего вида, называемую сегментом следующего уровня. Границы сегмента определяются заданным бюджетным ограничением ресурсов на содержание и ремонт объектов, включённых в сегмент.

3) Увеличение бюджетного ограничения на содержание объектов ЕОТС даёт возможность построить сегменты последующих уровней, каждый из которых будет включать предыдущий сегмент и новые добавляемые к нему объекты транспортной инфраструктуры. Таким образом сегменты разных уровней вложены друг в друга. С переходом от уровня к уровню сегменты постепенно захватывают все новые и новые объекты транспортной инфраструктуры ЕОТС.

Сегментом ЕОТС будем называть связный подграф графа ЕОТС, покрывающий все ключевые транспортные зоны рассматриваемой территории. Цель разбиения графа ЕОТС на сегменты состоит в том, чтобы определить, какое подмножество объектов ЕОТС следует в первую очередь обеспечить финансированием на создание, содержание и эксплуатацию на протяжении жизненного цикла, какое подмножество объектов – во вторую очередь и так далее по приоритетам. При этом каждое подмножество должно определять подграф ЕОТС, обладающий свойством связности. Иначе не будет выполняться основная функция Единой опорной сети, то есть обеспечение перевозок между всеми транспортными зонами, определёнными для заданного исследования.

Исходный перечень транспортных зон:

- столицы субъектов Российской Федерации;
- города с численностью населения от 100 тыс. чел;

- аэропорты и запасные аэродромы, необходимые для безопасной работы аэропортов;
- железнодорожные станции;
- морские и речные порты;
- пункты пропуска через государственную границу;
- столицы соседних государств, имеющие транспортные связи с Российской Федерацией;
- зоны освоения природных ресурсов;
- производственные кластеры, центры экономического роста;
- крупные объекты туристической привлекательности;
- населённые пункты, не имеющие круглогодичного сухопутного сообщения, кроме внутренних водных путей;
- эксклавные территории и отдельные территории геостратегического значения;
- мультимодальные транспортно-логистические центры, обладающие достаточной целевой перерабатывающей способностью (например, не менее 200 тыс. контейнеров в 20-футовом эквиваленте в год), интегрированные в сеть линейной инфраструктуры ЕОТС, транспортно-логистические центры, создаваемые в формате «грузовых деревень».

В множестве данных транспортных зон выделяются *ключевые транспортные зоны*, для которых будет найдена покрывающая их связная единая транспортная сеть.

Таким образом, сегменты – это связные подграфы графа ЕОТС, покрывающие все ключевые транспортные зоны. Связность графа определяется наличием пути по данному графу между любыми парами его вершин. Поэтому для решения задачи необходимо определить ключевые транспортные зоны (узлы графа ЕОТС), на которые будет опираться ЕОТС и обеспечивать их связность, а затем найти ребра графа ЕОТС, по которым можно «проехать» из любой вершины в любую другую, то есть рёбра, обеспечивающие связность графа. Подходы к такой задаче рассматривались рядом авторов [8], однако преимущественно касались сетей, состоящих из инфраструктуры одного вида транспорта.

В первую очередь целесообразно определить исходное подмножество объектов ЕОТС – первый базовый сегмент, обеспечиваемый финансированием на содержание и ремонт, образующий связный подграф ЕОТС и позволяющий пропустить наибольший объем транспортных потоков. Алгоритм построения первого сегмента ЕОТС может работать следую-



шим образом. В сегмент последовательно включаются объекты ЕОТС, обеспечивающие пропуск максимального потока, до тех пор, пока получаемая сеть не станет связной, то есть не покроет все ключевые транспортные зоны, и между любыми зонами будет существовать путь по объектам данного сегмента ЕОТС. Для решения данной задачи можно использовать алгоритм Краскала (алгоритм поиска минимального покрывающего дерева в графе), известный из теории графов. Данный подход в отечественной литературе в отношении транспортной отрасли практически не используется, за исключением отдельных работ в отношении агломераций [9].

Полученный граф будет иметь вид дерева (в терминологии теории графов) – графа без циклов, покрывающего все вершины графа. Этот граф содержит минимальное количество рёбер, позволяющих «проехать» из любой вершины в любую другую. Таким образом, первый базовый сегмент ЕОТС – это минимальный подграф ЕОТС, который обеспечивает связность всех транспортных зон рассматриваемой территории, и при этом пропуск наибольшего транспортного потока. Граф первого базового сегмента ЕОТС можно назвать остовом ЕОТС или транспортным каркасом ЕОТС. Пути по покрывающему дереву (транспортному каркасу ЕОТС) могут быть слишком длинными между некоторыми транспортными зонами. Поэтому, если имеются дополнительные резервы ресурсов на содержание и ремонт, целесообразно дополнить транспортный каркас ЕОТС объектами ЕОТС, обеспечив их финансированием, чтобы сократить пути по транспортному каркасу ЕОТС и обеспечить возможность прокладывать маршруты между различными ветвями покрывающего дерева.

За счёт добавления рёбер (объектов) к транспортному каркасу ЕОТС покрывающее дерево превращается в сеть общего вида с возможностью использования более коротких путей между транспортными зонами. Такая сеть представляет собой второй сегмент ЕОТС.

Задача построения второго сегмента может быть сформулирована следующим образом. В сегмент 2 включаются все вершины и рёбра первого сегмента, а также объекты ЕОТС, не вошедшие в сегмент 1, обеспечивающие пропуск максимального суммарного потока так, чтобы их суммарное финансирование не превышало заданного бюджетного ограничения. (Необходимое примечание: поскольку покрывающее дерево

содержит все узлы графа, можно добавлять к нему любые ребра (объекты ЕОТС) и граф останется связным). При условии увеличения лимита финансирования можно построить следующий сегмент ЕОТС, который будет включать предыдущий сегмент и будет содержать больше рёбер (объектов) ЕОТС, что сделает граф транспортной сети ещё более связным, то есть содержащим большее количество допустимых маршрутов между вершинами (транспортными зонами). Так можно построить несколько сегментов, каждый из которых будет соответствовать выделению определённого дополнительного лимита финансирования мероприятий по содержанию и ремонту объектов транспортной инфраструктуры.

2. Предлагаемые алгоритмы

Объекты ЕОТС включаются в приоритетное подмножество объектов (сегмент ЕОТС) по принципу выполнения максимального объёма перевозок в год.

Алгоритм Краскала (модифицированный) для построения первого сегмента ЕОТС – минимального покрывающего дерева или транспортного каркаса ЕОТС – работает следующим образом.

Пусть в графе ЕОТС имеется N узлов (вершин). Алгоритм начинает работу с N деревьями, каждое из которых первоначально состоит из одной единственной вершины – определённого узла графа ЕОТС. Далее к деревьям последовательно присоединяются рёбра графа ЕОТС, соединяющие разные деревья. Рёбра, соединяющие вершины одного дерева, не рассматриваются, чтобы дерево не превратилось в сеть, поскольку соединение двух вершин одного дерева приводит к образованию цикла в полученном графе, который перестает быть деревом и превращается в сеть общего вида. При присоединении ребра, соединяющего два разных дерева, эти деревья сливаются и из них образуется одно новое дерево. При этом дерево с меньшим номером поглощает дерево с большим номером. На каждом шаге между деревьями отыскивается ребро с максимальным объёмом перевозок. Процесс продолжается, пока все деревья не сольются в одно единственное дерево, имеющее номер 1. Это дерево будет минимальным покрывающим деревом, обеспечивающим пропуск потоков с максимальным суммарным объёмом. В классическом алгоритме Краскала объём перевозок не учитывается.

Модифицированный алгоритм

Краскала построения базового сегмента S_i (транспортного каркаса) ЕОТС

Данные: $T_1, \dots, T_N$ – покрывающие деревья ЕОТС, первоначально состоящие каждое из одной вершины (узла) графа ЕОТС.

Начало: $W = 0$ – начальное значение суммарного объёма перевозок формируемого сегмента S_i .

Цикл 1 построения сегмента S_i (бесконечный цикл с выходом по условию).

Найти ребро e_{ij} графа сети, соединяющее два дерева T_i, T_j , где $i < j$, имеющее максимальную оценку $W(e_{ij})$ объёма перевозок.

Присоединить дерево T_j и ребро e_{ij} к дереву T_i , то есть положить $T_i = T_i \cup e_{ij} \cup T_j$. Положить $W = W + W(e_{ij})$.

Если дерево T_i поглотило все остальные деревья, т. е. осталось только одно дерево T_i , то выход из цикла 1.

Конец цикла 1.

Полученное покрывающее дерево T_i образует первый базовый сегмент (транспортный каркас) ЕОТС, т. е. $S_i = T_i$.

Конец алгоритма построения сегмента S_i ЕОТС.

В результате применения модифицированного алгоритма Краскала будет найден подграф ЕОТС в виде покрывающего дерева для всех ключевых транспортных зон. Построенный подграф является связным и обеспечивает пропуск потоков, имеющих в совокупности максимальный объём. Этот подграф является транспортным каркасом ЕОТС. Построение транспортного каркаса ЕОТС отвечает критерию связности сети и критерию безальтернативности, поскольку безальтернативные пути (рёбра) графа транспортной сети, не имеющие альтернатив, автоматически будут включены алгоритмом Краскала в минимальное покрывающее дерево.

Следующие сегменты S_t , где $t = \overline{2, q}$, то есть сегменты следующих уровней, начиная со второго, строятся при наличии дополнительных лимитов финансирования C_t содержания и ремонта объектов ЕОТС.

Алгоритм построения сегментов уровня 2 и последующих уровней

Цикл построения сегментов $t = \overline{2, q}$ (начина со второго).

Построение сегмента с номером t :

Определить заданный лимит финансирования C_t для данного сегмента t .

Если лимита нет, то выход из цикла построения сегментов.

Если есть хотя бы один объект o , не включённый в построенные сегменты ЕОТС, имеющий стоимость содержания и ремонта меньше заданного лимита финансирования C_t , то выполнить построение сегмента t ЕОТС при помощи решения оптимизационной задачи максимизации суммарного объёма перевозок объектов o_j транспортной сети, включаемых в рассматриваемый сегмент, при заданном ограничении на лимит финансирования C_t содержания и ремонта его объектов.

Конец Цикла 1.

Конец построения сегментов.

Построение сегмента t ЕОТС осуществляется при помощи решения оптимизационной задачи, в которой критерий оптимизации выражает максимизацию суммарного объёма перевозок объектов o_j транспортной сети, включаемых в рассматриваемый сегмент ЕОТС:

$$\sum_j x_j \times W(o_j) \rightarrow \max,$$

$$\text{где } x_j = \begin{cases} 1, & \text{если объект } o_j \text{ включается} \\ & \text{в формируемый сегмент сети;} \\ 0 & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

$W(o_j)$ – объём перевозок для объекта o_j .

Ограничения задачи выражают отсутствие превышения заданного лимита финансирования содержания и ремонта объектов формируемого сегмента ЕОТС:

$$\sum_j x_j \times C(o_j) \leq C_t,$$

где $C(o_j)$ – объём финансирования C_t содержания и ремонта объекта o_j ;

C_t – лимит финансирования содержания и ремонта объектов, включаемых в сегмент t ЕОТС.

Данная оптимизационная задача имеет вид задачи линейного программирования «о рюкзаке», точнее «0–1 задачи о рюкзаке» и решается стандартным методом (динамическое программирование). В случае большой размерности для решения может использоваться приближённый (так называемый «жадный») алгоритм или иные схожие алгоритмы (в зависимости от решаемых задач) [10].

Приближенный алгоритм построения сегмента t ЕОТС

Положить $OC_t = C_t$, то есть остаток лимита финансирования OC_t вначале равен заданному лимиту C_t .



Цикл построения сегмента (бесконечный цикл с выходом по условию).

Среди объектов ЕОТС всех видов транспорта найти объект o с максимальным объемом перевозок $W(o)$, укладываемый в заданный лимит финансирования, то есть такой, что $OC_i - C(o) \geq 0$.

Найденный объект включить в формируемый сегмент $S_i = S_i \cup o$. Положить $W = W + W(o)$. $OC_i = OC_i - C(o)$.

Если объект с указанными выше свойствами не найден или все рёбра графа ЕОТС включены в сегмент, то закончить построение сегмента ЕОТС, то есть выполнить выход из цикла построения сегмента.

Конец цикла построения сегмента.

В результате применения описанных алгоритмов будут построены сегменты ЕОТС, образующие связную транспортную сеть, включающую базовый транспортный каркас ЕОТС, а также дополнительные участки сети, обеспечивающие пропуск транспортных потоков с наибольшим объемом перевозок, удовлетворяющие в совокупности заданному ограничению на финансирование их содержания и ремонта.

Отметим, что в описанных выше алгоритмах формирования сегментов ЕОТС можно учитывать объем приведенной транспортной работы, выполняемой объектами транспортной сети. В этом случае для объектов транспортной сети рассматривается так называемая общая интенсивность грузовых и пассажирских перевозок или приведенная грузонапряженность, рассчитываемая как приведенный грузо- и пассажирооборот (транспортная работа) на километр пути. Здесь приведенный грузооборот рассчитывается по формуле $P = P_{гр} + k \cdot P_{пасс}$, где $P_{гр}$ – грузооборот; $P_{пасс}$ – пассажирооборот; k – коэффициент приведения пассажирооборота к грузообороту (например, для железных дорог принимается равным 1). Данный вариант расчетов позволяет детально учесть объемы перевозок, включая перевозки, которые используют ресурсы рассматриваемых участков транспортной сети не полностью, а только частично на определенной их протяженности. Однако это требует использования дополнительных исходных данных и усложняет расчеты.

При формировании второго и последующих сегментов ЕОТС можно в качестве дополнительной опции использовать критерий связности сети, учитывающий требования

о наличии прямых транспортных связей по инфраструктуре ЕОТС между определёнными приоритетными транспортными зонами или узлами сети, например, связей города Москвы со столицами соседних государств, столиц субъектов Российской Федерации с городами с численностью населения более 100 тыс. человек и пр. При этом необходимо отметить, что подобные транспортные связи с высокой вероятностью будут включены в ЕОТС описанными выше алгоритмами. Это связано с тем, что особенностью транспортной сети Российской Федерации является отсутствие большого количества альтернативных маршрутов сопоставимого качества между её основными узлами, и наиболее эффективные маршруты между ними являются наиболее востребованными при перевозках грузов и пассажиров, то есть будут отобраны в сегменты ЕОТС описанными выше алгоритмами. Тем не менее при формировании ЕОТС, если дополнительные требования о наличии прямых транспортных связей по ЕОТС между ключевыми узлами сети имеются, то выполнение этих требований целесообразно проверить при помощи алгоритма, приведенного ниже.

Алгоритм включения прямых транспортных связей в ЕОТС или проверки их наличия аналогичен вышеописанному. Для каждой пары заданных узлов A, B находится кратчайший путь между ними. В качестве длины пути целесообразно использовать оценку стоимости осуществления перевозки между узлами A и B , то есть рассматривать наиболее экономичный путь между узлами. Для найденного пути подсчитывается суммарная оценка стоимости $C(A, B)$ содержания и ремонта его участков, не вошедших в ранее сформированные сегменты ЕОТС. Если все участки найденного пути уже имеются в ЕОТС, то наличие прямой транспортной связи между узлами A и B считается подтвержденным. Среди рассмотренных узлов, прямые связи между которыми по ЕОТС не подтверждены, находится пара A_i, B_j с минимальной оценкой $C(A_i, B_j)$, и если суммарная стоимость содержания и ремонта объектов сформированного текущего сегмента ЕОТС в сумме с величиной $C(A_i, B_j)$ не превосходит лимита финансирования объектов данного сегмента, то рёбра рассматриваемого пути, не вошедшие в уже построенные сегменты ЕОТС, включаются в формируемый сегмент. Эти действия повторяются для оставшихся

пар узлов, пока не будет достигнут лимит суммарного финансирования содержания и ремонта объектов, отбираемых в формируемый сегмент. Для визуализации сети могут применяться различные подходы, данный вопрос рассматривался и в трудах российских учёных [11].

В результате в ЕОТС будут дополнительно включены объекты, через которые проходят наиболее дешёвые прямые транспортные связи между заданными узлами сети, либо будет подтверждено, что такие транспортные связи уже имеются в ЕОТС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате применения описанных алгоритмов будет сформирована совокупность объектов (узлов и рёбер) ЕОТС, удовлетворяющая заданным критериям.

- Критерии связности графа сети удовлетворяются за счет применения разработанного модифицированного алгоритма Краскала, обеспечивающего нахождение графа ЕОТС, связывающего все транспортные зоны.

- Критерий количественного отбора учитывается в модифицированном алгоритме Краскала посредством нахождения рёбер базового покрывающего графа (каркаса) ЕОТС с максимальным объёмом перевозок, а затем посредством присоединения к базовому каркасу дополнительных рёбер следующего сегмента сети, также с максимальным объёмом перевозок.

Формирование ЕОТС при помощи разработанных алгоритмов удовлетворяет ограничению на финансирование мероприятий содержания и ремонта объектов инфраструктуры, включаемых в ЕОТС.

В дальнейшем разработка связанного графа сети ЕОТС может использоваться при формировании транспортно-экономического баланса на базе методов, разработанных российскими исследователями [12; 13].

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Newman, J. Increasing the ability of government agencies to undertake evidence-informed policymaking.

Evidence Base, 2020, Iss. 2, pp. 1–9. DOI: 10.21307/eb-2020-005.

2. Капогузов Е. А., Чупин Р. И. Возможности использования доказательного подхода для анализа промышленной политики // Вестник Кемеровского государственного университета. Серия: Политические, социологические и экономические науки. – 2022. – Т. 7. – № 3 (25). – С. 323–330. EDN: UCIUOA.

3. Бычкова А. А. Инвестиции в транспортную инфраструктуру России // Вестник университета. – 2022. – № 2. – С. 151–159. EDN: AUTTNE.

4. Melo, P. C. Transport Infrastructure Effects on Economic Output: The Microeconomic Approach. In: International Encyclopedia of Transportation, Elsevier, 2021, Vol. 1, pp. 347–354. Ed.-in-chief Roger Vickerman. ISBN 978-0-08102-672-4. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102671-7.10065-X>.

5. Popova, Y. Relations between Wellbeing and Transport Infrastructure of the Country. Procedia Engineering, 2017, Iss. 178, pp. 579–588. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.01.112.

6. Бердников С. В., Патракеева О. Ю. Транспортная инфраструктура и экономический рост: проблема оценки эффектов // Системное моделирование социально-экономических процессов: труды 42-й Международной научной школы-семинара, Ростов-на-Дону, 01–06 октября 2019 года. – Воронеж: Воронежский государственный университет, 2019. – С. 46–51. EDN: BGRKMO.

7. Rosik, P., Wójcik, J. Transport Infrastructure and Regional Development: A Survey of Literature on Wider Economic and Spatial Impacts. Sustainability, 2023, Vol. 15, Iss. 1, 548. DOI: <https://doi.org/10.3390/su15010548>.

8. Крыгин А. А., Куприянов Б. В. Определение критических узлов транспортной сети // Управление большими системами. – 2022. – № 100. – С. 194–215. [Электронный ресурс]: <http://www.ubs.mtas.ru/upload/library/UBS10009.pdf>. Доступ 26.12.2023.

9. Макаров И. Н. Эффективность функционирования и развития транспортной системы крупного города и городской агломерации: критерии оптимизации, необходимость мультимодального взаимодействия // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2018. – Т. 22. – № 1. – С. 209–217. EDN: YMMWJK.

10. Козлова М. Г., Лукьяненко В. А., Макаров О. О., Руденко Л. И. Специфика построения многоагентных маршрутов в иерархических сетях // Таврический вестник информатики и математики. – 2022. – № 2 (55). – С. 7–29. EDN: PICXDW.

11. Гюллинг А. О., Воронцова Н. В. Визуализация на графах // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2023. – № 2. – С. 128–137. EDN: MLCYDT.

12. Евсеев О. В., Мурашов В. В., Забоев А. И. [и др.]. Транспортно-экономический баланс и его роль в координации транспортного планирования в условиях цифровой трансформации // Современные информационные технологии и ИТ-образование. – 2018. – Т. 14. – № 3. – С. 717–726. EDN: YYNQUH.

13. Ефимова О. В., Бабошин Е. Б. Трансформация методологии формирования транспортно-экономического баланса // Экономика железных дорог. – 2022. – № 6. – С. 29–38. [Платный доступ]. EDN: NEOWRB. ●

Информация об авторах:

Карлов Артур Владимирович – младший научный сотрудник Центра стратегических программ Российского университета транспорта, Москва, Россия, karlov@edu.rut-miit.ru.

Евсеев Олег Владимирович – доктор технических наук, доцент, научный руководитель Научного центра по комплексным транспортным проблемам Министерства транспорта Российской Федерации (ФГБУ «НЦКТП Минтранса России»), Москва, Россия, evseev@mintrans.org.

Статья поступила в редакцию 30.11.2023, одобрена после рецензирования 26.12.2023, принята к публикации 29.12.2023.





НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 656.121:325.1:656.073:656.224.072.4

DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-6-3>

Качество общественного транспорта мегаполиса в мультимодальных перевозках маятниковой миграции населения



Галина БУБНОВА



Олег ПОКУСАЕВ



Андрей АКИМОВ

Галина Викторовна Бубнова¹, Олег Николаевич Покусаев², Андрей Валерьевич Акимов³

^{1, 2} Российский университет транспорта, Москва, Россия.

³ ООО Аэроэкспресс, Москва, Россия.

¹ ORCID 0000-0002-2488-0247; РИНЦ SPIN-код: 1347-4880.

² ORCID 0000-0001-6916-8897.

³ ORCID 0000-0003-2186-9947; РИНЦ SPIN-код: 6207-5066.

✉ Bubisek@mail.ru.

АННОТАЦИЯ

В работе рассмотрены методологические вопросы создания действенного механизма структурной и параметрической идентификации течений в связанных потоках пешеходов и пассажиров на сложных, длинных маршрутах движения индивидов в границах мегаполиса. Такие маршруты определяют существенные объемы мультимодальных перевозок, повторяющихся в течение рабочей недели в пиковые часы, и их идентификация необходима для принятия управленческих решений организациями, занимающимися вопросами транспортного планирования, организацией движения общественного транспорта и транспортного обслуживания населения.

Ключевым моментом исследования является определение логики выбора маршрута через интегральную оценку его качества, которая включает оценку качества не только перевозки и доступного на транспорте сервиса, но и объектов транспортной инфраструктуры, а также объектов улично-дорожной сети, задействованных в реальных маршрутах перемещения людей по территории городской агломерации.

Для спецификации сложных маршрутов, течений с общими параметрами формирования и выбора маршру-

тов для профильных групп пешеходов-пассажиров, построения моделей их поведения предложен новый ключевой объект исследования – пользователь общественным транспортом (ПОТ), а также алгоритм идентификации таких маршрутов с использованием данных сотовых операторов.

Показано, что известные инструменты исследования структуры спроса на перевозки на общественном транспорте малоэффективны. Приводятся результаты исследования воспринимаемого пользователями качества общественного транспорта в черте московской городской агломерации. Выявлено смещение приоритетов в выборе варианта маршрута – от более экономичного по времени и цене к наилучшему по удобству и качеству общественного транспорта на маршруте.

Предложена модифицированная модель взаимозависимых видов деятельности, которые влияют непосредственно на оценку качества общественного транспорта на маршруте ПОТ, а также модель чувствительности ПОТ к качеству вариантов маршрута.

Ключевые слова: общественный транспорт, логистика перевозок, комбинированные маршруты, поведенческие профили, течения пассажиропотоков.

Для цитирования: Бубнова Г. В., Покусаев О. Н., Акимов А. В. Качество общественного транспорта мегаполиса в мультимодальных перевозках маятниковой миграции населения // Мир транспорта. 2023. Т. 21. № 6 (109). С. 22–32. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-6-3>.

Полный текст статьи на английском языке публикуется во второй части данного выпуска.

The full text of the article in English is published in the second part of the issue.

ВВЕДЕНИЕ

Широкое признание в соответствии с основными принципами устойчивого развития получил тезис о том, что более высоким качеством обладает общественный транспорт (ОТ), который является «более дружественным к окружающей среде», оперирует структурированным спросом на транспортные услуги и располагает развитым механизмом его удовлетворения, включая рациональный транзит (например, [1]).

Именно проблема создания такого механизма определяет ключевую *цель* настоящего исследования.

При этом необходимо заметить, что само понятие «общественный транспорт» весьма условное. Его в большинстве стран трактуют как особый вид пассажирского транспорта, который функционирует на территории и в границах населённого пункта, отвечает обязательным для него характеристикам, которые включают неизменность маршрута движения транспортных средств по выделенным для этих целей линиям транспортной сети; регулярность подачи транспортных средств на станции/остановки для входа/выхода пассажиров; публичность, то есть информированность населения о способах перевозки пассажиров, размерах и формах оплаты за проезд^{1, 2}. В ряде европейских стран и США, где доминирует перемещение людей с использованием личного автомобильного транспорта, требование движения общественного транспорта по разрешённым местными администрациями, департаментами транспорта схемам не является жёстким. В этих случаях возможны небольшие отклонения от траектории движения транспортных средств ОТ на отдельных участках транспортного маршрута, обусловленные сложной дорожной ситуацией, а также требованиями на посадку и высадку пассажиров (с обязательным сохранением запланированных остановок).

Согласно другому толкованию ОТ, к нему относят транспортные средства, предназначенные для одновременного перемещения «достаточно большого» количества людей [2],

¹ Collins English Dictionary (n. d.). [Электронный ресурс]: <https://www.collinsdictionary.com/dictionary/english/public-transport>.

² English Oxford Living Dictionaries (n. d.). [Электронный ресурс]: <https://www.oxfordlearnersdictionaries.com/definition/english/public-transport?q=Public+transport>.

что вносит некую неопределённость для осмысления объекта настоящего исследования.

Ещё одна характеристика общественного транспорта – это его «доступность», которая распространяется в одних трактовках на всё население, в других – на «широкие слои» населения.

Что касается физической доступности ОТ – это требование однозначное, а в части финансовой доступности во втором определении такой транспорт должен предоставлять ценовые условия для проезда пассажиров с «низкими» доходами. В этом контексте экономическая доступность ОТ также чётко не определена и трактуется в разных странах по-разному. В ряде случаев отрицается и сам принцип ориентации на обслуживание населения с низкими доходами. В последнее время набирает популярность точка зрения, согласно которой городской общественный транспорт должен предоставлять разные услуги по набору и качеству сервиса, обеспечивая удовлетворение потребности различных групп людей, в том числе пассажиров, готовых платить более высокую цену за более высокое качество [3]. Эта позиция определяет существующие отличия в стандартных наборах продуктов и услуг ОТ, принятых в разных странах, которые могут быть предоставлены населению за счёт выделения специализированных линий, включения в график движения подвижного состава транспортных средств повышенной комфортности, а также дополнительных сервисов.

Для мегаполисов требования неизменности, регулярности, публичности, доступности при организации «единовременных» перевозок «большого количества» пассажиров, на наш взгляд, являются наиважнейшими. В этом контексте в статье не рассматриваются личный автотранспорт, такси, включая маршрутные такси с количеством посадочных мест менее 20.

Система общественного транспорта крупных городских агломераций объединяет транспортные системы не только самого города, но и его пригородов. Для систем ОТ мегаполисов с высокой концентрацией объектов деловой застройки в центральных районах города (пример г. Москва), а жилых зданий – по окружности и в прилегающих к мегаполису пригородах характерна активная маятниковая миграция населения. Принимая во внимание





Рис. 1. Модель комплексной оценки качества транспорта (транспортных комплексов и систем) [составлено авторами].

масштабы крупных городских агломераций, высокую плотность транспортной сети, объединяющей пути сообщения различных видов городского транспорта в большинстве мегаполисов, а также удалённость жилых объектов от научно-образовательных, культурных, деловых и других центров притяжения людских потоков, значимыми и востребованными для населения являются сложные (с более чем одной пересадкой), продолжительные, комбинированные маршруты, обеспечивающие маятниковую миграцию населения и свойственные ей. Такие маршруты, по нашей оценке, в г. Москве составляют около 68 %. Наличие множества вариантов перемещения людей до пункта назначения по территории мегаполиса, использования различных элементов улично-дорожной инфраструктуры (на пешех участках их пути) и элементов инфраструктур различных видов общественного транспорта определяет необходимость оценки качества такого маршрута с позиции его конечного пользователя, который является основным источником информации о воспринимаемом им качестве общественного транспорта в целом.

Недостаточность фундаментальных разработок по исследованию логики построения и выбора сложного маршрута для различных поведенческих профилей пользователей об-

щественного транспорта с целью выделения в общем пешеходно-пассажирском потоке профильных течений с характерными параметрами их формирования, а также исследований чувствительности таких течений на длинных, комбинированных маршрутах с использованием современных цифровых технологий определяет актуальность поставленных выше исследовательских задач.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В среде учёных и практиков сегодня приняты единые критерии оценки качества основного «продукта» общественного транспорта – «перевозки пассажиров». Они нашли отражение в соответствующих стандартах, руководствах Международного союза общественного транспорта, ЕЭК ООН³, национальные руководства (напр.,⁴) и т.д. и опираются на классическую модель «петли качества».

³ UNECE. A Handbook on Sustainable Urban Mobility and Spatial Planning. Promoting Active Mobility. United Nations Publication, 2020. [Электронный ресурс]: <https://unece.org/transport/publications/handbook-sustainable-urban-mobility-and-spatial-planning>. Доступ 22.11.2023.

⁴ A Handbook for Measuring Customer Satisfaction and Service Quality. Transportation Research Board. National Research Council [TRB]. Washington, D.C.: National Academy Press, 1999.

Уровень качества в этом случае, как правило, определяет расхождение между полученным и ожидаемым качеством транспортной услуги. В США и в ряде стран он рассчитывается как отношение реального уровня качества к ожидаемому³.

С другой стороны, для оценки общественного транспорта как формы «организации» популярным стал набор критериев, который отражает общую интегрированную оценку качества транспорта как его пользователем, так и транспортными организациями [4]. Трансформируя подходы к комплексной оценке качества пассажирского транспорта со стороны его пользователей и организаций транспорта, мы получаем возможность построить концептуальную модель оценки качества общественного транспорта, представленную на рис. 1.

Поскольку общая оценка качества общественного транспорта для мобильного населения складывается из оценок результативности и качества (комфорта) перевозки в транспортном средстве отдельных индивидов, а также их оценок качества задействованных на маршрутах их следования элементов транспортной инфраструктуры (улично-дорожной, транспортной, маршрутной сети) и сервиса, то качество общественного транспорта в восприятии его пользователя («осознанное качество») будет тождественно качеству маршрута с широким набором характеристик.

Для комбинированных, длинных маршрутов, имеющих пересадочные узлы, пешие участки, показателя результативности (общее время в пути), по нашему мнению, становится уже недостаточно. На выбор маршрута (более качественного для индивида), как показали результаты исследований [5], влияют не только время в движении и ожидания транспортного средства, время перехода на другой транспортный маршрут, но и качество сервиса во время нахождения пассажира в транспортном средстве и пешехода, пассажира – на объектах инфраструктуры ОТ на пути следования от места отправления до места объекта назначения. В этом контексте известные методики оценки качества маршрута [6] могут быть использованы только в части оценки его результативности, а именно, «времени в пути следования».

Ряд исследователей делает попытку оценить транспортную услугу через призму её

ценности для конечного пользователя. Одни придерживаются традиционного взгляда и трактуют ценность такой услуги через возможность использования времени в транспортном средстве с пользой для себя [7; 8]. Другие – через доступность [9], третьи – через воспринимаемое удобство, качество комплексной услуги [10]. Рассматривая качество общественного транспорта на маршруте её пользователя в широком смысле, ценность варианта маршрута для ПОТ и качество общественного транспорта для ПОТ будут тождественны. Очевидно, что ценность одного и того же маршрута у разных людей, разных групп пользователей будет отличаться.

Традиционные методы определения структуры спроса на транспортные услуги, предпочтений пассажиров, удобства, доступности и других важных для них параметров и критериев построения и выбора маршрута в подавляющем большинстве методик опираются на маркетинговый инструментарий. Источниками информации в этом случае являются результаты проведённых опросов, анкетирования, которые, по мнению экспертов, эффективны только для оценки ожидаемого и желаемого качества маршрута. Вместе с тем, реальное предпочтение, выбор варианта маршрута можно «увидеть», используя современные цифровые технологии, данные сотовых операторов и предложенный в работе [11] метод идентификации маршрута движения индивида по территории городской агломерации.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для спецификации таких поведенческих профилей и, соответственно, течений связанных потоков пешеходов и пассажиров, в первую очередь, необходима идентификация ПОТ. Мы предлагаем под пользователем общественным транспортом мегаполиса понимать некий собирательный образ человека, который меняет свой статус в течение времени от индивида, принимающего решение (поиск информации, анализ, оценка и выбор варианта), до пешехода и пассажира на маршруте его передвижения. Введение данной категории в научный оборот позволяет избежать проблем интеграции и согласования данных из разных источников информации, а также связывания слоёв цифровой экосистемы транспорта [12]. В этом случае становится возможным осуществление многомер-



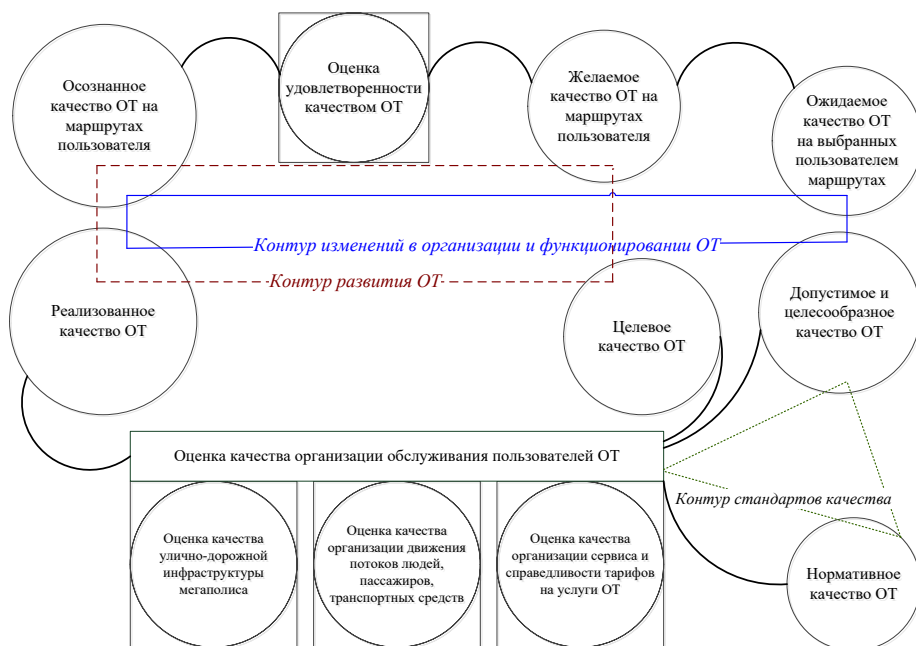


Рис. 2. Модель взаимозависимых видов деятельности, влияющих на оценку качества транспортных услуг и системы общественного транспорта на маршруте ПОТ [составлено авторами].

ного анализа результатов социологических и маркетинговых исследований, проводимых различными организациями, и аналитики, полученной непосредственно от перевозчиков, сотовых операторов, организаций, отвечающих за эксплуатацию и развитие транспортной инфраструктуры.

Рассмотрение данного объекта в комплексной схеме организации транспортного обслуживания населения общественным транспортом (КСОТ) даёт возможность оценивать качество «комплексного продукта» ОТ, а именно маршрута ПОТ со структурированным набором его характеристик в трёх фазах процесса оценки: желание (желаемое качество), ожидание (ожидаемое качество) и реальность (реализованное качество). В результате классическая петля качества модифицируется и принимает вид, представленный нами на рис. 2.

Как показано на рис. 2, оценка удовлетворённости общественным транспортом со стороны его пользователя может быть получена на основе результатов сравнения значений показателей качества «реализованного» и «осознанного желаемого», а также «реализованного» и «осознанного ожидаемого». В первом случае мы имеем дело с идеальной оценкой, во втором – с реалистичной, которая формируется с учётом имеющегося опыта

использования ПОТ на анализируемом им маршруте. При этом факторы, которые влияют на удовлетворенность и лояльность в оценке обслуживания, существенно не отличаются от представленных в работе [3].

Комбинированный маршрут ПОТ не всегда означает смену на маршруте вида транспорта, рассматриваются варианты использования одного вида транспорта, но разных номеров маршрутов движения транспортных средств по линиям/путям/автомобильным дорогам этого вида.

В маятниковой миграции ПОТ конечным пунктом назначения является объект длительного пребывания (задаётся исследователем), а начальным – место на карте жилой застройки. Ещё одно важное условие для идентификации объекта анализа и оценки (комбинированных маршрутов ПОТ) – это повторение маршрута в течение рабочей недели (в интервале времени наибольшей загрузки транспортной инфраструктуры). Соответственно, в основе предлагаемого инструментария по спецификации таких маршрутов лежит принцип «повторяемости».

Для идентификации таких маршрутов и мультимодальных схем перевозок пассажиров предлагается использовать «модели сетевой близости» [11], для анализа и оценки таких маршрутов – методы нечёткой кластеризации

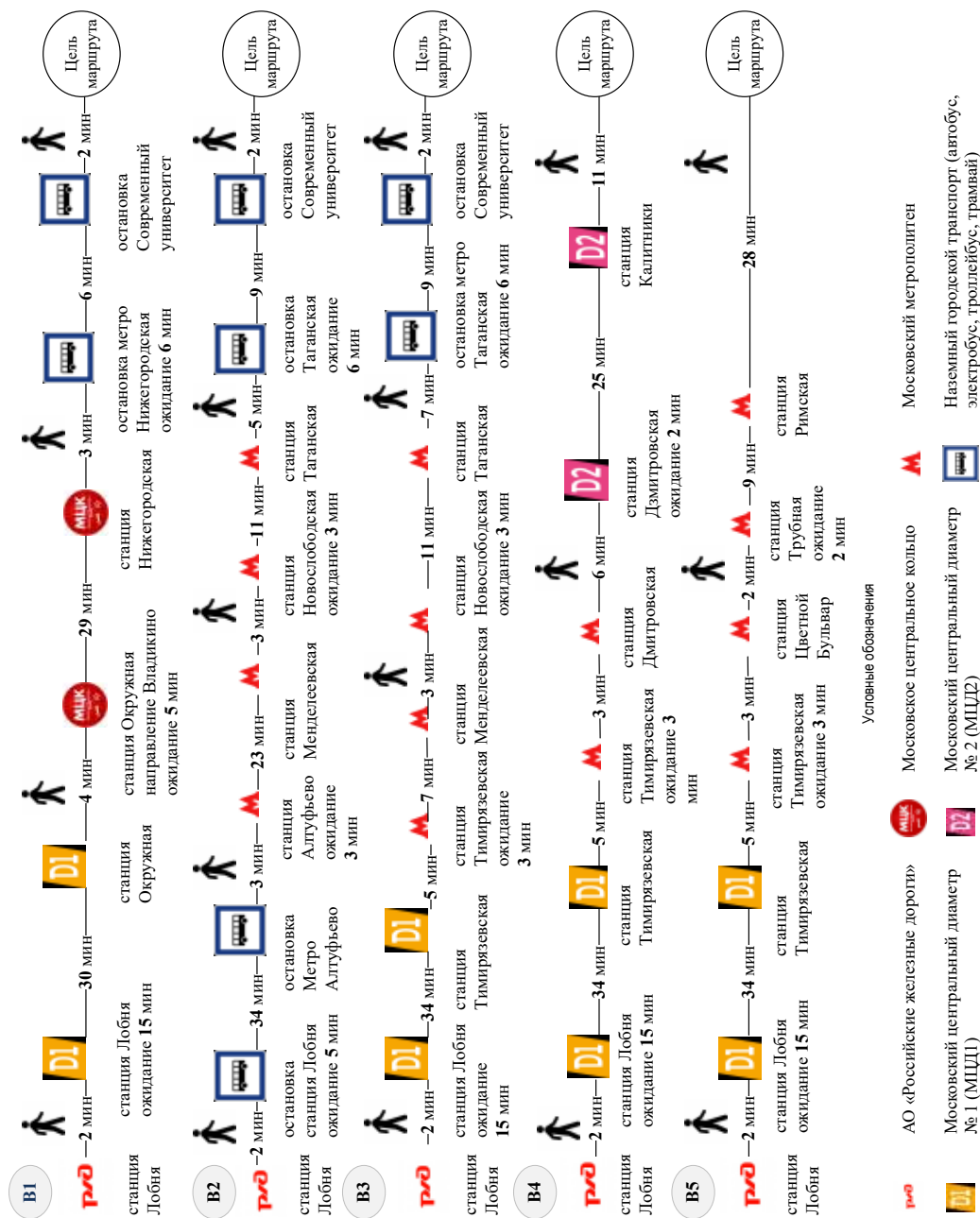


Рис. 3. Структура альтернативных вариантов маршрута ПОТ [составлено авторами].

и индекс удовлетворённости пользователей услугами общественного транспорта [13].

В качестве инструмента исследования, на наш взгляд, наилучшим образом подходят продукты визуального анализа данных (например, [14]).

Принципиальным отличием предлагаемого в статье подхода к исследованию и оценке качества полного маршрута ПОТ является фокусирование внимания на известной оценке уровня обслуживания пассажира

«Level of Service, LOS» [15], обозначающей уровень качества транспортных услуг и используемой для классификации транспортных потоков организациями, занимающимися городским транспортным планированием, а именно на комплексной оценке качества. Если в известной концепции качество транспортных систем ассоциируется с её способностью обеспечивать безопасное и надёжное обслуживание своих пассажиров, то в предлагаемой оценке затрагивает не только сис-



Таблица 1

Количественные оценки параметров исследуемых маршрутов

Критерии оценки	Номера альтернативных вариантов маршрутов				
	B1	B2	B3	B4	B5
Результативность (время в пути, ч)	1,42	1,49	1,47	1,46	1,43
Сложность маршрута (число пересадок)	2	3	3	2	2
Цена/стоимость услуги, руб.	МЦД1 52/50 +МЦК +автобус 46/42	МЦД1 52/50 +автобус 46/42	МЦД1 78/50 +метро +автобус 46/42	МЦД1 78/50 +метро +МЦД2 46/42	МЦД1 78/50 +метро
Индекс качества ОТ на маршруте	8	6	7	9	7

Источник: Составлено авторами.

темы обслуживания ПОТ, но и состояние (качество) элементов городской среды, задействованной на маршруте пользователя и добавляющей ценность дополнительного сервиса в виде варианта мультимодальной перевозки на общественном транспорте.

В качестве примера нами были рассмотрены комбинированные маршруты московского мегаполиса, в которых задействованы московские центральные диаметры № 1 (МЦД1), № 2 (МЦД2) и центральное кольцо (МЦК) с включенными пешими участками маршрута ПОТ, а также линии московского метрополитена и городского наземного транс-

порта. Рассматривались сложные для анализа и оценки пользователем варианты, состоящие не менее чем из пяти альтернативных маршрутов, близких по значению показателя результативности. Основные характеристики исследуемых комбинированных маршрутов ПОТ схематично представлены на рис. 3.

В табл. 1 представлены оценки рассматриваемых вариантов маршрутов. Значения индекса качества, отражённые в табл. 1, были получены нами по результатам проведённых в 2020 году исследований по вопросу оценки качества транспортной инфраструктуры и перевозки.

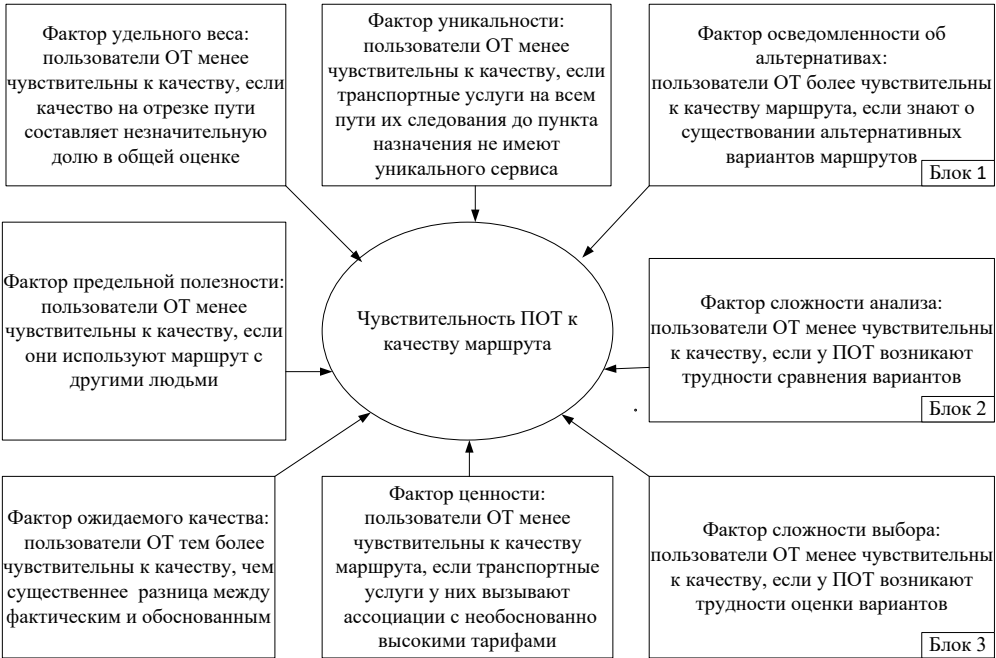


Рис. 4. Модель определения поведенческих профилей ПОТ по приоритету «качество ОТ» [составлено авторами].

В эксперименте принимало участие 500 ПОТ, выбранных случайным образом. Оценка проводилась по десятибалльной шкале.

Результаты исследования подтвердили нашу гипотезу, что выбор маршрута не всегда определяет минимальное время в пути и стоимость проезда. 41 % респондентов отдали предпочтение четвертому варианту, у которого индекс качества максимальный (девять баллов).

Экономическая оценка результативности множества возможных маршрутов, которые могут быть сформированы с использованием МЦД1, МЦД2, схематично представлена в табл. 2.

Столбцы в таблице 2 обозначают станции отправления, строки – станции прибытия, на пересечении строк и столбцов – значения эффектов по соответствующим маршрутам (рублей в год), черные клетки означают невозможность построения маршрута.

Для экономической оценки результативности транспортного маршрута были использованы данные ОАО «РЖД» 2020 года о прохождении в первой половине дня пассажиров на обозначенные в таблице 1 железнодорожные станции, а также методические положения [16], в соответствии с которыми считается, что каждый час времени, сэкономленный в ожидании электропоезда, может быть потрачен пассажиром на работу, образование или досуг. При этом мы допускаем, что полезность единицы времени равносильна во всех трёх сферах её применения. Таким образом, оценка социально-экономического эффекта, в нашем случае, будет сводиться к вычислению дополнительного потенциального дохода, вызванного экономией времени [17].

Результаты проведённых нами исследований качества маршрутов московской агломерации среди пассажиров пригородных станций в рассматриваемых направлениях движения показали, что имело место смещение приоритетов ПОТ. Зафиксирован рост числа ПОТ, отдающих предпочтение вариантам сложных, комбинированных маршрутов с лучшими характеристиками сервиса, комфорта и качества элементов транспортной инфраструктуры, маршрутных сетей мегаполиса: с 51 % в 2019 году до 67 % – в 2020 году (при условии непревышения разницы во времени движения по маршруту в десять минут). Опросом были охвачены 2000 чел.

Предлагается спецификацию течений в структуре пассажиропотока на длинных

комбинированных маршрутах осуществлять на основе факторов, влияющих на поведение ПОТ конкретного профиля, представленных на рис. 4.

Сложность создания адекватного реальным условиям механизма удовлетворения структурированного спроса на услуги общественного транспорта формируют категории ПОТ, не выбирающие традиционный маршрут (приверженцы), а никак не планирующие его и формирующие его случайным образом. В этом контексте проведение исследований в части осведомлённости, выявления сложностей с анализом и оценкой со стороны ПОТ является актуальной задачей. Знание о том, какая доля ПОТ обладает информацией об альтернативных маршрутах (блок 1, рис. 4), испытывает трудности с планированием маршрута передвижения, определением его структурных характеристик и желаемых параметров качества (блок 2, рис. 4), а также с определением критериев комплексной оценки общественного транспорта на маршруте (блок 3, рис. 4) является необходимым для построения таких поведенческих моделей.

ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты настоящей работы наталкивают нас на ряд дискуссионных вопросов и выводов.

- Принимая во внимание мировую тенденцию цифровизации всех сфер и областей деятельности, можно предположить перспективность проведения глубоких исследований по реальным предпочтениям, выбору вариантов и реализации пользовательских маршрутов, а также построения типовых поведенческих моделей потребителей услуг ОТ. Разработанные модели и алгоритмы идентификации профильных течений пассажиропотоков на основе данных сотовых операторов позволяют утвердительно ответить на вопрос о возможности использования при анализе и оценке предпочтений и приемлемых характеристик качества ОТ цифровых следов перемещений ПОТ.

- Не все пользователи могут правильно формулировать свои предпочтения. Результаты исследований показывают, что в процессе принятия решения окончательный выбор не всегда делается в пользу того варианта маршрута, который был построен по первоначально заданным индивидом параметрам





Таблица 2
Матрица величин результативности ОТ на комбинированных маршрутах ЦОТ с маятниковой миграцией
(схема железнодорожный транспорт-метрополитен)

ПОДОВОЙ ЭФФЕКТ	ОТРАДНОЕ	ОДИНЦОВО	БАКОВКА	ТРЕХГОРКА	НЕМЧИНОВКА	СЕТУНЬ	РАБОЧИЙ ПОСЕЛОК	КУНЦЕВО 1	СЛАВЯНСКИЙ БУЛЬВАР	ФИЛИ	ТЕСТОВСКАЯ	БЕГОВАЯ	МОСКВА БЕЛОРУССКАЯ	МОСКВА САВЕЛОВСКАЯ	ТИМИРЯЗЕВСКАЯ	ОКРУЖНАЯ	ДЕГУНИНО	БЕСКУДНИКОВО	ЛИАНОЗОВО	МАРК	НОВОДАЧНАЯ	ДОЛГОПРУДНАЯ
ОТРАДНОЕ		-115 869	299 148	-31 133	1 098 863	1 703 657	1 063 398	-305 375	0	-1 331 955	50 844	580 340	-680 055	2 841 399	239 649	88 159	334 872	378 235	469 342	16 755	11 888	239 363
ОДИНЦОВО	-136 444		-4 648	8 421	-7 146	-12 598	389 740	-1 317 994	13 211 648	-87 955	-244 552	86 686	-7 748 783	2 776 959	229 639	25 222	134 860	297 008	338 066	7 134	17 009	201 636
БАКОВКА	350 512	-42 539		-4 955	69 957	57 006	109 043	-249 953	1 517 165	344 189	-75 176	125 215	-384 218	358 077	24 771	6 545	26 745	34 906	39 965	0	1 376	23 617
ТРЕГОРКА	-24 365	-4 953	-204		1 131	119 076	30 297	-489 116	3 674 799	1 596 004	-138 793	908 938	1 004 592	500 066	33 107	4 204	42 213	38 754	62 477	6 614	160	73 259
НЕМЧИНОВКА	640 776	5 664	77 370	2 645		-5 199	8 872	-179 606	758 632	235 297	3 027	31 506	-265 530	74 456	10 721	1 680	6 305	12 738	13 919	0	4 478	18 654
СЕТУНЬ	1 573 478	58 502	67 874	112 055	-4 270		15 756	1 095 537	14 968 659	19 617 588	-623 280	5 133 272	12 575 299	3 589 589	524 412	429 630	464 073	726 741	693 199	110 864	1 950	238 187
РАБОЧИЙ ПОСЕЛОК	961 614	366 178	73 666	40 559	10 575	731		140 055	2 553 619	2 565 540	-970 851	-51 693	2 202 528	1 640 120	251 440	163 199	197 893	359 626	278 850	54 479	4 995	74 602
КУНЦЕВО 1	-196 545	-1 088 338	-142 760	-387 808	-59 760	735 040	174 143		-320 136	-6 777 164	-788 169	18 367 964	1 107 030	6 332 823	606 203	1 157 098	598 257	886 402	745 541	168 465	29 363	137 165
СЛАВЯНСКИЙ БУЛЬВАР	0	3 044 868	421 782	836 081	217 630	3 918 985	746 572	-269 511		29 374 311	7 421 274	55 274 601	15 591 290	21 163 257	5 620 257	4 539 993	2 506 931	3 239 611	2 685 762	632 606	122 341	307 923
ФИЛИ	-1 221 500	-2 105 461	207 750	987 276	79 015	9 509 443	4 190 407	-10 789 128	27 752 639		-903 134	27 933 060	4 799 858	8 047 054	2 073 230	396 279	1 424 555	2 010 598	1 728 114	402 676	77 683	690 527
ТЕСТОВСКАЯ	-18 951	596 186	146 161	90 086	6 336	538 888	499 674	-799 406	6 890 531	-1 436 824		14 686 180	20 491 229	7 650 490	2 476 948	-1 660	1 331 274	2 613 123	2 347 499	745 087	134 317	366 641
БЕГОВАЯ	3 039 611	4 222 829	674 389	2 354 473	89 203	4 218 897	2 414 851	14 763 610	45 688 616	23 646 103	23 091 711		19 451 283	46 868 057		-791 600	6 259 448	6 274 625	7 342 359	4 422 309	1 901 230	730 739
МОСКВА БЕЛОРУССКАЯ	-599 921	-7 520 205	-286 763	-142 958	-345 020	5 491 279	4 405 263	943 012	17 020 275	4 538 388	18 852 258	21 354 233		0	4 563 363	6 259 448	6 274 625	7 342 359	4 422 309	1 901 230	730 739	5 806 504
МОСКВА САВЕЛОВСКАЯ	12 056 301	12 961 026	1 755 799	2 140 223	243 553	9 121 305	8 431 949	5 926 389	21 434 135	8 218 817	6 255 859	43 626 174	408 539			4 563 363	6 259 448	6 274 625	7 342 359	4 422 309	1 901 230	730 739
ТИМИРЯЗЕВСКАЯ	881 068	1 022 465	103 044	66 951	19 084	1 733 404	1 753 025	693 991	6 517 178	2 454 988	1 209 483	10 931 775	-975 580	3 386 088		4 938 893	4 664 547	2 865 024	3 490 161	1 105 673	138 181	1 196 194
ОКРУЖНАЯ	89 622	46 438	5 691	2 600	1 629	284 283	400 376	1 427 930	4 956 655	740 330	-6 919	3 160 673	2 653 319	5 013 801	526 949	3 861 086	52 127					
ДЕГУНИНО	502 331	238 036	54 377	77 555	6 636	583 081	430 376	467 340	2 635 224	1 446 206	208 991	2 653 319	5 013 801	526 949	3 861 086	52 127						
БЕСКУДНИКОВО	490 417	422 735	46 998	62 574	13 979	836 734	670 864	889 066	3 338 582	2 323 038	584 661	3 393 333	5 988 000	518 641	2 743 653	786 000	42 446					
ЛИАНОЗОВО	614 183	556 792	42 828	86 720	22 652	823 078	572 161	670 538	2 757 988	1 688 373	332 085	2 120 520	3 359 790	227 031	3 321 164	1 574 824	836 409	63 869		25 090	62 374	1 019 128
МАРК	39 042	31 614	3 677	6 065	784	179 222	80 413	167 383	751 824	474 488	116 168	749 132	1 764 612	-56 001	1 480 304	811 515	103 919	104 459	-1 868		-3 196	119 822
НОВОДАЧНАЯ	18 646	12 797	0	8 912	3 565	65	15 160	7 350	36 651	19 066	3 405	74 002	86 673	-190 264	-45 961	115 644	-3 251	-7 612	41 384	797		17 877
ДОЛГОПРУДНАЯ	338 004	309 332	23 227	85 183	4 395	255 043	140 227	140 306	364 045	740 308	112 144	643 783	1 120 541	-335 898	1 667 810	1 428 096	237 267	409 434	755 669	144 796		

Источник: Составлено авторами.

и критериям. Вывод – методы опроса не так эффективны для совершенствования систем управления движением и транспортным обслуживанием населения. Реализованные маршруты дают более точную картину предпочтений и отношения к качеству ОТ.

- Не все ПОТ по факту перемещения выбирают рациональный маршрут передвижения. Вывод – выделение рационального потока пассажиров на комбинированном транспортном маршруте, оценка его мощности и чувствительности на ценовые, сервисные и организационные меры позволит разработать действенный механизм управления движением отдельных течений людских потоков в мегаполисе, а также определить узкие места в системе организации движения и транспортного обслуживания.

- К новым сервисам необходимо отнести предложения маршрутов для различных профилей ПОТ с более «качественными» характеристиками элементов инфраструктуры ОТ в допустимых диапазонах превышения времени в пути следования и стоимости проезда, которые бы учитывали желание и способность ПОТ самостоятельно проводить многопараметрический анализ и многокритериальную оценку вариантов маршрутов с наилучшими для него характеристиками.

ВЫВОДЫ

Результаты проведенных нами исследований показывают, что доля мультимодальных перевозок по комбинированным маршрутам ПОТ с использованием железнодорожного транспорта и городского общественного транспорта в маятниковых схемах миграции населения высока. При этом наблюдаются резервы для оптимизации нагрузки на отдельных участках транспортной сети мегаполиса за счёт изменения направления движения течений пассажиропотоков, идентифицированных по поведенческим профилям ПОТ.

Для формирования поведенческого профиля ПОТ предлагается использовать принцип предпочтительности не только по известным параметрам маршрута (вид транспорта, допустимое количество пересадок, максимальное время ожидания транспортного средства, время прохождения пешеходных участков и др.), но и по параметрам качества элементов инфраструктуры общественного транспорта, задействованных на маршруте.

Спецификация профильных течений пассажиропотока осуществляется на основе модели сетевой близости и комплексной оценки качества маршрута, которая затрагивает не только его структуру и результативность с позиции экономии времени и денег, но и удобство, и «современность».

Также нами была выявлена тенденция в г. Москве по изменению предпочтения ПОТ в процессе выбора варианта маршрута, с первоначального планируемого более экономного по времени на вариант маршрута с лучшими показателями качества, но более продолжительного по времени движения (при приблизительном равенстве общей стоимости проезда).

Анализ и оценка чувствительности связанных потоков пешеходов и пассажиров в границах длинных комбинированных маршрутов к изменению параметров качества элементов инфраструктуры общественного транспорта позволяют предложить населению новый сервис [18], продукт логистики мультимодальных, пассажирских перевозок – варианты маршрутов для конкретных поведенческих профилей ПОТ.

Введение понятия «пользователь общественным транспортом» с переменным статусом позволяет решить проблему несогласованности решений в мультиагентной системе, объединить соответствующую аналитику в многослойной экосистеме транспорта, увязать оценки качества улично-дорожной сети, маршрутной сети, транспортного средства, перевозки по маршруту и сервисов, конкретного индивида или конкретной группы людей в рамках одного поведенческого профиля.

Интересными становятся также исследования по выбору маршрутов движения на общественном транспорте и оценка их качества людьми, имеющими личное транспортное средство, в том числе в регионах и странах, имеющих высокий уровень автомобилизации в расчете на 1000 жителей, например, в США и ЕС (в 2022 году оценивался в более 850 и 560 автомобилей соответственно).

В целом, понимание логики формирования маршрута и выбора варианта передвижения людей по территории мегаполиса оказывает непосредственное влияние на загруженность отдельных участков транспортных линий и эффективность работы



общественного транспорта, позволяет разработать обоснованные планы необходимых изменений в транспортных системах и комплексах, учитывающие специфику текущего и прогнозируемого поведения пользователей транспортных услуг в конкретном регионе. Это касается также и программ развития общественного транспорта, в которых определяются первоочередные объекты для транспортного строительства и реконструкции транспортных линий и узлов. В этом контексте актуальны более глубокие исследования, которые будут опираться на использование современных технологий машинного обучения в реальном времени для сложной агентной модели принятия решений в городах [19].

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Sztangret, I. Systemic Sustainable Development in the Transport Service Sector. *Sustainability*, 2020, 12 (22), 9525. DOI: 10.3390/su12229525.
2. Barter, P. A. Public Planning with Business Delivery of Excellent Urban Public Transport. *Policy and Society*, 2008, Vol. 27, Iss. 2, pp. 103–114. DOI: 10.1016/j.polsoc.2008.09.007.
3. Van Lierop, D., Badami, M. G., El-Geneidy, A. M. What influences satisfaction and loyalty in public transport? A review of the literature. *Transport Reviews*, 2018, 38 (1), pp. 52–72. DOI: 10.1080/01441647.2017.1298683.
4. Milovanović, A., Lekić, O. Z. Indicators of Sustainable Development and the Urban Sustainability. In: *Sustainability and Resilience Socio-Spatial Perspective*, TU Delft Open, 2018, pp. 103–124. [Электронный ресурс]: https://www.researchgate.net/publication/328320057_Indicators_of_Sustainable_Development_and_the_Urban_Sustainability. Доступ 21.11.2023.
5. Litman, T. The Future is not what it Used to Be: Changing Travel Demands and their Implications for Transport Planning. *Victoria Transport Policy Institute*. [Электронный ресурс]: <https://www.vtpi.org/future.pdf>. Доступ 21.11.2023.
6. Litman, T. Evaluating Public Transit Benefits and Costs. *Victoria Transport Policy Institute*. [Электронный ресурс]: <https://www.vtpi.org/tranben.pdf>. Доступ 21.11.2023.
7. Mouter, N., Chorus, C. Value of time – A citizen perspective. *Transportation Research, Part A*, 2016, Vol. 91 (C), pp. 317–329. DOI: 10.1016/j.tra.2016.02.014.
8. Molin, E., Adjenughwure, K., De Bruyn, M., Cats, O., Warffemius, P. Does conducting activities while traveling reduce the value of time? Evidence from a within-subjects designed choice experiment. Presentation at the International Transport Forum (ITF) Roundtable on Zero Value of Time. ITF Roundtable Reports, 2019, Vol. 132 (2), pp. 18–29, Paris, France: OECD Publishing. DOI: 10.1016/j.tra.2019.10.017.
9. Crozet, Y., Mercier, A. Urban Toll: Rethinking Acceptability Through Accessibility. *International Transport Forum Discussion Papers*, 2018, No. 2018–16, OECD Publishing, Paris. DOI: <https://doi.org/10.1787/af22477a-en>.
10. Sidorchuk, R., Efimova, D., Lopatinskaya, I., Kaderova V. Parametric Approach to the Assessment of Service Quality Attributes of Municipal Passenger Transport in Moscow. *Modern Applied Science*, 2015, Vol. 9, Iss. 4, pp. 303–311. DOI: <http://dx.doi.org/10.5539/mas.v9n4p303>.
11. Намиот Д. Е., Покусаев О. Н., Чекмарев А. Е. Модели сетевой близости в информационных системах на транспорте. *International Journal of Open Information Technologies*, 2020, Vol. 8, № 9, pp. 53–58. EDN: PDQDEW.
12. Leviäkangas, P., Öörni, R. From business models to value networks and business ecosystems – What does it mean for the economics and governance of the transport system? *Utilities Policy*, 2020, Vol. 64, 101046. DOI: 10.1016/j.jup.2020.101046.
13. Vicente, P., Suleman, A., Reis, E. Index of Satisfaction with Public Transport: A Fuzzy Clustering Approach. *Sustainability*, 2020, 12 (22), 9759. DOI: <https://doi.org/10.3390/su12229759>.
14. Медведев С. А., Намиот Д. Е. Визуальный анализ данных пассажиропотока железнодорожного транспорта. *International Journal of Open Information Technologies*, 2021, Vol. 9, Iss. 6, pp. 51–60. [Электронный ресурс]: <http://injoit.org/index.php/j1/article/view/1113>. Доступ 23.11.2023.
15. Kittelson, W. K. Historical Overview of the Committee on Highway Capacity and Quality of Service. In: *Transportation Research Circular E-C018: 4th International Symposium on Highway Capacity*. Proceedings. June 27–July 1, 2000, Maui, Hawaii. Transportation Research Board. National Research Council. Ed. Werner Brilon. [Электронный ресурс]: <https://trid.trb.org/view/657327>. Доступ 23.11.2023.
16. Worsley, T., Leung, J. What is the Value of Saving Travel Time? Summary and Conclusions. *International Transport Forum*, 2019, pp. 12–15. Paris, France. [Электронный ресурс]: <https://www.itf-oecd.org/sites/default/files/docs/value-saving-travel-time.pdf>. Доступ 23.11.2023.
17. Adjenughwure, K. The Monetary value of a pleasant and productive train trip. Master Thesis, Delft University of Technology. 2017. [Электронный ресурс]: <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:fec31781-e374-4eb4-9e8a-02064fca0c63?collection=education>. Доступ 23.11.2023.
18. Esztergár-Kiss, D., Kerényi, T. Creation of mobility packages based on the MaaS concept. *Travel Behavior and Society*, 2020, Vol. 21, pp. 307–317. DOI: 10.1016/j.tbs.2019.05.007.
19. Yan Zhang, Grignard, A., Lyons, K., Aubuchon, A., Larson, K. Real-time Machine Learning Prediction of an Agent-Based Model for Urban Decision-making (Extended Abstract). Proceedings from AAMAS '18: 17th International Conference on Autonomous Agents and MultiAgent Systems, 2018, pp. 2171–2173. [Электронный ресурс]: <https://ifaamas.org/Proceedings/aamas2018/pdfs/p2171.pdf>. Доступ 23.11.2023.

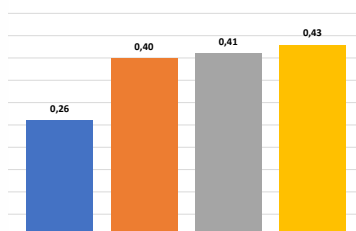
Информация об авторах:

Бубнова Галина Викторовна – доктор экономических наук, профессор кафедры экономики, организации производства и менеджмента, заместитель директора Научно-образовательного центра «Цифровые высокоскоростные транспортные системы» (НОЦ ЦВТС) Российского университета транспорта, Москва, Россия, Bubisek@mail.ru.

Покусаев Олег Николаевич – кандидат экономических наук, доцент, директор Российской открытой академии транспорта Российского университета транспорта, Москва, Россия, oleg@pokusaev.com.

Акимов Андрей Валерьевич – генеральный директор ООО Аэроэкспресс, Москва, Россия, akimov_post@mail.ru.

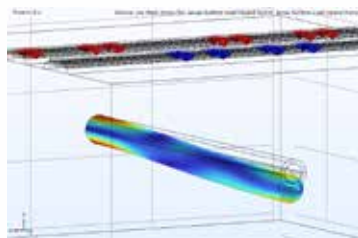
Статья поступила в редакцию 11.11.2023, одобрена после рецензирования 27.12.2023, принята к публикации 29.12.2023.



ПУТЬ

34

Использование вяжущих материалов для подбалластного слоя.



ВСМ

72

Заглубленные сооружения:
воздействие подвижного состава.

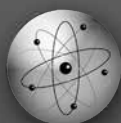


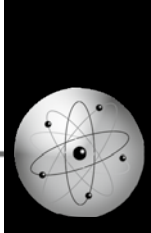
ПОДВИЖНОЙ
СОСТАВ

40, 48,
60, 65

Рессорное подвешивание локомотива.
Унификация бортовых тяговых накопителей энергии.
Асинхронный тяговый электродвигатель с наклонными пазами ротора.
Ремонт колесных пар пассажирских вагонов: преимущества цифровизации.

НАУКА И ТЕХНИКА





НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 625.141:625.06:620.172.24

DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-6-4>

Лабораторные исследования материала подбалластного защитного слоя с применением вяжущих материалов



Кирилл ДОРОШЕНКО



Евгений АШПИЗ



Вячеслав КОРОСТЕЛЕВ

Кирилл Андреевич Дорошенко ¹, Евгений Самуилович Ашпиз ², Вячеслав Александрович Коростелев ³

^{1, 2}Российский университет транспорта, Москва, Россия.

³ООО «Комкор», Краснодар, Россия.

¹ ORCID 0009-0000-1536-5959.

² ORCID 0000-0003-1334-2117; РИНЦ SPIN-код: 5412-7662.

✉ ¹ inozrelez@mail.ru.

АННОТАЦИЯ

Важность усиления земляного полотна и в особенности его основной площадки обусловлена увеличением осевой нагрузки поездов.

В статье приведен анализ результатов исследований прочностных и деформационных характеристик материала старогоднего балласта при его мелиорации вяжущими материалами с добавками полимерных стабилизаторов с целью оценки применимости технологии закрепления грунтов при устройстве подбалластного защитного слоя.

В лаборатории получены зависимости прочности на одноосное сжатие и растяжение при изгибе в зависимости от процентного содержания портландцемента и полимерного стабилизатора, а также оценено снижение характеристик материала при воздействии агрессивной среды.

По результатам испытаний был подобран оптимальный состав цемента и стабилизатора для определенного гранулометрического состава подбалластного защитного слоя. Выявлены основные преимущества применения стабилизаторов грунта в сравнении с образцами с применением только цемента.

Ключевые слова: железнодорожный транспорт, подбалластный защитный слой, модуль деформации, вяжущие материалы, стабилизаторы, штамповые испытания, элементарные образцы.

Для цитирования: Дорошенко К. А., Ашпиз Е. С., Коростелев В. А. Лабораторные исследования материала подбалластного защитного слоя с применением вяжущих материалов // Мир транспорта. 2023. Т. 21. № 6 (109). С. 34–39. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-6-4>.

Полный текст статьи на английском языке публикуется во второй части данного выпуска.

The full text of the article in English is published in the second part of the issue.

ВВЕДЕНИЕ

Один из ключевых подходов к решению задач роста эффективности железнодорожного транспорта за счёт увеличения объёмов и скорости доставки грузов связан с внедрением поездов с повышенными осевыми нагрузками, на сети Российских железных дорог – до 27 тс. Это в свою очередь должно обеспечиваться стабильностью положения рельсовой колеи, зависящей от состояния земляного полотна. Учитывая, что во многих случаях оно было сооружено более ста лет назад и рассчитано под значительно меньшие нагрузки, повышение их может вызвать деформации земляного полотна в местах его недостаточной несущей способности. Важным поэтому является усиление земляного полотна, и, в первую очередь, его основной площадки.

Существующие технологии усиления основной площадки земляного полотна при выполнении работ по реконструкции или капитальном ремонте пути, зарекомендовавшие себя положительно в России и за рубежом, предполагают устройство подбалластного защитного слоя (ПЗС) из щебеночно-песчано-гравийных смесей (далее – ЩПГС), благодаря чему достигается повышение стабильности пути [1–6]. Достоинством данной технологии является возможность выполнения её без снятия рельсошпальной решетки в ходе выполнения работ по глубокой очистке балласта. Однако широкое внедрение данной технологии сдерживается рядом следующих факторов:

- большой толщиной ПЗС, которая приводит к замедлению темпов производства работ в технологические «окна» и возрастанию стоимости;
- высокой стоимостью материала ЩПГС;
- необходимостью доставки смеси ЩПГС на место производства работ.

Для уменьшения толщины ПЗС с обеспечением его требуемых характеристик по усилению применяют армирование георешетками. Возможность уменьшения толщины ПЗС при применении георешеток обоснована научными исследованиями [5; 6] и закреплена в нормативном документе в России¹. Но

необходимость доставки нового материала ЩПГС и связанные с этим недостатки все равно остаются, поэтому одним из перспективных вариантов для устройства ПЗС является применение местных материалов, в качестве которых может выступать накопленная толща балластных материалов. Однако, в соответствии с проведенными в РУТ (МИИТ) исследованиями², модуль деформации самой смеси старых балластных материалов составляет не более 65 МПа, и, следовательно, достичь величины модуля деформации по верху ПЗС выше этого значения невозможно. По данным [2], для обеспечения требуемой согласно¹ величины модуля деформации на уровне основной площадки земляного полотна 80 МПа, модуль деформации материала ПЗС должен составлять порядка 150–200 МПа.

В связи с этим предлагается рассмотреть возможность устройства ПЗС из старогодных балластных материалов, получаемых в ходе их очистки с улучшением их характеристик до требуемых величин обработкой вяжущими материалами с добавкой полимерного стабилизатора. Такая технология позволит сократить время выполнения работ за счет исключения операций вывоза слоя балласта и отсутствия необходимости в доставке кондиционных материалов ЩПГС, а также сокращения толщины самого ПЗС.

В настоящее время в автодорожном строительстве распространено применение добавок цемента и полимерно-минеральных композиций для усиления основной площадки и оснований [7; 8], что согласно исследованиям [9] позволяет:

- уменьшить толщину конструктивного слоя;
- сократить расход материалов и время на производство и доставку материалов;
- применять отходы производства вместо их утилизации.

Применение стабилизаторов обусловлено увеличением трещиностойкости конструкции и стойкости к воздействию агрессивных сред [10].

¹ Инструкция по устройству подбалластных защитных слоев при реконструкции (модернизации) железнодорожного пути, утвержденная распоряжением ОАО «РЖД» от 12.12.2012 № 2544р. [Электронный ресурс]: <https://base.garant.ru/406652845/>. Доступ 23.12.2023.

² Технические условия к материалу защитного слоя с использованием продуктов от вырезки старого балласта щебнеочистительными комплексами, научно-технический отчет. Этап № 1 «Результаты лабораторных испытаний». Руководитель темы Ашпиз Е.С. – М.: МИИТ 2021. – 111 с.





Рис. 1. Обойма для изготовления образцов [фото авторов].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Целью данной работы являлся подбор в лабораторных условиях количества портландцемента и добавок стабилизатора в материал продуктов от очистки старогоднего балласта, позволяющего получить требуемые для материала ПЗС деформационные характеристики.

Исходный материал ПЗС для лабораторных исследований был взят из продуктов от очистки балласта, полученных на Московской железной дороге и использовавшихся ранее в проведенных в РУТ (МИИТ) исследованиях². Гранулометрический состав данного материала приведен в табл. 1.

В данный материал добавлялось разное количество портландцемента и полимерных стабилизаторов и изготавливались образцы для лабораторных испытаний по определению модуля деформации в зависимости от его состава.

Для оценки влияния воздействия влажности на прочностные свойства материала также были запланированы его испытания после водопоглощения.

МЕТОДИКА ИСПЫТАНИЙ

Испытания выполнялись в два этапа. На первом этапе подбиралось количество цемента для материала с выбранным гранулометрическим составом (см. табл. 1). Для подбора количества цемента изготавливались элементарные образцы, представляющие собой цилиндр высотой 60 мм и диаметром 101 мм. Образцы смешивались с 2 %, 3 % и 4 % портландцемента от массы грунта и с водой до достижения оптимальной влажности. Далее

Таблица 1
Гранулометрический состав материала ПЗС для изготовления образцов

Фракция, мм	Процентное содержание
25–30	2,04
20–25	18,57
12,5–20	18,57
10–12,5	6,40
7,5–10	9,13
5–7,5	7,24
2,5–5	8,43
1,25–2,5	4,52
1–1,25	0,72
0,63–1	9,56
0,315–0,63	7,15
0,16–0,315	5,99
< 0,16	1,69

смесь укладывалась в специальную обойму (рис. 1), где подвергалась вибрационному воздействию на вибростоле для лучшего заполнения пустот, образовавшихся в процессе укладки, после чего смесь уплотнялась на прессе под нагрузкой 24 т. После уплотнения образцы выпрессовывались из обоймы и оставлялись для набора прочности в течение семи суток. Суммарно было изготовлено 18 образцов – по шесть на каждое процентное содержание цемента. После набора прочности образцы испытывались на сжатие для определения модуля деформации материала закрепляемого подбалластного защитного слоя, в том числе после водопоглощения, по методике³, моделируя укладку подбалластного защитного слоя в сухую погоду и в условиях повышенной влажности. Состав, показавший наиболее оптимальные характеристики, принимался для дальнейших исследований по подбору стабилизатора.

На втором этапе при подобранном содержании цемента определялось рациональное содержание стабилизатора, в качестве которого была выбрана добавка «Nicoфлок», позволяющая вести дальнейшие работы (например, балластировку пути) сразу после уплотнения смеси, что минимизирует время на укладку защитного слоя.

«Nicoфлок» относится к группе редиспергируемых полимерных порошков (РПП), которые придают материалам на минеральной основе большую ударную прочность, сни-

³ ГОСТ 10180-2012 Бетоны. Метод определения прочности по контрольным образцам. – М.: Стандартинформ, 2018. – 31 с. [Электронный источник]: <https://docs.cntd.ru/document/1200100908>. Доступ 23.12.2023.

Таблица 2

Матрица испытаний по подбору содержания стабилизатора

Вид образца*)	Вид испытания	Количество образцов, шт.	Возраст испытуемых образцов, сут.	Определяемые характеристики
Контрольные 0 % стабилизатора	Прочность на сжатие	9	7, 14, 28	Модуль деформации материала, МПа
	Прочность на растяжение при расколе	3	7	Прочность при расколе, МПа
5 % стабилизатора	Прочность на сжатие	9	7, 14, 28	Модуль деформации материала, МПа
	Прочность на растяжение при расколе	3	7	Прочность при расколе, МПа
	Прочность на сжатие в водонасыщенном состоянии	6	7	Модуль деформации материала, МПа
7 % стабилизатора	Прочность на сжатие	9	7, 14, 28	Модуль деформации материала, МПа
	Прочность на растяжение при расколе	3	7	Прочность при расколе, МПа
	Прочность на сжатие в водонасыщенном состоянии	6	7	Модуль деформации материала, МПа
10 % стабилизатора	Прочность на сжатие	9	7, 14, 28	Модуль деформации материала, МПа
	Прочность на растяжение при расколе	3	7	Прочность при расколе, МПа
	Прочность на сжатие в водонасыщенном состоянии	6	7	Модуль деформации материала, МПа

*) % стабилизатора определяется от количества цемента.

жают хрупкость материала и увеличивают стойкость к агрессивным средам, замедляют сроки схватывания. Химический состав стабилизатора «NicoFloK» представлен следующими компонентами: активированный кремнезем – 40 %, соли кальция – 15 %, соли натрия – 15 %, полимеры на основе лигнинов – 30 % [11].

Для исследования влияния стабилизатора на характеристики материала ПЗС были изготовлены аналогичные образцы с подобранным составом цемента, а также с 5 %, 7 % и 10 % содержания ПМК «NicoFloK» от общей массы цемента (0,15 %, 0,21 %, 0,3 % от массы грунта). Согласно техническим условиям на стабилизатор⁴, не рекомендовано применение более 10 % добавки от массовой доли цемента. Выбор процентного содержания стабилизатора определялся параметрами на сжатие в сухом и водонасыщенном состоянии и прочности на растяжение при расколе по методике², исходя из оценки влияния стабилизатора на деформационные характери-

⁴ СТО 13881083.002-2021 Полимерно-минеральная добавка NicoFloK для смесей с неорганическим вяжущим. Технические условия. – СПб.: Никель, 2021. – 30 с.

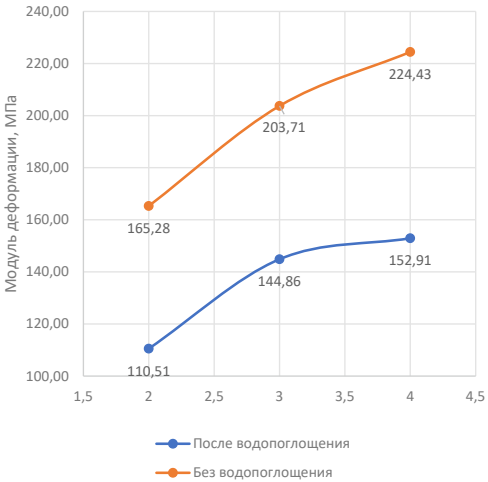


Рис. 2. Зависимость модуля деформации от количества цемента [выполнено авторами].

стики и трещиностойкость материала ПЗС. Матрица выполненных испытаний представлена в табл. 2.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

Результаты испытаний образцов с добавками портландцемента в сухом и водонасыщенном состоянии приведены на рис. 2.



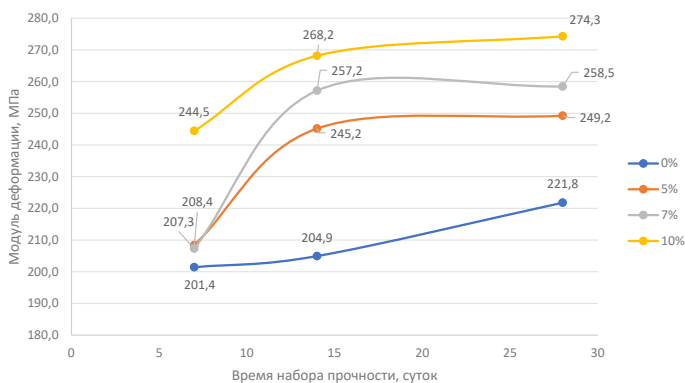


Рис. 3. Зависимость модуля деформации от процентного содержания ПМК «Nicoflo» [выполнено авторами].

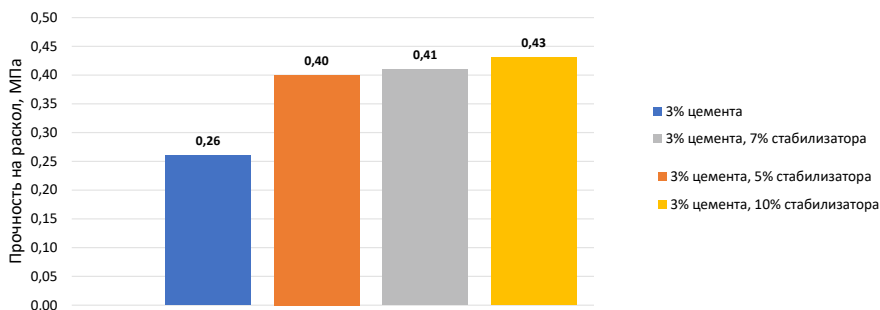


Рис. 4. Результаты испытаний по прочности на раскол в зависимости от процентного содержания ПМК «Nicoflo» [выполнено авторами].

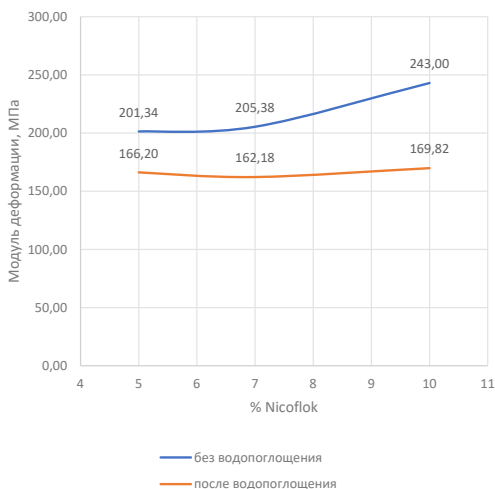


Рис. 5. Результаты испытаний на сжатие образцов с ПМК «Nicoflo» с и без водопоглощения [выполнено авторами].

Анализ данных, представленных на рис. 2, показывает, что при содержании в образце 2 % цемента состав по модулю деформации в водонасыщенном состоянии не удовлетворяет требованиям к ПЗС согласно¹, а увеличение содержания цемента с 3 % до 4 % изменяет модуль деформации всего в 1,06 раз, что нерационально, поэтому можно рекомендовать добавку в количестве 3 % цемента.

Далее были проведены испытания по подбору процентного содержания стабилизатора грунта при 3 % содержании цемента. Результаты испытаний приведены на рис. 3.

Как видно из результатов испытаний, добавление стабилизатора увеличивает модуль деформации смеси на 12,4–23,6 % в зависимости от его процентного содержания в смеси. Также можно оценить, что основной набор прочности образцов достигается в течение 7 суток (80,6–93,5 % от прочности в возрасте 28 суток), следовательно, основные испытания могут быть проведены в этом возрасте, что позволяет оптимизировать время на дальнейшие исследования.

Для оценки трещиностойкости и стойкости к воздействию агрессивных сред были проведены испытания на прочность при расколе и прочность на сжатие. Результаты испытаний представлены на рис. 4 и 5.

Как видно из графиков, применение стабилизатора увеличивает прочность на раскол на 58–65 %. Исходя из этого следует, что материал, обработанный стабилизатором, будет меньше разрушаться от изгибных напряжений, что скажется на долговечности конструкции ПЗС.

На основании результатов испытаний следует также отметить, что для данного материала ПЗС с 3 % содержания цемента по критериям прочности и деформативности достаточно 5 % добавки «Nisoflok» и дальнейшее её увеличение нецелесообразно.

ВЫВОДЫ

В процессе исследования суммарно было изготовлено 84 лабораторных образца с различным содержанием добавок портландцемента и стабилизатора, которые были испытаны на сжатие, в том числе с водонасыщением, при разном времени набора прочности, а также на раскол.

Из проведенных лабораторных исследований влияния вяжущих материалов и стабилизаторов грунта на прочностные и деформационные характеристики материала ПЗС, полученного из продуктов очистки балластного слоя, может быть сделан ряд выводов.

1) По результатам испытаний был подобран оптимальный состав цемента и стабилизатора для определенного гранулометрического состава ПЗС.

2) Основные преимущества применения стабилизаторов грунта в сравнении с образцами с применением только цемента:

- увеличение модуля деформации на 12,4–23,6 %;
- увеличение прочности на раскол на 58–65 %;
- уменьшение потерь по модулю деформации после водопоглощения на 17 %.

3) Применение вяжущих материалов в совокупности с полимерными стабилизаторами позволяет увеличить модуль деформации материала в 3,1 раза и достичь значений больше 200 МПа, что делает возможным рассмотреть возможность устройства ПЗС из продуктов от очистки балластного слоя, обеспечив сокращение стоимости и продолжительности работ в технологические «окна», сняв имеющиеся в настоящее время ограничения для его применения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Блажко Л. С., Чуян С. Н., Захаров В. Б., Черняев Е. В. Анализ способов повышения несущей способности грунтов основной площадки земляного полотна // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2016. – № 3 (48). – С. 328–336. [Электронный ресурс]: <https://izvestiapgups.org/assets/files/10.20295-1815-588X-2016-3/10.20295-1815-588X-2016-3-328-336.pdf>. Доступ 23.12.2023.
2. Track Compendium: Formation, Permanent Way, Maintenance, Economics. 2nd edition. Hamburg, Eurailpress, 2011, 634 p. ISBN 978-3-7771-0421-8.
3. Маркин М. А. Решение проблемы устранения локальных выплесков // Путь и путевое хозяйство. – 2021. – № 5. – С. 18–20. EDN: TQEYLF.
4. Воробьев В. Б. Усиление основной площадки земляного полотна подбалластным защитным слоем для повышения пропускной способности железных дорог // Вестник Института проблем естественных монополий: Техника железных дорог. – 2022. – № 2 (58). – С. 41–45. EDN: LTYTUA.
5. Кузнецова А. В., Савин А. В. Прогноз накопления деформаций грунта земляного полотна под действием циклической нагрузки на основе результатов компьютерного моделирования // Транспортное строительство. Сб. статей второй всероссийской научно-техн. конференции. – М.: Изд-во «Перо», 2021. – С. 201–208. EDN: AJTBDH.
6. Cook, J., Buckley, J., Dobie, M., Bhavsar, R. The Use of Multiaxial Geogrids in Rail Trackbed Stabilisation. IINHA Conference, Perth, Australia, 2015. [Электронный ресурс]: https://www.researchgate.net/publication/279195354_The_Use_of_Multiaxial_Geogrids_in_Rail_Trackbed_Stabilisation. Доступ 23.12.2023.
7. Худайкулов Р. М., Мирзаев Т. Л. Применение стабилизаторов для улучшения прочности грунтового основания автомобильных дорог // Транспортные сооружения. – 2019. – Т. 6. – № 1. – С. 12. EDN: NXYZZV.
8. Разуваев Д. А., Ланис А. Л. Использование стабилизаторов грунтов при расширении сети автомобильных дорог местного назначения // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе. – 2012. – Т. 3. – С. 223–228. EDN: PXBECJ.
9. Solihu, H. Cement Soil Stabilization as an Improvement Technique for Rail Track Subgrade, and Highway Subbase and Base Courses: A Review. Journal of Civil & Environmental Engineering, 2020, Vol. 10, Iss. 3. DOI: 10.37421/jce.2020.10.344.
10. Дмитриева Т. В., Маркова И. Ю., Строкова В. В. [и др.]. Эффективность стабилизаторов различного состава при укреплении грунтов минеральным вяжущим // Строительные материалы и изделия. – 2020. – Т. 3. – № 1. – С. 30–38. DOI: <https://doi.org/10.34031/2618-7183-2020-3-1-30-38>.
11. Митрофанов Н. Г., Панов И. В., Румянцев Д. А., Шабанова Т. Н., Зенкин И. Н. Патент на изобретение RU 2520118 C2. Композиция для устройства оснований дорожных одежд и других сооружений // Патентообладатель: федеральное государственное бюджетное учреждение высшего профессионального образования «Тюменский государственный архитектурно-строительный университет» // заявл. 03.09.2012; опубл. 20.06.2014, Бюл. № 17. – 11 с. [Электронный ресурс]: https://rusneb.ru/catalog/000224_000128_0002520118_20140620_C2_RU/?ysclid=lsdbqbehvj270351254. Доступ 23.12.2023. ●

Информация об авторах:

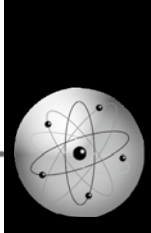
Дорошенко Кирилл Андреевич – аспирант кафедры пути и путевого хозяйства Российского университета транспорта, Москва, Россия, inozrelez@mail.ru.

Ашпиз Евгений Самуилович – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой пути и путевого хозяйства Российского университета транспорта, Москва, Россия, geopika@inbox.ru.

Коростелев Вячеслав Александрович – учредитель ООО «Комкор», Краснодар, Россия, sk2100024@gmail.com.

Статья поступила в редакцию 06.12.2023, одобрена после рецензирования 22.12.2023, принята к публикации 27.12.2023.





НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 629.4.027

DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-6-5>

Повышение динамических качеств локомотива за счет изменения положения концевых витков пружин кузовного рессорного подвешивания



Сергей ШАНТАРЕНКО



Сергей САВИНКИН

*Сергей Георгиевич Шантаренко¹,
Сергей Владимирович Савинкин²*

*Омский государственный университет путей
сообщения (ОмГУПС), Омск, Россия.*

¹ WoS Researcher ID: B-1719-2016; Scopus Author ID:
57200089403; PIIHC Author ID: 477507.

² ORCID 0000-0002-4015-574X; PIIHC Author ID:
1098289.

✉ ² syava-sv@yandex.ru.

АННОТАЦИЯ

В статье представлены результаты исследования влияния положения концевых витков пружин кузовного рессорного подвешивания локомотива на их статический прогиб и на параметры упругой поперечной связи тележки с кузовом, зависящей от углового перемещения концевых витков при вписывании локомотива в кривые разного направления, с целью повышения динамических качеств электровоза.

Методом математического моделирования с использованием программного комплекса автоматизированного проектирования были рассмотрены различные варианты установки кузовных пружин, приведен и обоснован оптималь-

ный вариант положения концевых витков пружин, при котором повышаются динамические качества локомотива за счет наименьшего сопротивления повороту тележки, симметричности возвращающих моментов и обеспечения благоприятного вписывания локомотива в кривые участки пути, что снижает интенсивность изнашивания гребней бандажей колес.

Установлено, что направление навивки кузовных пружин при оптимальном варианте положения концевых витков не оказывает существенного влияния на симметричность возвращающего момента при вписывании тележки в кривые разного направления.

Ключевые слова: железнодорожный транспорт, кузовное подвешивание, поперечная связь, кузовная пружина, концевой виток, статический прогиб, возвращающий момент, боковая сила, динамические качества локомотива, износ гребня.

Для цитирования: Шантаренко С. Г., Савинкин С. В. Повышение динамических качеств локомотива за счет изменения положения концевых витков пружин кузовного рессорного подвешивания // Мир транспорта. 2023. Т. 21. № 6 (109). С. 40–47. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-6-5>.

**Полный текст статьи на английском языке публикуется во второй части данного выпуска.
The full text of the article in English is published in the second part of the issue.**

ВВЕДЕНИЕ

Экипажная часть (экипаж) является частью конструкции локомотива, обеспечивающей его движение в рельсовой колее, и представляет собой повозку с колесными парами, в которой располагается необходимое энергетическое и вспомогательное оборудование. Экипажная часть является основой локомотива, непосредственно обеспечивающей его движение.

К экипажной части предъявляется ряд обязательных конструктивных требований и условий содержания при эксплуатации, к которым относятся:

- способность двигаться на прямых и криволинейных участках пути, не вызывая перегрузок в элементах конструкции;
- сохранять прочность узлов и деталей в течение всего срока службы;
- защищать оборудование от вредного воздействия вибраций и внешней среды.

Тележки воспринимают тяговые и тормозные усилия, боковые, горизонтальные и вертикальные силы при прохождении локомотивом неровностей пути и передают их через пружинные опоры на раму кузова. Поперечная связь рамы тележки с кузовом осуществляется за счет поперечной податливости кузовных пружин и жесткости пружин упоров-ограничителей, которые также обеспечивают возможность поворота тележки в кривых участках пути и гашения различных форм колебаний кузова [1].

Рессорное подвешивание должно обладать необходимой упругостью и способностью поглощать (гасить) возникающие при движении электровоза вертикальные и боковые колебания и равномерно распределять нагрузки между колесными парами и колесами [2].

От конструктивных особенностей рессорного подвешивания и его параметров, а также от того, как распределены колеблющиеся массы кузова и тележки, зависят так называемые динамические качества электровоза [2; 3].

Вертикальная жесткость первой ступени подвешивания (на колесо) определяется суммарной жесткостью пружин и жесткостью параллельно включенной с ними вертикальной поводковой группы. Наличие параллельно включенного упругого элемента (поводковой группы) со значительной жесткостью не позволяет создать первую ступень рессорного подвешивания достаточно мягкой. Так, уменьшение жесткости пружин вдвое

приводит к снижению суммарной жесткости лишь на 30 %. Чтобы обеспечить при этом необходимую прочность пружин, их габаритные размеры пришлось бы значительно увеличить, что невозможно. Для снижения динамического воздействия сил, действующих на локомотив со стороны пути, и повышения эффективности гашения вертикальных колебаний его экипажа рессорное подвешивание локомотива выполняется двухступенчатым. Вторая ступень подвешивания состоит из упругих боковых опор, через которые масса кузова передается на рамы тележек. Расположение боковых опор и жесткость второй ступени подвешивания определяются условиями рационального использования сцепного веса локомотива при реализации сил тяги [4], выбора оптимального демпфирующего момента, который гасит горизонтальные колебания локомотива, и рационального восприятия массы кузова рамой тележки.

Целью исследования, результаты которого приводятся в настоящей статье, являлось определение оптимального варианта установок концевых витков пружин типа «flexicoil» кузовного рессорного подвешивания с точки зрения повышения динамических качеств электровоза.

Работа выполнена на основе применения метода математического моделирования, в том числе с использованием универсальной математической программы MathCAD, программного комплекса Siemens NX10, основанного на методе конечных элементов (Finite Element Method), с применением блока линейного статического анализа (Linear Static Analysis).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Оценка влияния положения концевых витков кузовных пружин на динамические качества локомотива

Одним из современных вариантов рессорного подвешивания тягового подвижного состава являются технические решения, использование которых связано с работой пружин на поперечные (сдвигающие) нагрузки [5]. Примером может служить применяемое на электровозах серии ЭЭС6 кузовное подвешивание, выполненное через четыре пружины типа «flexicoil» на каждой тележке (по две с каждой стороны). Связи кузова с рамой тележки предназначены для передачи всех видов усилий между рамой кузова и тележкой. Поворот те-



Таблица 1

Характеристика пружины «flexicoil» [выполнено авторами]

Обозначение	Название	Величина
Сталь	60С2ХА	
G	Модуль упругости при сдвиге	78 кН/мм ²
E	Модуль нормальной упругости	196 кН/мм ²
d	Диаметр прутка пружины	46 мм
D	Средний диаметр пружины	197 мм
n	Число рабочих витков	9
n_1	Полное число витков	11
h_0	Высота пружины в свободном состоянии	650 мм
F_1	Расчетная вертикальная статическая нагрузка на пружину	66,2 кН
s_1	Расчетный статический прогиб пружины под нагрузкой F_1	105 мм
C	Продольная жесткость пружины	640 Н/мм
C_0	Поперечная жесткость пружины	123 Н/мм
h_1	Высота пружины под расчетной статической нагрузкой F_1	549 мм
m	Масса пружины	79 кг

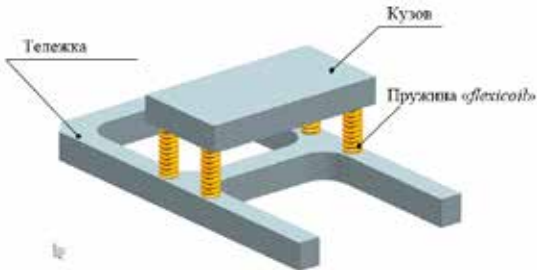


Рис. 1. 3D-модель конструкции кузовного рессорного подвешивания электровоза 2ЭС6 [выполнено авторами].

лежки относительно кузова в кривых участках пути вызывает поперечную деформацию концевых витков пружин, при этом на тележку действует возвращающий момент в соответствии с ГОСТ 34628-2019 [1] и руководством по эксплуатации 2ЭС6.00.000.00 РЭ5². Положение концевых витков пружин влияет на возвращающий момент от поперечной деформации пружин, действующий на тележку, на параметры упругой поперечной связи кузова с тележкой при вписывании локомотива в кривые участки пути, и может приводить к перекосу кузова относительно рамы тележки и неравномерному распределению вертикальных нагрузок по осям колесных пар [2; 6].

Современные программные комплексы автоматизированного проектирования за

счет возможности анализа множества вариантов взаимного расположения конструкций, узлов и деталей позволяют достичь оптимального конструктивного решения³ [7; 8]. При таком подходе удастся качественно и количественно оценить влияние конструктивных особенностей узлов, их взаимного расположения на работоспособность всей конструкции [9; 10].

Данный принцип был использован для поиска оптимального варианта установки пружин типа «flexicoil» в кузовном рессорном подвешивании электровозов серии 2ЭС6. В процессе проектирования было исследовано три варианта положения концевых витков кузовных пружин по отношению к боковинам рамы тележки, в том числе вариант, рекомендованный в руководстве по эксплуатации электровоза 2ЭС6, с концевыми витками, ориентированными наружу тележки.

В результате проведенного исследования была выполнена оценка влияния положения

¹ ГОСТ 34628-2019. Пружины и комплекты пружинные рессорного подвешивания железнодорожного подвижного состава. Методы расчета на прочность при действии продольных и комбинированных нагрузок. – М.: Изд-во стандартов, 2020. – 24 с. [Электронный ресурс]: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293723/4293723988.pdf?ysclid=lnykd2ck61744121497>. Доступ 26.05.2023.

² Электровоз грузовой постоянного тока 2ЭС6 с коллекторными тяговыми электродвигателями. Руководство по эксплуатации. Ч. 6. Механическая часть. – 2ЭС6.00.000.00 РЭ5. – Екатеринбург: Изд-во ООО «Уральские локомотивы», 2011. – 97 с.

³ Руководство пользователя Universal mechanism 9. Моделирование динамики железнодорожных экипажей // www.universalmechanism.com: официальный сайт, 2021. – 268 с. [Электронный ресурс]: <http://www.universalmechanism.com/download/90/rus/08umloco.pdf>. Доступ 19.11.2022.

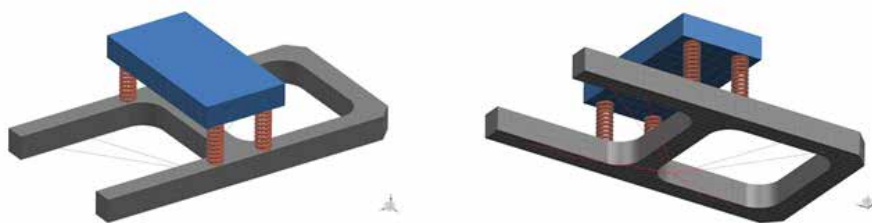


Рис. 2. КЭМ кузовного рессорного подвешивания электровоза 2ЭС6 [выполнено авторами].

концевых витков кузовных пружин на их статический прогиб, выявлена зависимость между их расположением и величиной углового перемещения концевого витка, что в свою очередь оказывает значительное влияние на результирующую величину поперечной деформации пружин и на параметры упругой поперечной связи тележки с кузовом при вписывании локомотива в кривые участки пути [11].

Особенность конструкции пружин типа «flexicoil» заключается в их поперечной жесткости, которая в пять раз меньше продольной. Такое конструктивное решение не препятствует повороту тележки в кривые, а возвращающий момент от поперечной деформации пружин при правильной ориентации концевых витков зависит от угла поворота тележки и равен $11,75 \text{ кН} \cdot \text{м/град}^2$. В таблице 1 приведены параметры кузовной пружины «flexicoil».

Исследования влияния положения концевых витков на параметры упругой поперечной связи кузовного подвешивания локомотива производились с помощью программного комплекса Siemens NX10 [7].

Расчетная 3D модель конструкции кузовного рессорного подвешивания электровоза серии 2ЭС6 приведена на рис. 1.

Тележка представлена габаритной моделью, а кузов электровоза – как объемный массовый элемент с характерными точками установки кузовных пружин. Пружины смоделированы в полном соответствии с конструкторской документацией.

Для выполнения расчета создано шесть конечно-элементных моделей (КЭМ) [12], одна из которых представлена на рис. 2.

Остальные модели отличаются только ориентацией концевых витков пружин относительно продольной оси тележки и направлением (в зависимости от направления кривой вписывания) силы Q_m , действующей на пружинный комплект и стремящейся повернуть тележку на угол φ .

Элементы конструкции смоделированы 3D-элементами «CTETRA(10)» и «CHEXA(20)».

Установка тележки на буксовые пружины моделировалась 1D-элементами RBE2, зависимость узлы которых соединены с местами установки опор буксовых пружин на тележку. Независимый узел расположен на оси вращения страховочного шкворня электровоза и закреплен по пяти степеням свободы (ограничены перемещения по трем осям XYZ и ограничены повороты относительно оси X и Y).

Имитатор кузова тележки ограничен по вертикальным граням по двум степеням свободы (ограничены перемещения по оси X и Y).

Места контакта кузовных пружин с тележкой и имитатором кузова смоделированы соединением типа «Face Gluing», представляющим собой жесткое соединение между элементами конструкции и исключающим поперечные перемещения концевых витков кузовных пружин в нижних направляющих чашах рамы тележки и в верхних стаканах рамы кузова.

Расчеты угла поворота тележки относительно кузова проведены с использованием программного комплекса Siemens NX10, основанного на методе конечных элементов (Finite Element Method), и применением блока нелинейного статического анализа (Nonlinear Static analysis).

При вписывании электровоза в кривую на комплект кузовных пружин «flexicoil» в поперечном направлении действуют силы от поворота Q_φ и от бокового сноса $Q_{св}$ тележки. Результирующей этих двух сил является сила Q_m , которая стремится повернуть тележку на угол φ (рис. 3). Реакцией на силу Q_m будет являться момент сопротивления повороту (возвращающий момент), стремящийся вернуть тележку в исходное положение.



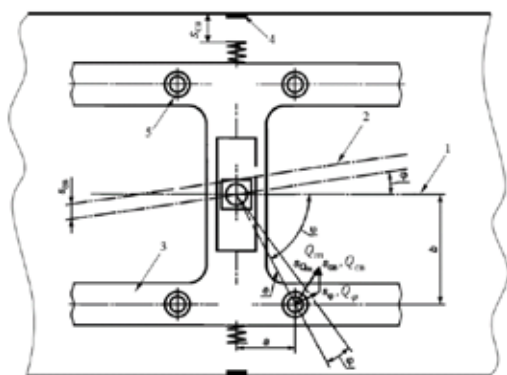


Рис. 3. Расчетная схема поперечных деформаций кузовных пружин при движении локомотива в кривой: 1 – продольная ось кузова; 2 – ось тележки при повороте и отnose; 3 – рама тележки; 4 – упорная плита кузова; 5 – кузовная пружина [выполнено авторами].

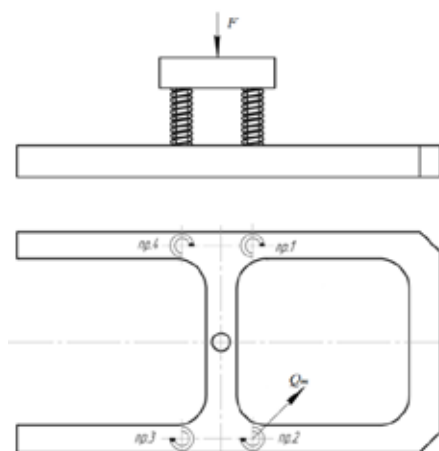


Рис. 4. Направления действия расчетных сил [выполнено авторами].

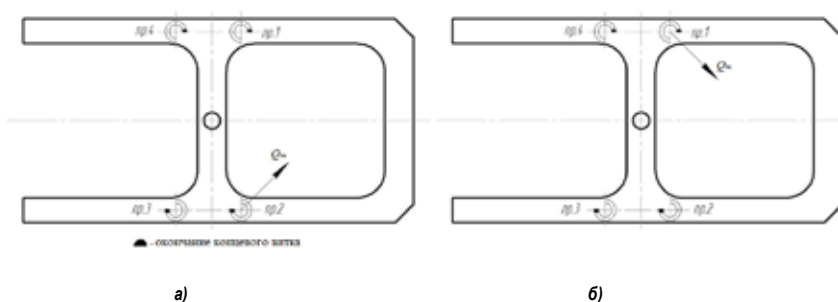


Рис. 5. Расчетная схема № 1: а) – движение локомотива в левой кривой; б) – движение локомотива в правой кривой [выполнена авторами].



Рис. 6. Расчетная схема № 2 [выполнена авторами].

При расчете было принято, что вертикальная статическая сила от массы электровоза, приходящаяся на пружинный комплект одной тележки, $F = 270 \text{ кН}$, и поперечная сила, ориентированная к продольной оси тележки под углом 315° или 45° в зависимости от направления кривой, $Q_m = 30 \text{ кН}$ (рис. 4).

Определение оптимального варианта установки концевых витков пружин типа «Flexicoil» кузовного рессорного подвешивания

Для поиска оптимального положения концевых витков пружинного комплекта, при котором

возвращающий момент тележки будет симметричным, а влияние моментов кручения, возникающих в рабочих витках пружин при воздействии вертикальной статической нагрузки, на параметры поперечной упругой связи тележки с кузовом минимальным [13], исследованы три варианта положения, приняты шесть расчетных случаев в зависимости от направления кривой при вписывании локомотива. Расчетные случаи и схемы положения концевых витков пружин приведены на рис. 5–7.

Величины углов между продольной осью тележки и окончанием концевой витка пружины представлены в таблице 2.

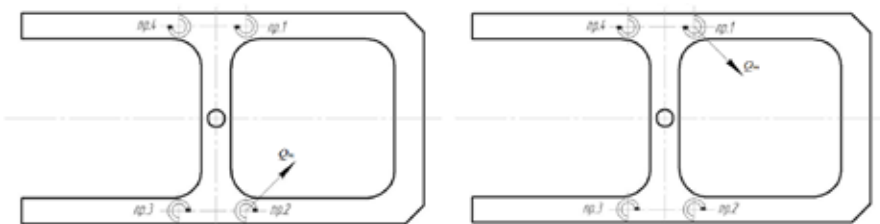


Рис. 7. Расчетная схема № 3 [выполнена авторами].

Таблица 2

Значение углов для расчетных схем [выполнено авторами]

Расчетная схема	Пружина 1	Пружина 2	Пружина 3	Пружина 4
1	0°	180°	180°	0°
2	90°	270°	270°	90°
3	180°	0°	0°	180°

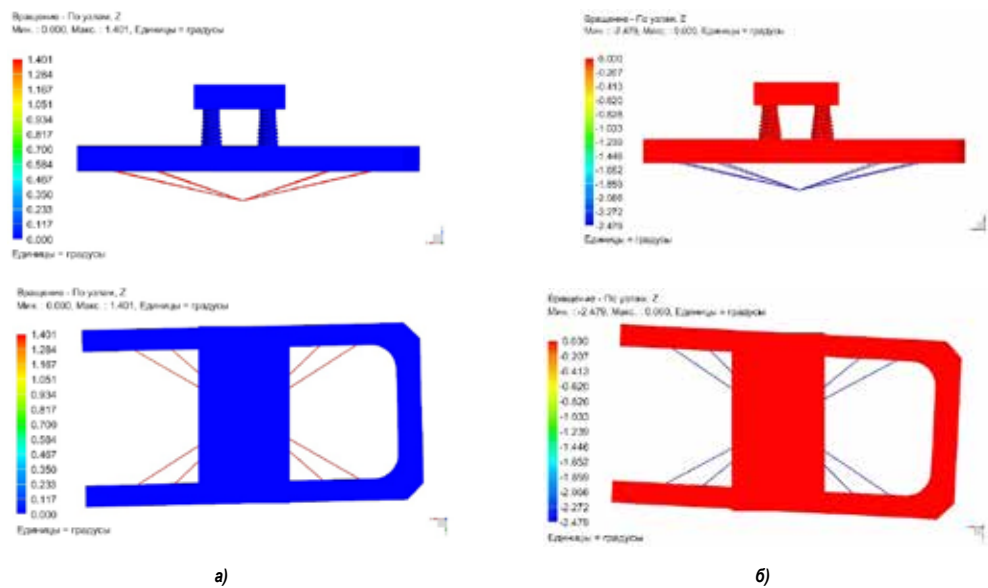


Рис. 8. Фрагмент расчета угла поворота тележки в программном комплексе Siemens NX10 (расчетная схема № 1): а) – движение локомотива в левой кривой; б) – движение локомотива в правой кривой.

Результаты расчета угла поворота тележки относительно кузова электровоза для всех расчетных схем и случаев приведены в таблице 3.

Знак «—» принят для поворота тележки по часовой стрелке – правая кривая вписывания локомотива.

На примере расчетной схемы № 1 (рис. 5) представлен фрагмент расчета угла поворота тележки в программном комплексе Siemens NX10, рис. 8.

Для оценки влияния положения концевых витков кузовных пружин на их статический прогиб, а также перемещений тележки (угол поворота) из-за неуравновешенных моментов

кручения, возникающих в рабочих витках пружин от воздействия вертикальной статической нагрузки, из КЭМ и расчетных схем

Таблица 3

Значения углов поворота тележки относительно кузова электровоза [выполнено авторами]

Расчетная схема	$\varphi, ^\circ$	Направление кривой
1	1,401	левая
	–2,479	правая
2	2,099	левая
	–1,971	правая
3	2,215	левая
	–1,121	правая



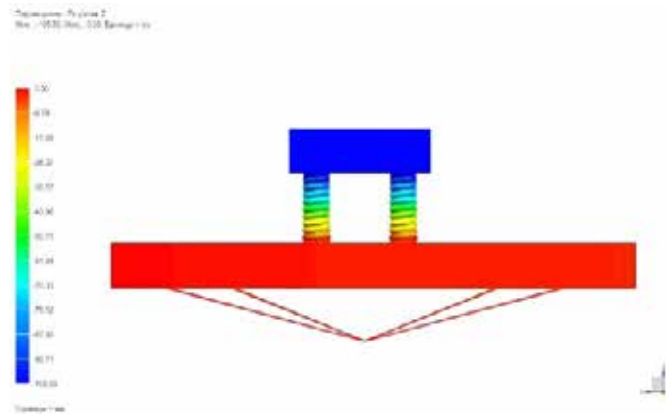


Рис. 9. Фрагмент расчета статического прогиба кузовного пружинного комплекта от действия вертикальной статической силы F в программном комплексе Siemens NX10 [выполнено авторами].

Таблица 4
Значения статического прогиба
комплекта кузовных пружин
и угла поворота тележки при действии
только силы F

Расчетная схема (только сила F)	Статический прогиб, мм	φ , °
1	105,50	–0,567
2	105,10	0,1
3	105,58	0,578

была исключена сила Q_m . Данное условие можно интерпретировать как движение локомотива по идеальному прямому участку пути [14] и использовать при сборке механической части в процессе ремонта с целью соблюдения регламентированных параметров упругой поперечной связи тележки с кузовом и сохранения их в эксплуатации [6].

Результаты расчетов представлены в таблице 4.

Для иллюстрации один из фрагментов расчета статического прогиба в программном комплексе Siemens NX10 приведен на рис. 9.

Фрагменты расчетов углов поворота тележки аналогичны представленным на рис. 8.

С учетом требования к динамическим качествам локомотива и при коэффициенте вертикальной динамики второй ступени рессорного подвешивания, равном 0,25 (ГОСТ Р 55513–2013⁴), что соответствует реальным

⁴ГОСТ Р 55513–2013. Локомотивы. Требования к прочности и динамическим качествам. – М.: Стандартинформ, 2013. – 46 с. [Электронный ресурс]: <https://docs.cntd.ru/document/1200104254?ysclid=lnykb5q9v354720493>. Доступ 26.05.2023.

условиям эксплуатации, продольная деформация пружин увеличивается на 26 мм, разность углов поворота тележки влево и вправо по направлению кривой относительно кузова электровоза с учетом действия силы Q_m увеличивается на 1,6°, а угол поворота тележки относительно кузова электровоза при действии только одной вертикальной силы F – на 0,24°, что оказывает существенное негативное влияние на характеристику поперечной упругой связи тележки с кузовом и способствует перекосу тележки в кривой.

ВЫВОДЫ

Таким образом, в результате проведенных исследований определена оптимальная схема положения концевых витков кузовных пружин, при которой от воздействия вертикальной силы от массы кузова, приходящейся на одну тележку, угловое перемещение концевых витков будет минимальным (0,1°), а возвращающий момент от поперечной деформации пружин будет симметричен и одинаков по величине независимо от направления кривой рельсовой колеи (рис. 6).

Данная ориентация концевых витков кузовных пружин «flexicoil» способствует симметричности параметров поперечной упругой связи тележки с кузовом при вписывании локомотива в кривые разного направления, обеспечивая равномерное воздействие на гребни бандажей колесных пар, и при этом не влияет на статический прогиб пружин. Одинаковая навивка (правая) всех четырех пружин кузовного комплекта при установке в соответствии с расчетной схемой № 2

(рис. 6) не оказывает значительного влияния на сопротивляемость тележки вписыванию в кривые разного направления.

Только за счет рациональной установки концевых витков пружин кузовного подвешивания можно уменьшить боковую силу, действующую на гребень бандажа, тем самым создавая более благоприятные условия для вписывания тележки в кривые участки пути, что будет способствовать снижению интенсивности изнашивания гребней бандажей колесных пар [15–17].

Предложенный алгоритм подбора положения концевых витков кузовных пружин может быть использован для тягового подвижного состава всех серий, где применяются конструктивные решения в кузовном рессорном подвешивании, аналогичные используемым на электровозе 2ЭС6.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Гарг В. К., Дуккипати Р. В. Динамика подвижного состава. Пер. с англ. К. Г. Бомштейна / Под ред. Н. А. Панькина. – М.: Транспорт, 1988. – 391 с. ISBN 5-277-00226-X.

2. Шантаренко С. Г., Савинкин С. В., Свиридова Ю. А. Неравномерное распределение осевых нагрузок как фактор одностороннего износа гребней колесных пар электровозов серии 2ЭС6 // «Транспорт и логистика: развитие в условиях глобальных изменений потоков»: сб. научных трудов VII международной научно-практ. конференции. – Ростов-на-Дону, 2023. – С. 410–414. ISBN 978-5-907295-82-7.

3. Савоськин А. Н., Бурчак Г. П., Бондаренко Д. А. Вероятностные методы в задачах динамики, прочности и безотказности рельсовых экипажей: Стереотипное издание. – М.: Изд-во Альянс, 2022. – 612 с. ISBN 978-5-00106-528-9.

4. Лисунов В. Н. Использование сил взаимодействия движущего колеса с рельсом в режимах тяги и электрического торможения: монография / В. Н. Лисунов. – Омск: Омский гос. ун-т путей сообщения, 2003. – 160 с. ISBN 5-94941-016-5.

5. Буйносов А. П., Фетисова Н. Г. Варианты использования и расчет цилиндрических винтовых пружин в рессорном подвешивании современных локомотивов // Научно-технический вестник Поволжья. – 2016. – № 5. – С. 62–64. EDN: WRPXNJ.

6. Шантаренко С. Г., Савинкин С. В. Влияние расположения концевых витков пружин кузовного рессорного подвешивания локомотива на параметры упругой поперечной связи кузова с тележкой // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. –

2023. – № 2. – С. 45–50. DOI: 10.46973/0201-727X_2023_2_5.

7. Гончаров П. С., Артамонов И. А., Халитов Т. Ф., Денисихин С. В., Сотник Д. Е. NX Advanced Simulation. Инженерный анализ. – М.: ДМК Пресс, 201. – 504 с. ISBN 978-5-94074-841-0.

8. Андрищенко А. А., Шутова М. Н. Влияние расположения опорного витка пружины буксового рессорного подвешивания на прочность корпуса буксы электровоза 2ЭС5К // Вестник всероссийского научно-исследовательского и проектно-конструкторского института электровозостроения. – 2008. – № 1 (55). – С. 168–174. EDN: JWLASJ.

9. Шантаренко С. Г., Савинкин С. В., Свиридова Ю. А. Конструкционные особенности узлов механической части и отказы локомотивов новых серий // «Эксплуатационная надежность локомотивного парка и повышение эффективности тяги поездов»: материалы XII всероссийской научной-техн. конференции с международным участием. – Омск, 2022. – С. 96–106. ISBN 978-5-94941-311-1.

10. Парнюк С. М. Надежность технических средств и подходы к техническому регулированию // Локомотив. – 2022. – № 7 (787). – С. 13–18. EDN: TCSDHB.

11. Савинкин С. В., Шантаренко С. Г. Влияние поперечной жесткости кузовного подвешивания электровоза 2ЭС6 на износ гребней колесных пар // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте: материалы XVI научной конференции, посвященной Дню российской науки / отв. ред. И. И. Галиев. – Омск: Изд-во ОмГТУПС, 2022. – С. 401–407. EDN: ZPZQSF.

12. Ашуркова С. Н., Антипин Д. Я. Выбор рациональной несущей конструкции кузова пассажирского вагона с подкрепляющими элементами перфорированного сечения // Транспорт Урала. – 2019. – № 2 (61). – С. 23–27. EDN: HKPNJX.

13. Мартыанов А. А., Мартыанов А. П., Яхин С. М. Практический расчет упругих элементов с большим шагом витков на прочность и жесткость при деформации сжатия // Вестник Казанского государственного аграрного университета. – 2010. – Т. 5. – № 4 (18). – С. 117–119. EDN: NBJOUN.

14. Галиев И. И., Минжасаров М. Х., Липунов Д. В. Формирование математической модели вертикальных колебаний электровозов 2ЭС6 с учетом динамики колесно-моторных блоков // Известия Транссиба. – 2021. – № 4 (48). – С. 96–108. EDN: DXXRHE.

15. Буйносов А. П. Методы повышения ресурса бандажей колесных пар тягового подвижного состава: Монография. – М.: УМЦ по образованию на ж. д. транспорте, 2010. – 224 с. ISBN 978-5-9994-0038-3.

16. Кузнецов В. Ф., Шантаренко С. Г., Савинкин С. В. Износ материала гребня бандажа колеса локомотива // Известия Транссиба. – 2022. – № 4 (52). – С. 82–88. EDN: EFFXCC.

17. Доронин С. В., Доронина И. И. Управление движением локомотивных тележек в кривых // Известия Транссиба. – 2016. – № 1 (25). – С. 25–30. EDN: VYXGPZ.

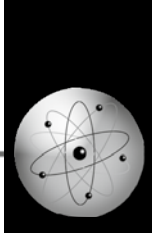
Информация об авторах:

Шантаренко Сергей Георгиевич – доктор технических наук, профессор кафедры технологий транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), Омск, Россия, ShantarenkoSG@omgups.ru.

Савинкин Сергей Владимирович – аспирант кафедры технологий транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), Омск, Россия, syava-sv@yandex.ru.

Статья поступила в редакцию 05.08.2023, одобрена после рецензирования 13.11.2023, принята к публикации 17.11.2023.





НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 629.4.026:629.423.32:621.355.9

DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-6-6>

Унификация бортовых тяговых накопителей энергии для подвижного состава железных дорог



Михаил ЯРОСЛАВЦЕВ

Михаил Викторович Ярославцев

Некоммерческое акционерное общество «Торайгыров университет»
(НАО «Торайгыров университет»), Павлодар, Республика Казахстан.
ORCID 0000-0002-1440-2065; SCOPUS AuthorID: 56532450300,
РИИЦ SPIN-код 3977-8959.

✉ myarovslavtsev@yandex.ru.

АННОТАЦИЯ

По мере снижения стоимости тяговых литиевых батарей создается большое количество образцов подвижного состава, использующих их для приема энергии рекуперации, выравнивания нагрузки на источник энергии, обеспечения автономного хода. В работе поставлена цель показать преимущества раздельного проектирования и производства бортовых тяговых накопителей и использующего их подвижного состава, что потребует стандартизации накопителей энергии, очертить круг требований, которые необходимо задать при разработке стандарта, и проиллюстрировать предложения, определив возможные требования к массогабаритным и энергетическим характеристикам унифицированного аккумуляторного накопителя. Для этого на основании обзора подходов к применению накопителей энергии и современных конструкций подвижного состава, на котором при-

меняются тяговые аккумуляторы, показаны основные сценарии их применения.

Выделены основные процессы преобразования энергии тяговым приводом локомотивов на различных временных интервалах и выполнена оценка параметров накопителей энергии для возможных сценариев их применения с использованием методов теории тяги.

На основании полученных результатов рассчитаны основные характеристики унифицированных модулей для накопления энергии. Проведен анализ ограничений, определяющих энергоемкость и мощность, массу, габариты и способ размещения накопителей, их номинальное напряжение. Указаны требования для проектирования стандартного механического, электрического и информационного интерфейса предложенных модулей.

Ключевые слова: железнодорожный транспорт, тяговой накопитель энергии, литий-ионный аккумулятор, стандартизация, взаимозаменяемость, энергосбережение.

Для цитирования: Ярославцев М. В. Унификация бортовых тяговых накопителей энергии для подвижного состава железных дорог // Мир транспорта. 2023. Т. 21. № 6 (109). С. 48–59. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-6-6>.

Полный текст статьи на английском языке публикуется во второй части данного выпуска.
The full text of the article in English is published in the second part of the issue.

ВВЕДЕНИЕ

С начала 2020-х годов происходит бурное внедрение тяговых накопителей энергии (НЭ) на железнодорожном подвижном составе [1; 2]. Контактно-аккумуляторные электропоезда с дальностью хода до 100–200 км эксплуатируются в Великобритании, Германии, Дании, Японии и планируются к поставке в США, Латвию и другие страны^{1, 2, 3, 4}. В 2021 году в США испытана первая накопительная секция емкостью 2,4 МВт·ч, предназначенная для работы по системе многих единиц вместе с магистральными тепловозами⁵. Компания EMD Joule предлагает аналогичные секции с накопителем энергоемкостью от 4 до 14,5 МВт·ч мощностью 1500–5700 кВт⁶, которые проходят испытания в США и Бразилии, а компания Wabtec – секции емкостью от 1,1 до 8,5 МВт·ч мощностью до 5000 кВт⁷. В КНР по заказу Таиланда построен аккумуляторный электровоз с дальностью хода до 200 км,⁸ а по заказу Венгрии – магистральный электровоз с накопителем емкостью 0,2 МВт·ч для маневровых передвижений и контактнo-аккумуляторный маневровый локомотив емкостью 0,35 МВт·ч⁹. Разрабатывается ряд других

электровозов с возможностью движения на «последней миле» с питанием от аккумулятора¹⁰. В России за последние годы созданы гибридные и контактнo-аккумуляторные маневровые локомотивы серий ТЭМ35, ТЭМ5Х, ТЭМ9Н, ЭМКА2¹¹.

Активное развитие новых типов локомотивов стало возможным благодаря совершенствованию аккумуляторов на основе лития, обладающих высокой удельной энергоемкостью при высокой удельной мощности, а также конденсаторов двойного электрического слоя (КДЭС). Их типичные параметры по данным [3] и по материалам производителей¹² приведены в табл. 1. Область применения тяговых литиевых батарей регулярно расширяется по мере снижения их цены. Так, по различным оценкам экспертного агентства Bloomberg, к 2030 году цена аккумуляторов снизится в 1,5–3 раза по сравнению с 2023¹³.

Технико-экономические расчеты, выполненные производителем Stadler в 2021 году, показали, что на неэлектрифицированных линиях применение аккумуляторных электропоездов может быть выгоднее, чем дизель-поездов даже без

¹ Stadler Flirt Akku. [Электронный ресурс]: <https://www.stadlerail.com/en/flirt-akku/details/>. Доступ 22.05.2023.

² Alstom presents its battery-powered multiple unit train in Saxony [Электронный ресурс]: https://www.alstom.com/sites/alstom.com/files/2021/09/07/20210907_PR_DACH_Saxony_BEMU_Demo_EN.pdf. Доступ 22.05.2023.

³ 新たな「蓄電池電車」を男鹿線に導入します [На линии Ога появится новый аккумуляторный поезд] [Электронный ресурс]: <https://www.jreast.co.jp/akita/press/pdf/20151120-1.pdf>. Доступ 22.05.2023.

⁴ Metro class 777 IPEMU. [Электронный ресурс]: https://www.stadlerail.com/media/pdf/mmer_ipemu0922e.pdf. Доступ 22.05.2023.

⁵ BNSF Battery Electric Locomotive Report. [Электронный ресурс]: <https://ww2.arb.ca.gov/sites/default/files/2022-11/zanzeff-bnsf-belreport.pdf>. Доступ 22.05.2023.

⁶ EMD Joule battery-electric locomotive. [Электронный ресурс]: <https://s7d2.scene7.com/is/content/Caterpillar/CM20220627-26f7e-6007b>. Доступ 22.05.2023.

⁷ Battery electric locomotive technology FLXdrive. [Электронный ресурс]: <https://www.wabteccorp.com/FLXdrive-Battery-Electric-Locomotive?inline>. Доступ 22.05.2023.

⁸ CRRC Dalian delivers battery locomotive to Thailand. [Электронный ресурс]: <https://www.railjournal.com/technology/crrc-dalian-delivers-battery-locomotive-to-thailand/>. Доступ 22.05.2023.

⁹ CRRC Locomotives in Europe. [Электронный ресурс]: <https://crrczelc-europe.com/locomotives-in-europe/#nobrebro-custom-646cada43b9861>. Доступ 22.05.2023.

¹⁰ Traction: Going the last mile. [Электронный ресурс]: <https://www.railwaygazette.com/in-depth/traction-going-the-last-mile/59444.article>. Доступ 22.05.2023. Traxx locomotive with zero-emission last mile operational in 2025. [Электронный ресурс]: <https://www.railtech.com/rolling-stock/2022/09/20/traxx-locomotive-with-zero-emission-last-mile-operational-in-2025/>. Доступ 22.05.2023.

¹¹ Селезнев И. Л., Шафрыгин А. В., Чекмарев А. Е., Хохлаков В. А., Ванин И. В. Знакомьтесь: ТЭМ5Х – концепт нового гибридного локомотива // Локомотив. – 2019. – № 12. – С. 30–32. Кузнецов Л. В. Локомотивы «Синары» следуют курсом Экологической стратегии // Локомотив. – 2021. – № 11. – С. 2–3. Электровоз ЭМКА2. [Электронный ресурс]: <https://eec.eaeunion.org/comission/departement/dotp/klimaticheskaya-povestka/bank/118091/>. Доступ 22.05.2023.

¹² Winston battery. [Электронный ресурс]: <http://en.winston-battery.com/index.php/products/power-battery>. Доступ 22.05.2023. SCiB rechargeable battery – Toshiba. [Электронный ресурс]: <https://www.global.toshiba/ww/products-solutions/battery/scib/product/cell.html>. Доступ 22.05.2023. Ultracapacitor overview – Maxwell Technologies. [Электронный ресурс]: <https://maxwell.com/products/ultracapacitors/>. Доступ 22.05.2023.

¹³ Goldie-Scot, L. A Behind the Scenes Take on Lithium-ion Battery Prices – Bloomberg NEF. [Электронный ресурс]: <https://about.bnef.com/blog/behind-scenes-take-lithium-ion-battery-prices/>. Доступ 22.05.2023. Bullard N. Even High Battery Prices Can't Chill the Hot Energy Storage Sector – Bloomberg NEF. [Электронный ресурс]: <https://www.bloomberg.com/news/articles/2023-01-12/even-high-battery-prices-can-t-chill-the-hot-energy-storage-sector>. Доступ 22.05.2023.



Таблица 1

Технико-экономические характеристики накопителей энергии
[выполнено автором на основании данных [3] ^{9, 12}]

Тип НЭ	LiFePO ₄	Li ₄ Ti ₅ O ₁₂	КДЭС
Удельная энергоемкость, Вт·ч/кг	125	90	6
Удельная мощность разряда, Вт/кг	250–350	1800	не ограничена для тяговых накопителей
Удельная мощность заряда, Вт/кг	120	1800	
Плотность элементов, т/м ³	1,6	2,0	1,0
Удельная стоимость, \$/кВт·ч	120–150	200–250	5000–10 000
Количество циклов заряда-разряда	3000	до 20 000	1·10 ⁶ –10·10 ⁶

учета экономии энергии при рекуперативном торможении¹⁴.

В ближайшие годы можно ожидать разработку новых серий локомотивов, оборудованных тяговыми накопителями энергии (НЭ), для сети с колеей 1520 мм. Существует большое число возможных сценариев применения НЭ на подвижном составе [4–11]. Описание решаемых ими задач приводится далее при оценке энергоемкости и мощности.

Хотя области применения различаются по требованиям к мощности и энергоемкости накопителей, что определяет их массу и габариты, а также по сроку службы НЭ, условия эксплуатации тяговых литиевых аккумуляторных батарей являются схожими независимо от их назначения. В настоящее время накопительные устройства, как правило, проектируются индивидуально для каждой серии подвижного состава. Но по мере расширения области их применения становится актуальной унификация накопительных устройств.

Разработка и производство ряда типоразмеров унифицированных модульных накопителей для тягового подвижного состава (ТПС) создаст предпосылки для более динамичного и эффективного развития новых видов тяги. Такое решение позволит:

- 1. повысить серийность технических решений, применяемых при производстве накопителей энергии, что стабилизирует их качество и снизит себестоимость;
- 2. разделить задачи проектирования локомотива и накопителя, что ускорит их разработку и позволит расширить номенклатуру;

¹⁴ Stadler manifests market leadership in alternative drive technologies: DB Regio orders more battery-operated trains. [Электронный ресурс]: <https://www.stadlerail.com/en/media/article/stadler-manifests-market-leadership-in-alternative-drive-technologies-db-regio-orders-more-battery-operated-trains/1080/>. Доступ 22.05.2023.

3. создать возможность выбора между различными типами накопительных устройств на одном типе подвижного состава;

4. повысить эксплуатационную надежность подвижного состава с накопителями энергии благодаря простоте их замены;

5. получить возможность стационарного заряда модулей с обменом их в пунктах оборота, если это оправдано условиями эксплуатации;

6. получить возможность обмена накопителями с разной степенью деградации аккумуляторов между локомотивами, эксплуатируемыми на участках с различной протяженностью автономного хода и руководящим уклоном. Это позволит продлить срок службы накопительных модулей за пределами номинального количества циклов заряда-разряда в условиях, не требующих реализации их полной энергоемкости.

Стандартизация накопителей соответствует современной тенденции к повышению модульности конструкций локомотивов, реализуемой, например, в семействах тепловозов ТЭМ9, ТЭМ23, ТЭМ33 и некоторыми производителями безрельсового транспорта¹⁵.

Приведенные данные позволяют сделать вывод, что в ближайшие годы станет актуальной задача создания новых серий ТПС, использующего тяговые накопители энергии. Поэтому в работе ставится *цель*, выполнив анализ характеристик и условий эксплуатации НЭ, показать целесообразность стандартизации тяговых накопителей для разных типов ТПС и для разных целей применения НЭ, а также предложить критерии нормирования параметров накопительных модулей.

¹⁵ NIO's battery swap network open to other brands. [Электронный ресурс]: <https://cnevpost.com/2023/04/02/nio-battery-swap-network-open-to-other-brands-like-cloud-service-william-li/>. Доступ 22.05.2023.

Чтобы показать возможные характеристики накопительных модулей для различных серий ТПС и областей применения, в работе выполнена оценка их удельных характеристик и рассмотрены ограничения их конструкции по условиям эксплуатации. Описание использованной в работе методики приводится совместно с полученными результатами.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Оценка мощности и энергоемкости бортовых тяговых накопителей

Определение массы и габаритов аккумуляторного накопителя энергии требует нахождения его двух главных параметров: энергоемкости и мощности. Точный их расчет для заданных условий является комплексной задачей, требующей разработки параметров перспективных локомотивов и анализа режимов их эксплуатации. Установка мощных НЭ на существующие серии локомотивов, как правило, невозможна, поскольку это потребует существенного изменения компоновки оборудования, схемы тяговых преобразователей, системы управления, системы вентиляции кузова и т. д.

Важно отметить, что для нахождения мощности и энергоемкости накопителя недостаточно знания распределения мощности, потребляемой тяговым приводом, по времени. Необходимо прогнозировать наибольший и наименьший запас энергии накопителя в течение рейса, для чего следует установить зависимость мощности тягового электропривода от времени тяговым расчетом либо по записям регистраторов параметров движения. Хотя полное решение такой задачи для широкого спектра ситуаций в рамках одной работы невозможно, для задач статьи был выполнен приближенный расчет, позволяющий оценить энергоемкость бортовых накопителей при следующих характерных сценариях их применения.

В случае *повторного использования энергии* электрического торможения при остановке на станции энергоемкость накопителя определяется в первую очередь кинетической энергией движения поезда. В этой ситуации потери на преодоление сопротивления движению малы по отношению к кинетической энергии (1)¹⁶:

$$E = k \frac{mV^2}{2} . \quad (1)$$

Принято, что мощность накопителя должна обеспечивать реализацию полной мощности тяговых двигателей.

При *выравнивании неравномерностей тяговой нагрузки*, вызванной чередованием режимов из-за особенностей профиля пути, а также наличия ограничений скорости, энергоемкость оценена по мощности локомотива и длительности поддержания заданного режима (2):

$$E = kPt . \quad (2)$$

Как показывает анализ режимных карт, для поездных локомотивов типично чередование позиций контроллера не реже, чем каждые 30 минут. Для электро- и дизельпоездов (МВПС) характерны периодические изменения потребляемой мощности, вызванные остановками для посадки пассажиров. В расчете принято, что время их следования по перегону не превышает, как правило, 15 минут.

При передвижениях на *большое расстояние* расход энергии зависит в первую очередь от средних значений основного и дополнительного сопротивления движению.

При расчете требований к НЭ при *маневровых передвижениях, а также преодолении «последней мили»* для подхода к месту погрузки оценка энергоемкости выполнена для дальности передвижения 10 км при эквивалентном уклоне 5 ‰ по выражению (3):

$$E = kmL(w + ig) . \quad (3)$$

Автономное движение за счет энергии накопителя по участку протяженностью 100 км и 300 км. Энергоемкость НЭ также определена по выражению (3). В обоих случаях принято, что перепад высот на участке составляет 500 м, что учтено при задании эквивалентного уклона. Для последних задач потерями энергии, вызванными колебаниями скорости и торможениями, при оценочном расчете допустимо пренебречь.

Поскольку НЭ могут устанавливаться на различные типы ТПС, расчет их характеристик выполнен в удельной форме, на 1000 кВт часовой мощности локомотива. Чтобы перейти от удельных величин к абсолютным, необходимо увеличить их пропорционально мощности локомотива при определении энергоемкости по (2) либо пропорционально массе поезда для выражений (1) и (3). Однако, по-

¹⁶ Принятые в выражениях (1)–(5) обозначения приведены после выражения (5).



скольку при равных коэффициенте сцепления и ходовой скорости сила тяги локомотива пропорциональна его мощности, массу поезда можно также приближенно считать пропорциональной мощности. Расчетные значения ходовой скорости, уклона и протяженность участков выбраны из соображений обеспечения возможности эксплуатации НЭ на большей части сети. Масса поезда на 1 МВт часовой мощности локомотива с осевой нагрузкой 25 т принята соответствующей критической норме для участков с руководящим уклоном 5 ‰.

При выборе типа накопителей важно учитывать их срок службы. Как показывают исследования долговечности аккумуляторов [12; 13], объем энергии, которую литиевый аккумулятор способен принять в течение срока службы, слабо (в пределах 20 %) зависит от глубины разряда. При получении электрической энергии от сети единственным типом аккумуляторов, для которого стоимость принятой энергии превосходит стоимость ее получения от сети, являются литий-титанатные аккумуляторы [14]. Другим их преимуществом является высокая мощность, что позволяет в ряде случаев значительно сократить массу накопителя и сделать целесообразным его применение на подвижном составе, несмотря на более высокую удельную стоимость по сравнению с литий-железофосфатными аккумуляторами. Именно для этого типа при расчете была выполнена оценка массы и габаритов накопительных устройств.

Масса и объем накопителей определены по их удельным характеристикам, приведенным в табл. 1 в соответствии с (4, 5):

$$m_{ES} = k_m \max \left(\frac{E}{E_s}, \frac{P}{P_s} \right), \quad (4)$$

$$V_{ES} = \frac{k_v}{\rho} \max \left(\frac{E}{E_s}, \frac{P}{P_s} \right). \quad (5)$$

В выражениях (1)–(5):

E – энергоемкость накопителя энергии, кДж;

$k = 1, 2$ – коэффициент, учитывающий потери при преобразовании энергии;

m – масса поезда, перемещаемая одной секцией ТПС, т;

V – ходовая скорость движения поезда, м/с;

P – мощность секции ТПС, кВт;

t – длительность нахождения НЭ в режиме разряда, с;

w – удельное сопротивление движению поезда при скорости V , Н/т;

i – приведенный уклон на участке аккумуляторной тяги, ‰;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

L – дальность передвижения на энергии аккумулятора, км.

m_{ES} – масса НЭ, кг,

V_{ES} – объем НЭ, м³,

E_s – удельная энергоемкость НЭ, кДж/кг,

P_s – удельная мощность НЭ, кВт/кг,

$k_m = 1,5$ – отношение общей массы модуля к массе аккумулятора,

$k_v = 2$ – отношение общего объема модуля к объему аккумулятора,

ρ – плотность аккумуляторов, кг/м³.

При расчете принято, что объем модуля с учетом корпуса и системы управления батареями в 2 раза превышает объем элементов аккумулятора, а масса модуля – в 1,5 раза. Во всех случаях дополнительно учтен запас на потери при электрическом и электрохимическом преобразованиях энергии, принятый равным 20 % энергоемкости накопителя. Сопротивление движению w определено по требованиям Правил тяговых расчетов¹⁷.

Результаты расчета приведены в табл. 2.

Как показывают результаты расчета, в случае применения литий-титанатных аккумуляторов для большинства областей применения НЭ, кроме приема энергии торможения (требуемого наименьшего запаса энергии), их параметры определяются по энергоемкости. В то же время, для литий-железофосфатных аккумуляторов в большинстве случаев лимитирующим параметром является мощность батареи. По совокупности характеристик в настоящее время целесообразно применение литий-титанатных аккумуляторов для большинства областей применения, кроме обеспечения передвижений на большие дистанции [14].

Поскольку на этапе проектирования новой серии ТПС конструктор обладает свободой выбора мер по повышению прочности кузова и изменению схемы электрооборудования, то задача включения НЭ в конструкцию локомотива представляется вполне разрешимой.

¹⁷ Правила тяговых расчетов для поездной работы. – М.: ОАО «РЖД», 2016. – 515 с.

Таблица 2



Важнейшей принципиальной проблемой на этом пути представляется обеспечение возможности сохранить мощность локомотива, не выходя за ограничения по габариту и осевой нагрузке. На уровне концепции, до разработки проекта, можно отметить, что существующие серии ТПС, имеющие общий род тяги и назначение, могут иметь различие по мощности на единицу массы, превышающее 20 %. Это позволяет предположить возможность сокращения массы и габаритов оборудования для установки бортовых НЭ сравнительно небольшой емкости общей массой до 10–15 т и объемом до 10 м³. Для задач, требующих наиболее высокой емкости НЭ (аккумуляторный ход на большие дистанции, преодоление подъемов на перевальных участках), можно предложить вынос их в специализированную секцию, если текущий уровень удельной энергоемкости и стоимости НЭ допускает такое решение.

Основные требования к накопителям энергии

Условия эксплуатации накладывают ряд ограничений на конструкцию НЭ, которые необходимо определить при составлении технических требований. К ним относятся:

1. Определение общих массы и габаритов НЭ, исходя из требований по мощности и энергоемкости, а также в целях обеспечения режимов работы и удобства эксплуатации. Это позволит назначить удобный в эксплуатации базовый размер модуля, которому будут кратны возможные типы накопителей.

2. Выбор номинального напряжения (ряда напряжений) модуля и количества последовательно соединенных элементов в нем. Номинальное напряжение тяговых накопителей обуславливается в первую очередь удобством их сопряжения с силовыми цепями локомотива.

3. Выбор системы выравнивания заряда, поскольку литиевые аккумуляторы повреждаются при перезаряде. Известно большое количество схемных решений таких систем [15; 16], отличающихся величиной потерь энергии и стоимостью. Нет необходимости их стандартизации, однако может быть важным учесть требование к возможности отключения части элементов для управления напряжением батареи и повышения ее надежности.

4. Обеспечение температурного режима. Хотя современные тяговые аккумуляторы

имеют относительно широкий диапазон рабочих температур (от –40 до +65 °С для Li₄Ti₅O₁₂, от –45 до +85 °С для LiFePO₄) [15–17], опыт их эксплуатации говорит о необходимости сужения диапазона для поддержания высоких энергетических и мощностных характеристик элементов. В зависимости от величины протекающего тока и температуры может требоваться как охлаждение, так и подогрев батарей [17].

Для подогрева модуля в зимнее время в его конструкцию необходимо ввести нагревательные элементы, а также выполнить внешнюю термоизоляцию. Охлаждение может быть обеспечено с применением различных теплоносителей. Наиболее простым решением является использование окружающего воздуха. В этом случае целесообразно предусмотреть внешнюю систему централизованной его подачи.

5. Проектирование интерфейса накопителя, под которым далее понимается комплекс технических требований, обеспечивающих механическое, электрическое и логическое сопряжение сменных модулей с системами локомотива, перечисленных ниже.

5.1. Механическое крепление, обеспечивающее надежную фиксацию модуля и возможность его быстрого демонтажа.

5.2. Соединение с вентиляционными каналами для подачи и отвода охлаждающего воздуха с возможностью перекрытия каналов при работе в условиях низких температур.

5.3. Соединение с шинами постоянного тока для приема и передачи электрической энергии от тягового преобразователя.

5.4. Обеспечение электропитания собственных нужд модуля в случае использования внешнего источника питания с учетом мощности на обеспечение его термостатирования.

5.5. Подключение к информационной шине для обеспечения связи с системой управления локомотива.

6. Микропроцессорная система управления и диагностики. Система управления должна выполнять ряд функций, которые перечислены ниже.

6.1. Определение степени заряда накопителя.

6.2. Сбор диагностической информации для контроля степени износа элементов батареи. Оценка запаса энергии каждой из групп элементов по напряжению на ней и величине прошедшего тока.

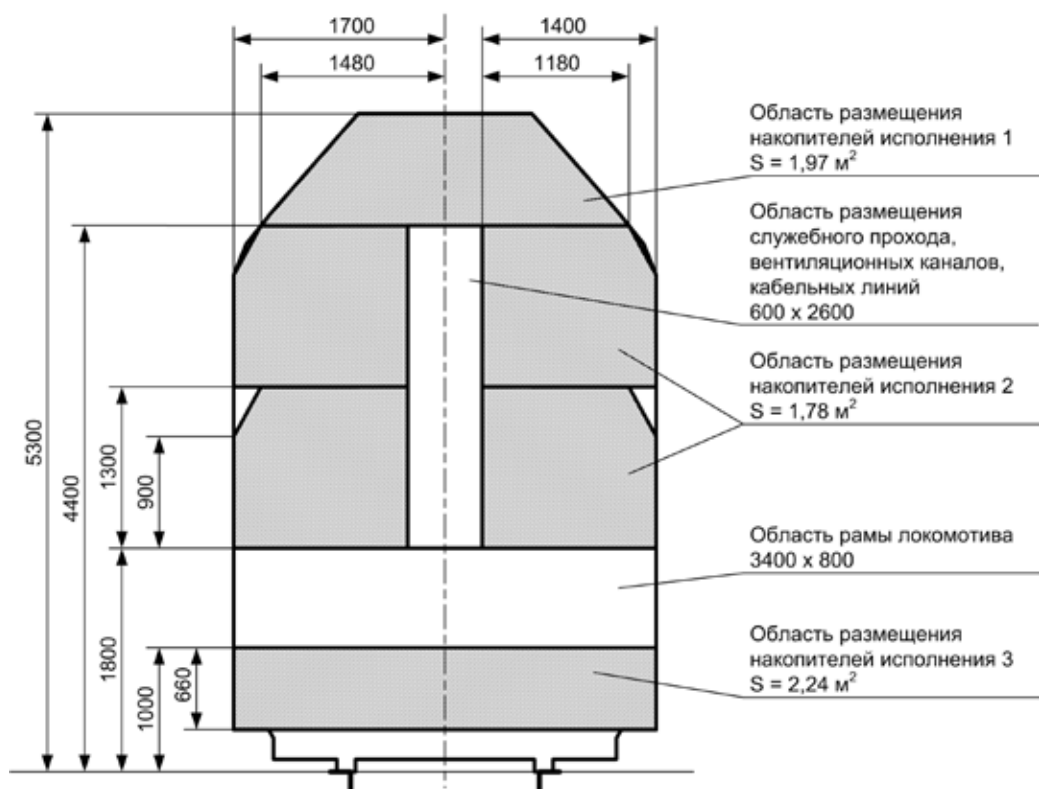


Рис. 1. Зоны возможного размещения накопителей энергии в габарите 1-Т [выполнено автором].

6.3. Управление температурой модуля и выравниванием заряда.

6.4. Отключение модуля в случае перенапряжения, коротких замыканий, перегрева, пожара.

6.5. Связь с системой управления локомотива, а также индикация уровня заряда и аварийных состояний на корпусе модуля. Для обеспечения универсальности и сохранения пропускной способности линий связи целесообразно выделить специализированную шину, использующую один из часто применяемых протоколов передачи данных, например CAN. При этом головной контроллер линии связи обеспечивает взаимодействие накопителей с системой управления локомотива и должен разрабатываться с учетом особенностей конкретной серии.

7. Влияние требований по стоимости и надежности модулей на их конструкцию. Несмотря на долговременную тенденцию к снижению стоимости накопителей, элементы аккумуляторов продолжают составлять наибольшую долю стоимости модуля накопления энергии. Это оправдывает увеличение

сложности конструкции накопительных модулей ради повышения срока службы аккумуляторов. Эффективность решений по выравниванию заряда и обеспечению температурного режима должна определяться с учетом эффекта от увеличения срока службы накопителей и сокращением потерь энергии в них.

Обоснование основных параметров аккумуляторных модулей

Далее выполнен анализ условий, в наибольшей степени влияющих на количество и схему соединения элементов в составе модуля.

Энергоемкость, габариты и масса. Мощность построенных за последнее десятилетие серий локомотивов изменяется от 880 кВт (ТЭМ18ДМ) до 6600 кВт (ЭП20), изменяясь между массовыми сериями ступенями по 600–1000 кВт, т. е. 10–15 % от максимальной. Чтобы обеспечить применимость в широком диапазоне мощности ТПС, необходимо ограничить энергоемкость модуля 1000–2000 МДж. Для обеспечения маневровых передвижений могут быть использованы модули



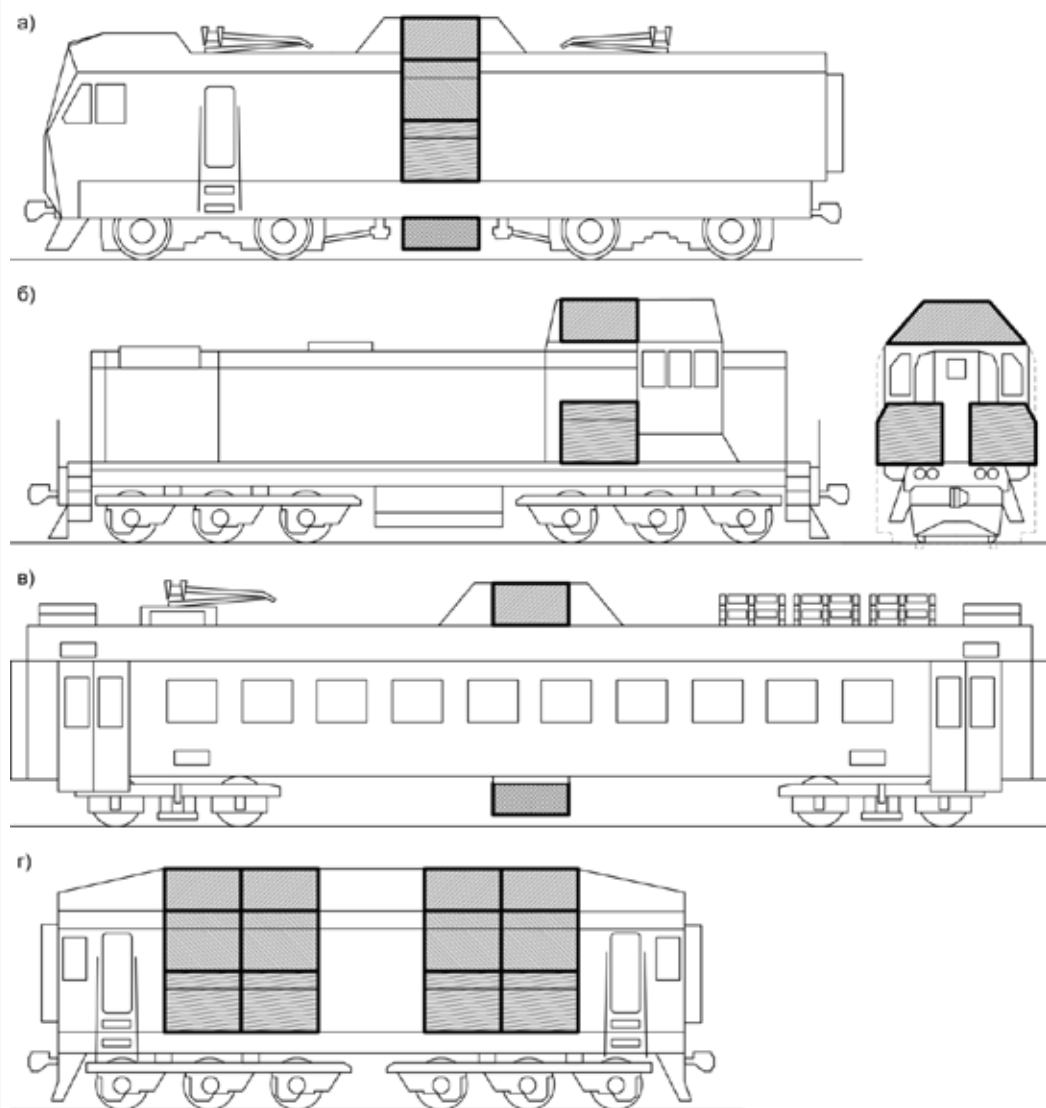


Рис. 2. Возможные варианты размещения модульных накопителей энергии: а – на магистральных локомотивах, б – на маневровых локомотивах, в – на моторвагонном подвижном составе, г – на специализированной секции. Количество модулей может варьироваться в зависимости от цели установки накопителя [выполнено автором].

энергоемкостью 100–200 МДж. Помимо требования кратности энергоемкостей НЭ и отдельного модуля при различии в назначении НЭ и мощности локомотива, размеры модулей ограничиваются также конструктивными и эксплуатационными требованиями.

Для снижения потерь тепла в зимнее время, сокращения массы корпуса и теплоизоляции целесообразно сократить наружную поверхность модуля, приняв близкие габаритные размеры по всем осям, а также увеличить размеры и запас энергии модулей. Для обеспечения свободы компоновки перспективных локомотивов и упрощения их проектирования желательно, наоборот, уменьшить размеры

модулей. Возможность использования массовой грузоподъемной техники и транспортировки модулей автомобильным транспортом требует, чтобы масса модуля была ограничена 5 т либо 10 т¹⁸. Уточнение их параметров требует учета конструктивных требований, определяющих возможность размещения и обслуживания модулей на подвижном составе.

При разработке предложений была поставлена задача разбить объем, допускающий размещение накопителей в габарите подвижного состава, на части равного сечения, чтобы

¹⁸ ГОСТ 1575-87 Краны грузоподъемные. Ряды основных параметров. – М.: ИПК изд-во стандартов, 2002. – 9 с.

уравнять длину и энергоемкость модулей. Как показано на рис. 1, в сечении габарита 1-Т¹⁹ возможно выделить шесть зон сечением около 2 м² каждая. Это позволяет принять массу одиночного модуля равной 5 т, а длину 1,7–1,8 м. Возможные компоновочные решения для разных применений накопителей представлены на рис. 2.

Для накопителей, размещаемых в кузове локомотива, предложено симметричное их расположение при сохранении между модулями прохода шириной 600 мм. Нижнюю границу зоны расположения накопителей предложено установить на высоте 1800 мм от уровня головки рельса (УГР), что определено размерами рам большинства серий локомотивов. Верхняя граница задана в соответствии с очертанием габарита 1-Т. Такая схема позволяет устанавливать модули как вертикально, подъемным краном, так и горизонтально, при помощи погрузчиков.

Высота верхней точки крыши (без учета оборудования) современных одноэтажных электропоездов и пассажирских вагонов не превышает 4400 мм от УГР. Поэтому предложено размещение модулей в пределах габарита 1-Т выше этого уровня. Накопители, размещаемые под вагоном, предлагается разместить в пределах габарита до высоты 1000 мм, что определяется наименьшим стандартным диаметром колеса.

Номинальное напряжение. Величина номинального напряжения тягового накопителя также является одним из факторов, наиболее тесно связанных с главными конструктивными решениями локомотивов. Накопитель является источником энергии тягового электрооборудования так же, как контактная сеть электровоза либо тяговый генератор теплового (далее называемые первичным источником энергии).

Учитывая, что заряд НЭ требует возможности плавного регулирования напряжения на нем, можно предполагать, что накопители найдут применение в первую очередь на подвижном составе с четырехквadrантными тяговыми преобразователями. Только в этом случае реализуется возможность приема энергии торможения и достигаются все преимущества накопления энергии. Как исключение, может быть применен менее энерго-

эффективный, но более простой вариант установки зарядного преобразователя на контактно-аккумуляторном подвижном составе с сохранением контактного регулирования скорости.

Поскольку накопитель подключается к тяговому преобразователю, его диапазон рабочих напряжений должен приблизительно соответствовать диапазону напряжений первичного источника энергии. Такое решение упростит схему и повысит КПД преобразования энергии.

Для обоснования уровня напряжения выполнен обзор характеристик современного ТПС с асинхронным тяговым приводом^{20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27}. На ТПС с возможностью питания от контактной сети 3 кВ напряжение звена постоянного тока, как правило, соответствует напряжению контактной сети. В остальных случаях напряжение, как правило, принимается в диапазоне 1400–2800 В. Минимальный его уровень должен быть достаточен для формирования инвертором напряжения на тяговом двигателе. Поскольку асинхронные тяговые двигатели не имеют ограничений по коммутации, для оптимизации характеристик статорных обмоток их номинальное линейное напряжение выбирают в диапазоне 1,4–2,5 кВ [18, 19].

Можно ожидать, что ряд типов ТПС сохранит возможность прямого подключения тягового преобразователя к сети 3 кВ. Поэтому целесообразно принять номинальное напряжение накопителя соответствующим напряже-

²⁰ Зайцев Г. К. Устройство, эксплуатация и ремонт тепловозов серии 2ТЭ25А (2ТЭ25К). – М.: ОАО «РЖД», 2014. – 400 с. ISBN 978-5-89035-733-5.

²¹ Преобразовательная техника [Электронный ресурс]: https://dals.spb.ru/index.php/ru/preobrazovatel'naya_tekhnika. Доступ 22.05.2023.

²² Электропоезд с асинхронным тяговым приводом типа ЭГЭ серии ЭС2Г: Руководство по эксплуатации ЭС2Г.0.00.000.000–01 РЭЗ. – Книга 4. – Екатеринбург: ОАО «Уральские локомотивы», 2016. – 106 с.

²³ Электропоезд пригородного следования городского типа ЭГ2Тв модель 62–4496: Руководство по эксплуатации 4496.00.00.000 РЭ. – Тверь: ОАО «ТВЗ», 2016. – 536 с.

²⁴ Осинцев И. А., Логинов А. А. Устройство и эксплуатация электровоза 2ЭС10. – М.: ОАО «РЖД», 2014. – 334 с. ISBN 978-5-89035-786-1.

²⁵ Смагляков Д. А. Устройство и эксплуатация электровоза ЭП20. – М.: ОАО «РЖД», 2015. – 361 с. ISBN 978-5-89035-787-8.

²⁶ ЦТ-453/08 Правила эксплуатации электропоездов серии КЗ4А. – Астана, 2008. – 446 с.

²⁷ Загорцев В. А. и др. Грузовой электропоезд БКГ-1. – Гомель: БелГУТ, 2021. – 271 с. ISBN 978-985-554-958-2.

¹⁹ ГОСТ 9238-2013 Габариты железнодорожного подвижного состава и приближения строений. – М.: ИПК изд-во стандартов, 2014. – 178 с.



Таблица 3

Основные характеристики модульных тяговых накопителей энергии для установки на подвижном составе [выполнено автором]

Тип НЭ	LiFePO ₄	Li ₄ Ti ₅ O ₁₂	КДЭС
Масса, т	5		
Объем, м³	от 3,0, в зависимости от зоны размещения		
Емкость, кВт·ч	625	300	15
Мощность разряда, кВт	1200	6000	не ограничена для тяговых накопителей
Мощность заряда, кВт	600	6000	
Номинальное напряжение, В	3000		
Номинальный ток, А	400	2000	> 5000



нию контактной сети постоянного тока. Стандартный диапазон напряжений контактной сети составляет 2000–3600 В²⁸, что практически совпадает с рабочими напряжениями литий-титанатной батареи номинальным напряжением 3070 В из 1330 элементов.

Установка индивидуальных преобразователей напряжения в накопительных модулях представляется нецелесообразной. Современные полупроводниковые приборы имеют высокую единичную мощность. Применение единого тягово-зарядного преобразователя сократит массу, объем и общую стоимость оборудования, упростит систему управления. Отказ от преобразователей напряжения в составе модулей накопителя повысит также общую надежность системы. Высокая мощность модулей обеспечит возможность их непосредственного параллельного соединения.

Емкость и мощность. Основные параметры предложенных модулей в заданных габаритах представлены в табл. 3. Емкость модуля на основе литий-титанатных аккумуляторов составит 300

кВт·ч, а номинальная мощность – 6000 кВт, что делает допустимой установку на локомотиве даже одиночного модуля.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе отмечены перспективы создания новых серий подвижного состава железных дорог с бортовыми накопителями энергии и перечислены задачи, которые должны быть решены при их применении. Обоснована целесообразность разделения задач проектирования локомотивов и накопительных модулей. Приведен перечень требований, выполнение которых обеспечит взаимозаменяемость накопительных модулей. Выполнена оценка удельных мощности и емкости модулей для различных вариантов их применения.

Предложено применение унифицированных модулей массой 5 т. Например, установка 2–3 модулей на секции грузового локомотива мощностью 3000 кВт позволит обеспечить постоянство нагрузки на его первичный источник энергии. Установка одного модуля на секции электропоезда мощностью 1200 кВт позволит не только решить эту задачу, но и обеспечить автономный ход дальностью около 100 км. В даль-

²⁸ ГОСТ 29322-92 (МЭК 38–83) Стандартные напряжения. – М.: Изд-во стандартов, 1992. – 7 с.

нейшем эти рекомендации могут быть уточнены, однако решение этой задачи потребует выполнить анализ условий эксплуатации подвижного состава с накопителями энергии, учитывая особенности планируемых участков его обращения.

В перспективе область применения накопителей будет увеличиваться по мере снижения стоимости аккумуляторов, развития альтернативных материалов с меньшей стоимостью и разработки новых типов накопителей с большей энергоемкостью. Стандартизация и обеспечение взаимозаменяемости накопителей не только упростит и ускорит появление новых технологий, но и создаст ряд новых возможностей по их применению. Это делает целесообразным учет требований к НЭ уже на этапе задания параметров перспективных типов подвижного состава.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Перспективы тяговых аккумуляторных батарей на железнодорожном транспорте // Железные дороги мира. – 2023. – № 1. – С. 43–48. [Электронный ресурс]: <https://zdmira.com/articles/perspektivy-tyagovykh-akkumulyatornykh-batarej-na-zheleznodorozhnom-transporte>. Доступ 22.05.2023.
2. Battery traction recharges decarbonisation fight. [Электронный ресурс]: <https://www.railjournal.com/in-depth/battery-traction-recharges-decarbonisation-fight/>. Доступ 22.05.2023.
3. Yu Miao, Hynan, P., von Jouanne, A., Yokochi, A. Current Li-Ion Battery Technologies in Electric Vehicles and Opportunities for Advancements. *Energies*, 2019, Vol. 12, Iss. 6, article ID 1074. DOI: 10.3390/en12061074.
4. Незевак В. Л., Шатохин А. П. Характеристика тяговой нагрузки для определения параметров накопителя электрической энергии // Мир транспорта. – 2018. – Т. 16. – № 2 (75). – С. 84–94. DOI: 10.30932/1992-3252-2018-16-2-8.
5. Логинова Е. Ю., Кузнецов Г. Ю. Повышение тяговых характеристик тепловоза с гибридной энергетической установкой // Мир транспорта. – 2022. – Т. 20. – № 3 (100). – С. 21–29. DOI: 10.30932/1992-3252-2022-20-3-3.
6. Валинский О. С., Евстафьев А. М., Никитин В. В. К вопросу определения емкости накопителя энергии для тягового подвижного состава железных дорог // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2021. – № 2. – С. 8–11. [Электронный ресурс]: <http://eet-journal.ru/upload/iblock/93a/16167j3bpgez0e4eg5atib9ea6wqk2ei.pdf>. Доступ 22.05.2023.
7. Сычугов А. Н. Программа расчета параметров накопителей электрической энергии для автономного тягового

подвижного состава: свидетельство о регистрации программы для ЭВМ. – Рег. № 2022619798 от 26.05.2022. Заявка № 2022618257 от 05.05.2022.

8. Шевлюгин М. В., Желтов К. С., Плетнев Д. С., Глушенко М. Д. Экспериментальное исследование автономного хода электроподвижного состава метрополитена // Электротехника. – 2021. – № 9. – С. 19–21. [Электронный ресурс]: <http://www.znack93.ru/images/archive/2021/09–2021.pdf>. Доступ: 22.05.2023.

9. Штанг А. А., Ярославцев М. В. Контактно-аккумуляторный маневровый электровоз с накопителем энергии на основе литий-ионных аккумуляторов // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2016. – № 1. – С. 13–16. [Электронный ресурс]: <http://eet-journal.ru/upload/iblock/1f2/9t3gxbj6vx070j9idtu2n7tp9k8gfv6.pdf>. Доступ: 22.05.2023.

10. Ярославцев М. В., Щуров Н. И., Аносов В. Н. Энергоэффективный тяговый привод городского безрельсового транспорта. – Новосибирск: Издательство НГТУ, 2017. – 135 с. ISBN 978-5-7782-3274-7.

11. Кузнецов Г. Ю., Логинова Е. Ю. Повышение технических характеристик автономных локомотивов с литий-ионной тяговой батареей // Известия Транссиба. – 2022. – № 4 (52). – С. 57–65. [Электронный ресурс]: [http://izvestia-transsiba.ru/images/journal_pdf/2022–4\(52\).pdf](http://izvestia-transsiba.ru/images/journal_pdf/2022–4(52).pdf). Доступ 22.05.2023.

12. Zhou Chengke, Qian Kejun, Allan, M., Zhou Wenjun. Modeling of the Cost of EV Battery Wear Due to V2G Application in Power Systems. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2011, Vol. 26, pp. 1041–1050. DOI: 10.1109/TEC.2011.2159977.

13. Rosenkranz C., Kohler U., Liska J. L. Modern battery systems for plug-in hybrid electric vehicles. *Power*, 2007, Vol. 1, 100. [Электронный ресурс]: <https://dspace.tul.cz/server/api/core/bitstreams/b7580d40–7453–449d-9200–7601400c6569/content>. Доступ 22.05.2023.

14. Спиридонов Е. А., Ярославцев М. В. Оценка эффективности применения накопителей энергии на карьерном железнодорожном транспорте // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 12/2. – С. 241–256. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_122_0_241.

15. Gallardo-Lozano, J., Romero-Cadaval, E., Milanés-Montero, M. I., Guerrero-Martinez, M. A. Battery equalization active methods. *Journal of power sources*, 2021, Vol. 246, pp. 934–949. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2013.08.026.

16. Xing Yinjiao, Ma Eden, W. M., Tsui Kwok, L., Pecht, M. Battery management systems in electric and hybrid vehicles. *Energies*, 2011, Vol. 4, Iss. 11, pp. 1840–1857. DOI: 10.3390/en4111840.

17. Nema, P., Muthukumar, P., Thangavel, R. Review on Thermal Management System of Li-Ion Battery for Electric Vehicle. In: *Sustainable Energy Generation and Storage: Proceedings of NERC 2022*, Springer Nature, 2023. pp. 165–184. DOI: 10.1007/978-981-99-2088-4_14.

18. Андрищенко А. А., Бабков Ю. В., Зарифьян А. А. [и др.]. Асинхронный тяговый привод локомотивов – М.: УМЦ по образованию на ж. д. транспорте, 2013. – 413 с. ISBN 978-5-89035-631-4.

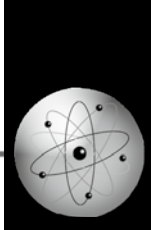
19. Щербаков В. Г., Петрушин А. Д., Хоменко Б. И., Седов В. И. Тяговые электрические машины. – М.: УМЦ по образованию на ж. д. транспорте, 2016. – 641 с. ISBN 978-5-89035-926-1.

Информация об авторе:

Ярославцев Михаил Викторович – кандидат технических наук, ассоциированный профессор кафедры электротехники и автоматизации Некоммерческого акционерного общества «Торайгыров университет» (НАО «Торайгыров университет»), Павлодар, Республика Казахстан, myaroslavtsev@yandex.ru.

Статья поступила в редакцию 06.06.2023, актуализирована 20.12.2023, одобрена после рецензирования 26.12.2023, принята к публикации 27.12.2023.





НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 656.2:621.313:621.331:621.311

DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-6-7>

Исследование асинхронного тягового электродвигателя с наклонными пазами ротора



Александр ЗУЕВ



Михаил ГЛУЩЕНКО

Александр Сергеевич Зув¹,
Михаил Дмитриевич Глущенко²

Российский университет транспорта,
Москва, Россия.

¹ ORCID 0000-0001-8873-9800;

РИНЦ Author ID: 836869.

✉ ¹ aleksandr-zuev-1987@mail.ru.

АННОТАЦИЯ

Модернизация подвижного состава железных дорог, являющаяся актуальной в целях повышения эффективности железнодорожного транспорта, может проводиться в том числе путём улучшения характеристик тягового привода, а именно конструкции тяговых электродвигателей, что и явилось целью настоящей работы.

Предложена конструкция и представлены результаты исследования характеристик асинхронного тягового электродвигателя с короткозамкнутой обмоткой ротора для пассажирского электровоза, принципиальной особенностью которого является наклонная форма пазов ротора.

Результаты экспериментального и компьютерного моделирования подтвердили положительный эффект применения в конструкции асинхронного тягового двигателя ротора с наклонными пазами, заключающийся в уменьшении тока в обмотках и снижении потерь двигателя.

Полученные результаты повышения технических характеристик асинхронного тягового двигателя за счет применения в его конструкции ротора с наклонными пазами позволяют рекомендовать такие двигатели для использования на локомотивах.

Ключевые слова: железнодорожный транспорт, асинхронный электродвигатель, тяговый электродвигатель, эксперимент, физическое моделирование, энергосбережение, потери электроэнергии, потери мощности, оптимизация.

Для цитирования: Зув А. С., Глущенко М. Д. Исследование асинхронного тягового электродвигателя с наклонными пазами ротора // Мир транспорта. 2023. Т. 21. № 6 (109). С. 60–64. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-6-7>.

Полный текст статьи на английском языке публикуется во второй части данного выпуска.
The full text of the article in English is published in the second part of the issue.

ВВЕДЕНИЕ

В условиях конкуренции с современными видами транспорта, такими как автомобильный и авиационный, изобретённый два века назад железнодорожный транспорт требует внедрения новых технических решений для повышения своей эффективности, снижения капитальных затрат и эксплуатационных расходов, включающих затраты на энергопотребление. Задача повышения доходов и инвестиционной привлекательности бизнеса в сфере перевозок сегодня очень актуальна.

Модернизация подвижного состава может проводиться в том числе путём улучшения характеристик тягового привода, а именно конструкции тяговых электродвигателей.

Цель работы заключалась в повышении технических характеристик тяговых асинхронных электродвигателей.

Задачами исследований являлись выбор технического решения, создание макета, экспериментальное исследование эффекта от проведенной модернизации, разработка модели тягового электродвигателя локомотива, расчет технического эффекта с помощью компьютерного моделирования.

Методами работы являлись анализ патентов и научных публикаций в области конструкций тяговых электродвигателей, экспериментальное исследование действующего макета электродвигателя (на основе разработанной экспериментальной установки для его испытаний), компьютерное моделирование электромагнитных процессов в тяговом электродвигателе и расчет потерь.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Постановка задачи. Выбор и обоснование предлагаемой конструкции асинхронного двигателя

Анализ научных публикаций (например, [1–3]) и патентов [4] выявил наличие интереса учёных разных стран мира к разработке электрических машин с наклонными пазами ротора. В связи с тем, что в настоящее время вопрос внедрения таких электрических машин на локомотивах является открытым, целесообразно провести исследование характеристик такого тягового двигателя и определить целесообразность его внедрения.

На новых электровозах, электропоездах и тепловозах для железных дорог России

устанавливают асинхронные тяговые электродвигатели с короткозамкнутой обмоткой ротора («беличьей клеткой»). Для такой конструкции ротора в научной литературе и патентах разных лет найдено техническое решение, связанное с изготовлением не радиальных пазов (рис. 1а), а с наклоном относительно радиуса (рис. 1б). Согласно Г. К. Жерве, такая конструкция «беличьей клетки» позволяет увеличить мощность электродвигателя [5].

Новизна настоящего исследования заключается в том, что найденная конструкция пазов ротора будет изучаться не с точки зрения увеличения мощности, а с точки зрения снижения потерь мощности в двигателе.

Экспериментальное исследование

Анализ литературы показал, что широкое применение физические модели электрических машин ранее нашли, в частности, в экспериментальных исследованиях кафедры электромеханики Московского энергетического института [6].

Для решения задачи экспериментального исследования влияния наклона пазов ротора на потери энергии в электродвигателе в рамках настоящего исследования был в лабораторных условиях изготовлен макет двухфазного асинхронного электродвигателя (рис. 2) с двумя вариантами ротора, отличающимися формой пазов (рис. 1). Один ротор имеет прямые пазы, другой ротор имеет наклонные пазы. Площади сечения стержней «беличьей клетки» ротора одинаковы у обоих вариантов. Макет оборудован блоком задания и измерения фрикционной нагрузки. Измерение нагрузки производилось динамометром во время отключения электропитания. Также стенд оборудован такими измерительными приборами, как лазерный тахометр, ваттметр, амперметр, вольтметр. Электродвигатель получает двухфазное синусоидальное электропитание от источника с регулируемым

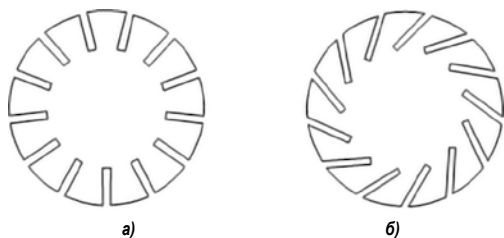


Рис. 1. Сравнимые варианты конструкции пазов ротора: а – прямые пазы, б – наклонные пазы [рисунок авторов].



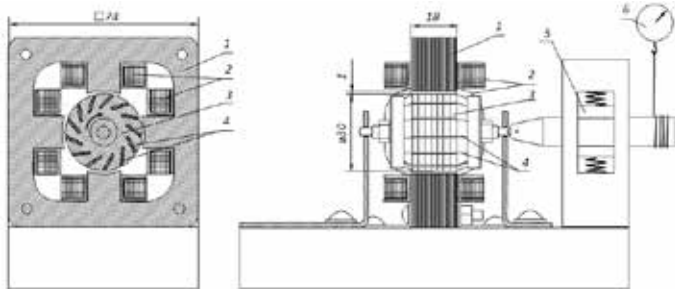


Рис. 2. Схема экспериментальной установки: 1 – статор; 2 – обмотки статора; 3 – ротор; 4 – проводники ротора; 5 – регулируемая фрикционная нагрузка; 6 – динамометр [схема авторов].

Таблица 1

Результаты испытаний макета двухфазного асинхронного двигателя с роторами с прямыми и наклонными пазами [экспериментальные данные авторов]

Направление вращения	Средние значения по двум направлениям	вперёд	назад
Форма пазов ротора	прямые	наклонные	наклонные
Частота вращения n , об/мин	1579	1574	1613
Момент M , Н·м	0,00209	0,00213	0,00212
Мощность двигателя P_2 , Вт	0,341	0,349	0,353
Ток фазы статора $I_{\phi 1}$, А	0,548	0,398	0,627
напряжение фазы статора $U_{\phi 1}$, В	22,06	13,43	21,41
Потребляемая мощность P_1 , Вт	11,04	8,06	14,04
Коэффициент мощности $\cos \phi$ (усреднённый по 20 значениям)	0,468	0,741	0,517
Потери ΔP , Вт	10,70	7,71	13,69

уровнем напряжения. Значение выбранной частоты питающего напряжения составило 182 Гц. Это значение соответствует частоте питания тяговых двигателей электровоза ЭП20 при максимальной скорости движения.

В процессе испытаний проводились запуски макета двигателя при плавном увеличении напряжения питания с фиксацией показаний приборов при частотах вращения 1200, 1800,

2200 об/мин. Было выполнено по 20 измерений для каждого из трёх вариантов конфигурации двигателя: прямые пазы, пазы с наклоном в направлении вращения ротора, пазы с наклоном против направления вращения ротора.

Результаты измерений приведены в таблице 1.

Коэффициент мощности определялся по следующему соотношению [7]:

$$\cos \phi = \frac{P_1}{m U_{\phi 1} I_{\phi 1}},$$

где $m = 2$ – число фаз статора макета двигателя;

P_1 – потребляемая макетом двигателя мощность, Вт;

$U_{\phi 1}$ – напряжение фазы статора, В;

$I_{\phi 1}$ – ток фазы статора, А.

В процессе испытаний зарегистрировано снижение на 28 % потерь мощности ΔP в электродвигателе в направлении вращения, указанном стрелкой на рис. 2, после установки ротора с наклонными пазами при сопоставимых моментах и частотах вращения. При этом в направлении вращения, противо-

Таблица 2
Анализ потерь мощности, кВт, в тяговых электродвигателях типовой и разработанной конструкций [расчетные данные авторов]

Конструктивный элемент	Типовая конструкция	Разработанная конструкция с наклонными пазами ротора
Стальной пакет статора	12,59	13,97
Обмотка статора	10,62	9,86
Медная клетка ротора	0,22	0,20
Стальной пакет ротора	28,04	23,41
Подшипники	5,54	5,54

положном указанному стрелкой на рис. 2, зарегистрированы повышенные потери мощности ΔP .

В макете инновационного двигателя в прямом направлении вращения зарегистрировано значительное увеличение коэффициента мощности $\cos \phi$ на 58 % по сравнению с классическим вариантом.

Исследование асинхронного тягового двигателя с наклонными пазами ротора для пассажирского электровоза

С целью оценки эффективности применения найденного в литературе [5] технического решения в конструкции тягового двигателя ДТА-1200А пассажирского электровоза ЭП20¹ [8] было выполнено двухмерное компьютерное моделирование магнитного поля и электромеханических процессов с помощью конечно-элементного программного пакета COMSOL, также использованного в работах [9–11] (для моделирования электромагнитных процессов учёные используют также программные пакеты ANSYS Maxwell [12–14], ELCUT [15], ELMEC, FEATool, FEMM [16], Siemens Simcenter MAGNET, Simcenter Motorsolve, JMAG Designer [17], ANSYS Motor-CAD).

В продолжительном режиме работы при мощности 1100 кВт и частоте вращения 1766 об/мин минимум потерь мощности в тяговом электродвигателе соответствует углу наклона пазов ротора 12° к радиальному направлению ротора. Это значение угла оказалось максимально реализуемым по условию выполнения баланса мощности для двигательного режима:

$$mU_{\phi 1} I_{\phi 1} \cos \phi = P_2 + \Delta P,$$

при этом потребовалось увеличить толщину и уменьшить высоту зубцов за счёт уменьшения ширины и глубины пазов для недопущения снижения магнитного потока, величина которого связана с напряжением питания.

За счёт такой оптимизации геометрии магнитопровода двигателя с точки зрения продолжительной работы в одном из направлений вращения в разработанном тяговом электродвигателе потери мощности снижаются на 7 %

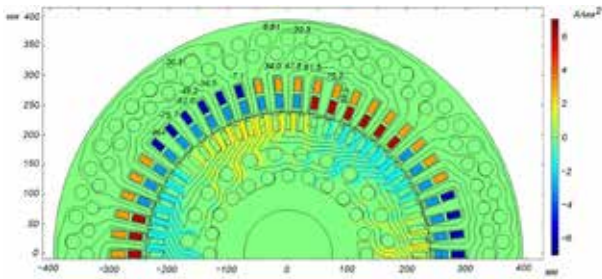


Рис. 3. Асинхронный тяговый двигатель ДТА-1200А электровоза ЭП20: токораспределение и векторный потенциал электромагнитного поля, мВб/м, в поперечном сечении в продолжительном режиме работы [расчётные данные авторов].

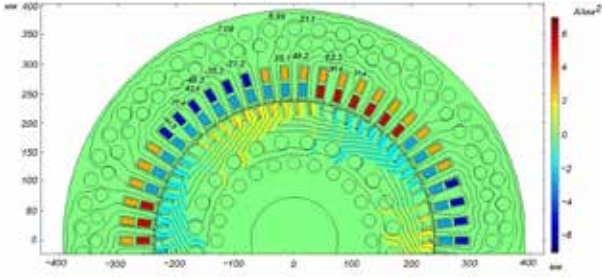


Рис. 4. Проект инновационного тягового двигателя: токораспределение и векторный потенциал электромагнитного поля, мВб/м, в поперечном сечении в продолжительном режиме работы [расчётные данные авторов].

за счёт снижения потерь мощности в стали ротора на 17 % (табл. 2). Снижение потерь в обмотке статора и медной короткозамкнутой клетке ротора вызвано снижением потребляемого тока на 3,8 %, повышение потерь в стальном пакете статора вызвано повышением магнитного потока на 3,4 %.

Существующий вариант конструкции тягового двигателя с результатами моделирования магнитного поля представлен на рис. 3. Разработанный инновационный вариант тягового двигателя с результатами моделирования магнитного поля представлен на рис. 4.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования методами эксперимента и математического моделирования продемонстрирован энергосберегающий эффект применения выбранного технического решения – оригинальной конструкции пазов ротора асинхронного электродвигателя, имеющих наклон к радиальному направлению ротора.

С помощью компьютерного моделирования рассчитан технический эффект применения выбранного технического решения в конструкции тягового асинхронного элект-



¹ ТС.085.003 РЭЗ Электровоз магистральный ЭП20. Руководство по эксплуатации. Книга 3. Электрические машины. ООО «ТРТранс», 2012. – 21 с.



родвигателя пассажирского электровоза, заключающийся в снижении потерь мощности в двигателе на 7 %.

Анализ конечно-элементной модели двигателя выявил снижение потерь мощности в большинстве конструктивных элементов двигателя: в стальном пакете ротора на 17 %, в медной клетке ротора на 9 %, в обмотке статора на 7 % при повышении потерь мощности в стальном пакете статора на 11 %.

Предлагаемая конструкция двигателя позволяет снизить его потери мощности на 7 % и потребляемый ток на 3,8 %.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Yang, Yu. Synchronous Machine for Unidirectional Application. Master thesis. Stockholm: Royal Institute of Technology, 2012. [Электронный ресурс]: <https://studylib.net/doc/18711791/synchronous-machine-for-unidirectional-application?ysclid=ls4osyiv8h214895671>. Доступ 26.07.2023.
2. Petrov, I., Ponomarev, P., Pyrhönen, J. Asymmetrical Geometries in Electrical Machines. International Review of Electrical Engineering, 2016, February, Vol. 11, Iss. 1. DOI: 10.15866/iree.v11i1.7739.
3. Zahangir, T. Analysis of asymmetrical features of an electric machine. Master of Science Thesis – Göteborg, Chalmers University of Technology, 2018. [Электронный ресурс]: <https://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/256298/256298.pdf>. Доступ 26.07.2023.
4. Виноградов А. А., Шишов А. В., Седов М. К., Каиров А. А., Сидоров А. О. Патентообладатель Шишов А. В. Патент RU180432U1 Российская Федерация, МПК H02K 99/00. Электродвигатель с косыми магнитными полями / № 2017120558; заявл. 14.06.17; опубл. 14.06.18, Бюл. № 17. [Электронный ресурс]: <https://patents.google.com/patent/RU180432U1/ru>. Доступ 26.07.2023.
5. Жерве Г. К. Обмотки электрических машин. – Л.: Энергоатомиздат, 1989. – 400 с. ISBN 5-283-04458-0.
6. Иванов-Смоленский А. В. Электромагнитные поля и процессы в электрических машинах и их физическое моделирование. – М.: Энергия, 1969. – 304 с.
7. Находкин М. Д., Василенко Г. В., Бочаров В. И., Козорезов М. А. Проектирование тяговых электрических машин. – М.: Транспорт, 1976. – 624 с.
8. Зарифьян А. А. Повышение энергетической эффективности пассажирских электровозов с асинхронным тяговым приводом при питании от сети постоянного тока / Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – Ростов-на-Дону, РГУПС, 2016. – 24 с. [Электронный ресурс]: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_006653235/. Доступ 26.07.2023.
9. Автайкин И. Н., Квон А. М. Сравнительный анализ эффективности использования активных материалов радиальных и аксиальных асинхронных машин электро-

привода технологических установок // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. – 2019. – № 1 (367). – С. 70–73. EDN: YZILPF.

10. Казаков Ю. Б., Стулов А. В., Никифоров М. И., Киселев М. А. Разработка и исследование тягового синхронного электродвигателя с инкорпорированными в ротор магнитами для электромотоцикла // Вопросы электротехнологии. – 2022. – № 2 (35). – С. 89–97. EDN: VRBTME.

11. Чирков Д. А., Ключников А. Т., Коротаев А. Д., Тимашев Э. О. Сравнение методов расчёта электромагнитных процессов на примере цилиндрического линейного вентильного двигателя // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2018. – № 28. – С. 76–91. EDN: VQADWU.

12. Ермолаев А. И., Гордеев Б. А., Охулков С. Н., Титов Д. Ю. Программа для исследования магнитного шума и вибрации асинхронного электродвигателя // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2022669927, 26.10.2022. Заявка № 2022669399 от 21.10.2022. EDN: KNGBEV.

13. Ермолаев А. И., Ерофеев В. И., Плехов А. С., Титов Д. Ю. Исследование магнитной вибрации асинхронного электродвигателя посредством МКЭ-моделирования // Интеллектуальная электротехника. – 2021. – № 3 (15). – С. 37–56. EDN: QZGGPR.

14. Сироткин В. В., Пигалев Д. А., Больших И. В., Черняев С. С. Применение специализированного программного обеспечения для расчета распределения магнитного поля в витках обмотки статора вентильно-индукторных электродвигателей // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2022. – Т. 8. – № 4. – С. 58–73. EDN: RFMZKH.

15. Симаков А. В., Огневский А. С. Моделирование режимов работы тягового электродвигателя методом конечных элементов // В сб.: Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте. Материалы научной конференции, посвященной Дню Российской науки. – Омск: ОмГУПС, 2019. – С. 196–201. EDN: UZOSKZ.

16. Авдеев А. И. Автоматизация расчета магнитного поля асинхронного электродвигателя в программе FEMM // В сб.: «Информационные технологии, энергетика и экономика (электроэнергетика, электротехника и теплоэнергетика, математическое моделирование и информационные технологии в производстве)». Сб. тр. XVIII международной научно-техн. конференции студентов и аспирантов: в 3 т. – Т. 1. – Смоленск, 2021. – С. 121–126. EDN: JXYDOE.

17. Волков С. В., Горячев О. В., Ефромеев А. Г., Степочкин А. О. Расчет параметров математической модели электрического шагового двигателя гибридного типа на основе анализа картины магнитостатического поля // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2019. – Т. 20. – № 8. – С. 482–489. <https://doi.org/10.17587/mau.20.482-489>.

Информация об авторах:

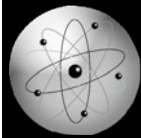
Зуев Александр Сергеевич – аспирант кафедры электропоездов и локомотивов Российского университета транспорта, Москва, Россия, aleksandr-zuev-1987@mail.ru.

Глуценко Михаил Дмитриевич – доктор технических наук, профессор кафедры электропоездов и локомотивов Российского университета транспорта, Москва, Россия, tr.gluschenko@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 23.11.2022, одобрена после рецензирования 27.06.2023, принята к публикации 01.08.2023.

• Мир транспорта. 2023. Т. 21. № 6 (109). С. 60–64

Зуев А. С., Глуценко М. Д. Исследование асинхронного тягового электродвигателя с наклонными пазами ротора



Цифровизация элементной базы пассажи́рского вагона на примере ремонта колесной пары



Дмитрий ЕВСЕЕВ



Андрей ШИНКАРУК



Юрий КУЛИКОВ

Дмитрий Геннадьевич Евсеев¹, Андрей Сергеевич Шинкарук², Юрий Михайлович Куликов³

^{1, 3} Российский университет транспорта, Москва, Россия,

² Акционерное общество «Федеральная пассажирская компания», Москва, Россия.

✉ ³ kulikov.yu@mail.ru.

АННОТАЦИЯ

Вопросы удовлетворения потребностей в перевозке пассажиров с обеспечением надлежащего уровня комфортности и безопасности всегда являются первостепенными при ремонте подвижного состава.

Создание автоматизированных комплексов для обеспечения ремонта и технического обслуживания позволяют как систематизировать сам процесс ремонта, так и осуществлять четкое и своевременное планирование материальных и производственных ресурсов. Цифровизация производственного процесса позволяет сформировать слаженный функционал и связать производственные и экономические показатели для обеспечения сбалансированной загрузки ремонтного участка, а впоследствии и предприятия в целом, а формирование единого цифрового комплекса позволяет раскрыть потенциал совершенствования технологической базы.

В данной работе использованы объектно-ориентированный и эвристический методы исследования формирования программно-аппаратного комплекса «цифрового»

ремонта колесной пары. Предметом исследования являются технологические операции и производственные процессы приемки и ремонта пассажирской колесной пары. Объектом исследования является процесс организации ремонта элементной базы подвижного состава на эксплуатационном этапе жизненного цикла. Авторами изложены основные характеристики организации ремонта пассажирской колесной пары от ее приемки и дефектации до выпуска в эксплуатацию после текущего, среднего или, соответственно, капитального ремонта. Особое внимание уделяется процессам взаимодействия руководителей и исполнителей на каждом этапе ремонта. Новизна исследования заключается в применении системного подхода к использованию цифровых технологий в производственном процессе для получения аналитических данных и формирования экономико-производственных показателей. Основные выводы обосновывают создание аппаратно-программного комплекса «цифрового двойника» пассажирского участка по ремонту колесных пар.

Ключевые слова: железнодорожный транспорт, колесная пара, элемент колесной пары, оборот, редуктор, цифровизация, роликовый подшипник.

Для цитирования: Евсеев Д. Г., Шинкарук А. С., Куликов Ю. М. Цифровизация элементной базы пассажирского вагона на примере ремонта колесной пары // Мир транспорта. 2023. Т. 21. № 6 (109). С. 65–71. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-6-8>.

Полный текст статьи на английском языке публикуется во второй части данного выпуска.

The full text of the article in English is published in the second part of the issue.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время цифровизация производственных процессов является наиболее перспективным подходом в части оптимизации технологических и экономических показателей [1]. Вместе с тем данное направление с точки зрения науки является недостаточно изученным [2; 3]. В пассажирском комплексе уделяется серьезное внимание выполнению производственного процесса, а также его анализу при проведении промежуточных операций [4; 5]. Однако повышение качества и снижение производственных издержек требуют постоянного внимания и нуждаются в непрерывном совершенствовании, а выполнение технологического процесса всегда является приоритетной задачей [6; 7], для решения которой применяются инновационные подходы, обеспечивающие более прозрачное выполнение регламентных процедур и контроль за заложенными в нормативно-технической документации параметрами [8; 9].

Наибольший объем внепланового ремонта пассажирских вагонов (52 %) связан с наличием дефектов на поверхности катания колесных пар (выщербина, ползун, равномерный прокат, остроконечный накат и т. д.) и в целях формирования необходимого их оборотного запаса, а также снижения простоя вагона в нерабочем парке требуется обеспечить своевременное и оперативное проведение текущего ремонта. Для этого на пунктах технического обслуживания необходимо создавать и поддерживать необходимое количество и номенклатуру запасных частей и материалов, которые должны корректироваться в зависимости от загруженности производственного участка, интенсивности движения и курсирующих на данном направлении моделей подвижного состава.

На текущий момент в пассажирском комплексе существует 21 модификация пассажирских колесных пар, которые отличаются между собой по:

- конфигурации буксовых узлов (для подкатки под тележку с люлечным/безлюлечным подвешиванием, отдельная конфигурация буксовых узлов вагонов, курсирующих в международном сообщении);
- расстоянию между тормозными дисками (в зависимости от типа исполнения тормозной системы);

– типу установленного подшипника в буксовый узел (роликовый, кассетный);

– типу редуктора (для вагонов с энергосистемой 32 кВт и 28 кВт, а также для вагонов с 32 кВт и системой дискового торможения).

Как следствие, принимаемые на структурных предприятиях меры по своевременному выпуску вагонов из ремонта, несмотря на получаемый профилактический эффект, в полной мере не снимают существующую проблему – обеспечить наличие необходимого оборотного количества колесных пар и сбалансировать показатель «себестоимость – качество» [6; 7], а также минимизировать простой вагона в нерабочем парке.

Для повышения эффективности управления колесно-роликовыми участками сформирован программный алгоритм, позволяющий автоматизировать процессы учета оборота колесных пар в пассажирском вагонном депо, процесс управления, отслеживание в режиме реального времени выполнения производственной программы, наличие и номенклатуру запасных частей и материалов, а также анализировать экономико-производственные показатели [7; 8; 10].

Указанная система позволяет добиться реализации поставленных задач по следующим основным направлениям¹ [11]:

- оптимизация планирования ремонта на колесно-роликовом участке;
- контроль выполнения ремонта колесных пар на протяжении всего производственного процесса;
- планирование запасных частей и материалов;
- определение «узких мест» при выполнении технологических операций;
- цифровизация учетно-отчетной системы;
- определение себестоимости ремонта колесных пар на производственном участке;
- интеграция цифровой модели в существующие системы управления технологическим процессом ремонта элементной базы пассажирского вагона.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Задачей, решаемой в рамках данного исследования, является анализ функциональности цифрового программного алгоритма процесса

¹ Об утверждении форм внутреннего первичного учета ОАО «РЖД» по вагонному хозяйству. Распоряжение № 1545/р от 21.06.2023 – М.: ОАО «РЖД», 2023.

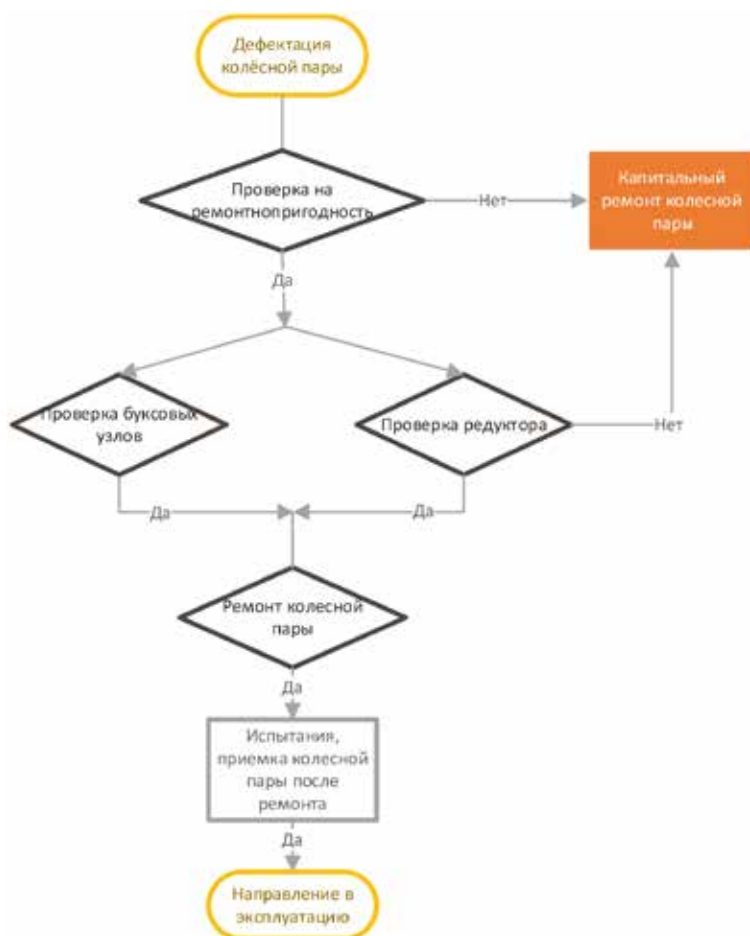


Рис. 1. Структура ремонта колесной пары на примере редукторной колесной пары [выполнено авторами].

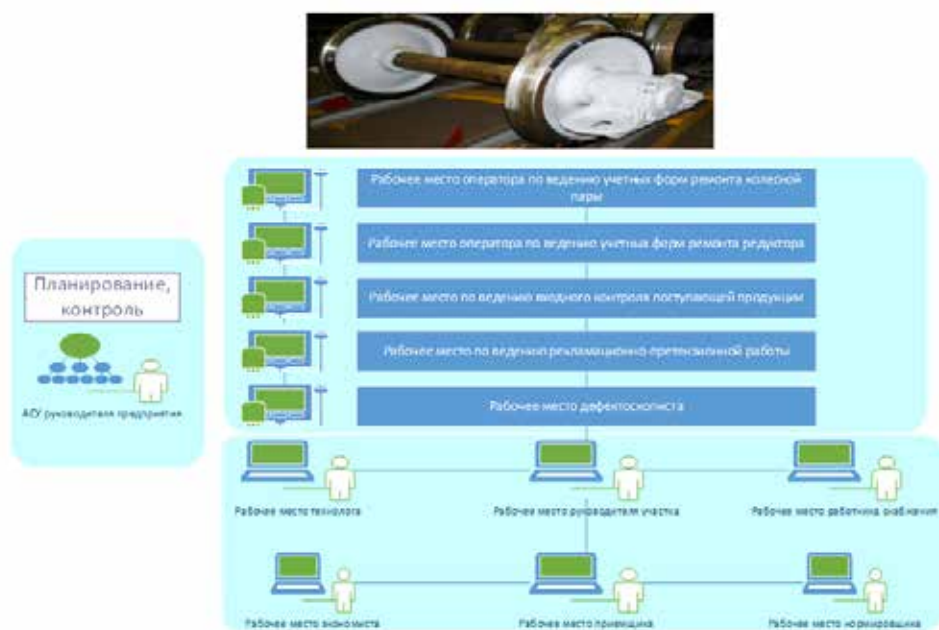
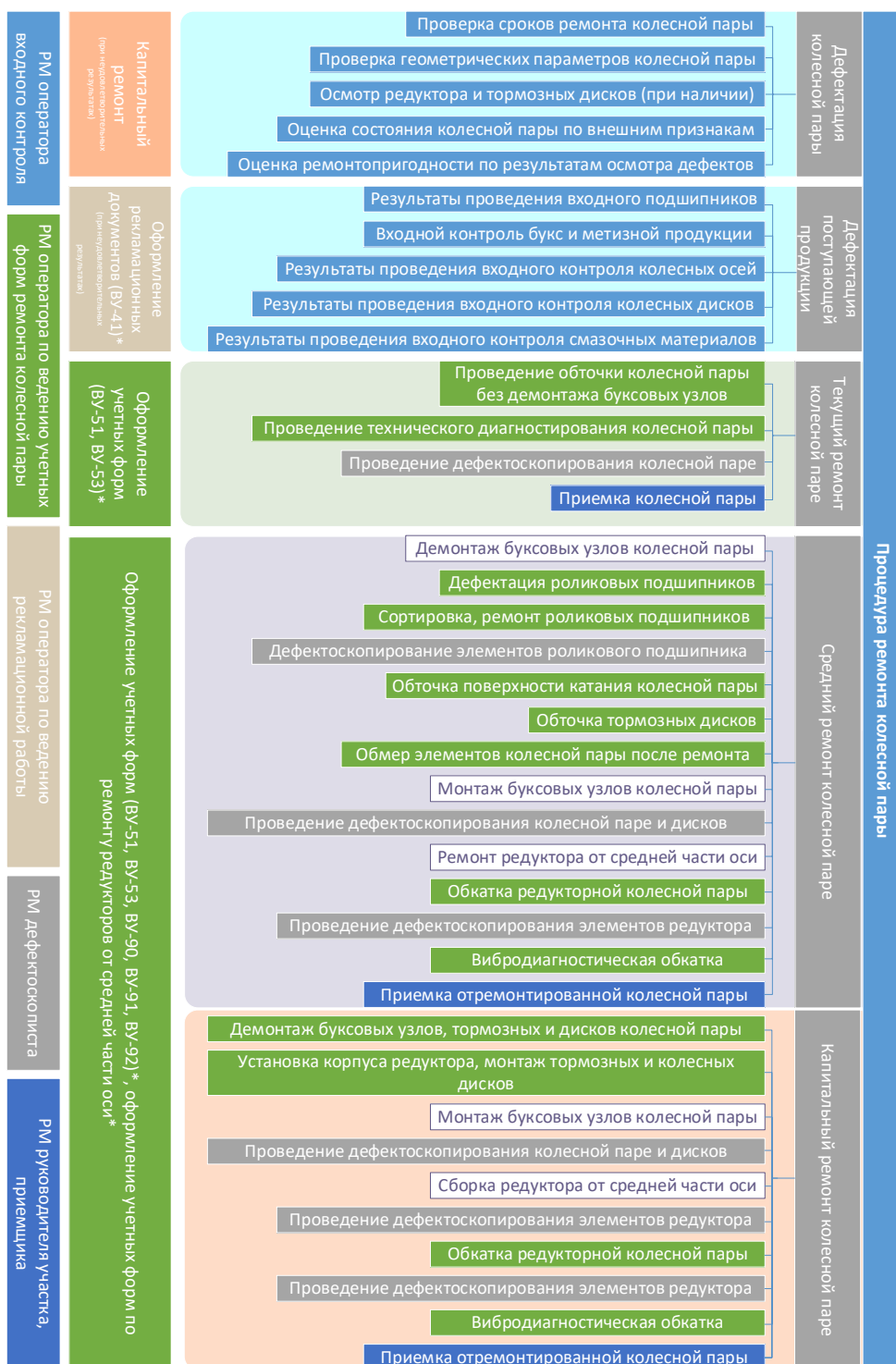


Рис. 2. Иерархическая структура цифровых рабочих мест участка по ремонту колесных пар [выполнено авторами].



* – заполнение учетных форм осуществляется в цифровом формате программного комплекса.
Рис. 3. Пооперационная цифровая модель ремонта колесной пары [выполнено авторами].



ремонта колесной пары через обеспечение контроля и учета по основным индикаторам – поступление колесной пары в ремонт, входной и пооперационный контроль ремонта элементной составляющей колесной пары. В число пооперационных процессов входят:

- приемка колесной пары;
- дефектовка колесной пары, определение ремонта;
- диагностирование;
- ремонт;
- сборка;

- монтаж;
- обкаточные испытания (диагностирование);
- приемка и выдача исправной колесной пары в эксплуатацию.

Строгая последовательность и иерархическая структура занесения данных позволяют исключить упрощение в выполнении технологического процесса, при этом контролировать сам процесс с рабочих мест руководителей различного производственного уровня проще, что в конечном итоге повышает производительность и качество ремонта вагона в целом. Структурная система на примере ремонта редукторной колесной пары приведена на рис. 1.

Работа на данном программно-аппаратном комплексе строится на основе жизненного цикла элементной базы колесной пары, а также соответствующих технологических карт (рис. 2). В рамках вышеперечисленных операций предусмотрена реализация рабочих мест (далее РМ) исполнителей и руководителей производственного уровня предприятия (рис. 3):

- РМ руководителя предприятия;
- РМ руководителя участка;
- РМ приемщика;
- РМ технолога;
- РМ оператора по ведению учетных форм ремонта колесной пары и результатов испытаний;
- РМ оператора по ведению учетных форм ремонта редуктора от средней части оси и результатов испытаний;
- РМ оператора (слесаря по ремонту подвижного состава) по ведению результатов входного контроля поступающей продукции;
- РМ оператора по ведению рекламационно-претензионной работы;
- РМ дефектоскописта;
- РМ экономиста;
- РМ снабженца;
- РМ работника подразделения труда и заработной платы.

Рабочие места пользователей оборудуются на базе персональных и/или носимых (в том числе бесклавиатурных) терминалов.

Таким образом, на основании структуры цифровых рабочих мест можно разделить их на три основных блока:

- планирование и контроль (уровень руководителя);
- контроль поэтапного выполнения технологических операций и приемка их, осуществ-

ствление поставки необходимого количества запасных частей и деталей, учет финансово-экономических показателей (линейный уровень);

- внесение результатов ремонта, осмотра, неразрушающего контроля и диагностирования (исполнительский уровень);

Использование переносимых и стационарных терминалов позволяет вести и отслеживать проведение всех производственных операций в режиме реального времени, что, в свою очередь, повышает ответственность персонала за качество выполнения производственных процедур и исключает нарушение пооперационного выполнения технологического процесса. Ввод информации в режиме реального времени осуществляется на основании идентификации пользователя, что позволяет вести персональный анализ выполненных операций конкретным работником в течение рабочей смены, а также исключает внесение данных неидентифицированными пользователями.

По завершению производственного цикла исполнителем делается отметка о завершении этапа. Таким образом, программно-аппаратный комплекс позволяет перейти на последующее выполнение операции по ремонту колесной пары. В случае незанесения контрольных параметров или результатов оценки состояния элементной базы колесной пары, кнопка завершения этапа будет неактивной и перейти на следующий этап выполнения технологических операций будет невозможно. В случае внесения в автоматизированную систему управления данных, не входящих в допустимый контролируемый диапазон, данный элемент будет идентифицирован как неисправный и отправлен либо в повторный ремонт, либо в брак.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Особенности ремонта колесных пар пассажирских вагонов состоят в гораздо большей их номенклатуре, чем используемых в вагонном комплексе. Для формирования необходимого технологического запаса колесных пар и обеспечения своевременного и качественного их ремонта реализована цифровая модель пооперационного процесса приемки и ремонта, алгоритм которого представлен на рис. 3. Временем начала выполнения технологических операций является приемка колес-



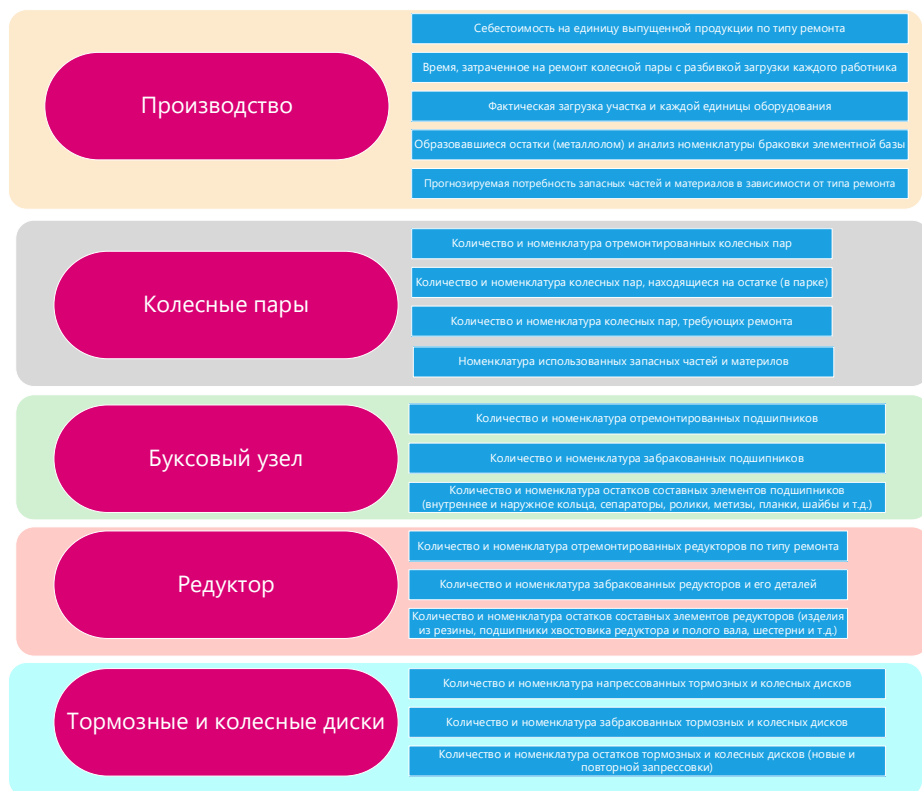


Рис. 4. Структура цифровых показателей работы колесно-роlikового участка [выполнено авторами].

ной пары в ремонт и его дефектовка, приемщиком по результатам дефектации принимается решение об объеме дальнейшего ремонта (текущий, средний или капитальный).

После приемки колесной пары в ремонт и после обточки результаты заносятся в «цифровой» аналог учетной формы ВУ-53 «Журнал ремонта и оборота колесных пар»¹. Далее колесная пара передается на позицию дефектоскопирования и в случае выявления несоответствий, дефектов на элементах колесной пары делается соответствующая отметка о необходимости повторного ремонта или браковка колесной пары. При положительном решении колесная пара комиссионно принимается и признается годной для ее дальнейшей эксплуатации.

При проведении дефектации поступающей продукции (поставка новых запасных частей и материалов) в случае выявленных несоответствий элементной базы формируется первичная информация о причинах и количестве забракованных деталей для последующего составления акта рекламации формы ВУ-41¹ и возврата продукции поставщику на основании ведения рекламационно-

претензионной работы. В случае, если при проведении дефектации составные части не попадают под процедуру рекламационно-претензионной работы, они утилизируются.

После проведения дефектации колесной пары ее передают на позицию разборки, где, по результатам разборки буксовых узлов осуществляется их передача в роlikовое отделение, остальные элементы направляются на обмывку и ремонтно-дефектационные позиции, а также проведение неразрушающего контроля. В роlikовом отделении производится ремонт и последующая сортировка роlikов, сепараторов, наружных и внутренних колец. По результатам ремонта и дефектоскопирования, подшипники в сборе передаются в монтажное отделение. Колесной паре и остальным элементам в это же время проводят ремонтные работы по обточке поверхности катания с последующим дефектоскопированием, дефектацию и ремонт корпусов букс. В монтажном отделении на колесную пару устанавливаются подшипники, производится выходное диагностирование колесной пары и осуществляется окончательная приемка отремонтированной колесной пары.

При ремонте колесной пары с редуктором от средней части оси после монтажа буксовых узлов она направляется в редукторное отделение, где проводятся регламентные работы по ремонту редуктора и обкатке под нагрузкой.

При проведении среднего и капитального ремонта колесной пары выполняются последовательные действия, приведенные на рис. 3, после которых колесная пара признается годной и допускается к эксплуатации. Окончанием ремонта считается время комиссионной приемки колесной пары.

Таким образом, в результате цифровизации процесса ремонта пассажирской колесной пары формируется итоговый отчет за выбранный период по экономико-технологическим параметрам (рис. 4). По результатам анализа можно оценить такие показатели, как фактическая загрузка, выполненная работа каждым работником участка, себестоимость на единицу отремонтированной продукции по его типу (текущий, средний и капитальный ремонт), номенклатура использованных запасных частей и материалов, затрачиваемое время на соответствующий ремонт одной колесной пары.

ВЫВОДЫ

Реализованная программно-аналитическая модель управления технологическим процессом ремонта пассажирской колесной пары обеспечивает пооперационное выполнение технологических этапов, учет затраченного времени персонала, запасных частей и материалов, структуру повреждаемости колесных пар, а также является залогом повышения качества ремонта вагона в целом.

Данная система является универсальной платформой, позволяющей выстраивать технологические операции на других производственных участках пассажирского вагоноремонтного предприятия, обеспечить контроль технологической дисциплины на каждом этапе ремонта, а также мониторить фактическую загрузку оборудования, персонала,

а также финансовых и материальных ресурсов в режиме реального времени на каждую отремонтированную единицу.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Белинский А. А., Лакин И. К., Аболмасов А. А. Принцип «Встроенное качество» в информационных системах локомотиворемонтного комплекса // Бюллетень результатов научных исследований. – 2015. – № 3–4 (16–17). – С. 13–28. EDN: VKICUX.
2. Липа К. В., Гриненко В. И., Лянгасов С. Л. [и др.]. Автоматизированная система управления надежностью локомотивов (АСУНТ). Концепция ТМХ–Сервис. – М.: ТМХ–Сервис, 2012. – 160 с. ISBN 978-5-9904767-1-4.
3. Лакин И. К., Семенов А. П. Использование технологии «цифровой двойник» при управлении ремонтом локомотивов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2019. – Т. 63. – № 3. – С. 89–98. DOI: 10.26731/1813-9108.2019.3(63).89-98.
4. Цифровизация сервиса вагонов: революционные проекты ТМХ. Сайт «Управление производством». [Электронный ресурс]: http://www.uppro.ru/library/information_systems/toir/tsifrovizatsiya-servisa-vagonov.html. Доступ 25.08.2023.
5. Цифровой завод. MES система завода. 2050. / Тр. конф. по цифровым двойникам. Интегратор. – М.: Сколково, 2019. [Электронный ресурс]: <https://2050-integrator.com/digital-factory/?ysclid=lsu9qabpnr329746644>. Доступ 25.08.2023.
6. Кулагин В., Сухаревски А., Мефферт Ю. Настольная книга по цифровизации бизнеса. – М.: Альпина PRO, 2022. – 293 с. ISBN 978-5-6042320-7-1.
7. Пустовой И. В. Разработка информационно-динамической модели управления сервисным техническим обслуживанием и ремонтом локомотивов / Дисс... канд. техн. наук. – Омск: Изд-во ОмГУПС, 2018. – 181 с. [Электронный ресурс]: https://www.usurt.ru/uploads/main/065/5b97add2b36f8/%D0%94%D0%B8%D1%81%D1%81%D0%B5%D1%80%D1%82%D0%B0%D1%86%D0%B8%D1%8F_%D0%9F%D1%83%D1%81%D1%82%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%B3%D0%BE_%D0%98%D0%B%D1%8C%D0%B8_%D0%92%D0%BB%D0%B0%D0%B4%D0%B8%D0%BC%D0%B8%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%B8%D1%87%D0%B0.pdf. Доступ 28.09.2023.
8. Рубцов А. А. Управление производством на заводах по ремонту подвижного состава железных дорог. – М.: Транспорт, 1988. – 262 с. ISBN 5-277-00103-4.
9. Соколов М. М. Диагностирование вагонов. – М.: Транспорт, 1990. – 197 с. ISBN 5-277-00930-2.
10. Шантаренко С. Г. Совершенствование технологической готовности технического обслуживания и ремонта тягового подвижного состава / Дисс... канд. техн. наук. – Омск: ОмГУПС, 2006. – 419 с.
11. Цифровая трансформация отраслей: стартовые условия и приоритеты: докл. к XXII Апр. междунар. науч. конф. по проблемам развития экономики и общества, Москва, 13–30 апр. 2021 г. / Нац. исслед. ун-т «Высшая школа экономики». – М.: Издательский Дом Высшей школы экономики, 2021. 239 с. ISBN 978-5-7598-2270-7 (e-book). ●

Информация об авторе:

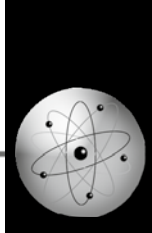
Евсеев Дмитрий Геннадьевич – доктор технических наук, профессор кафедры технологии транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава Российского университета транспорта, Москва, Россия, evseev.dg@gmail.com.

Шинкарук Андрей Сергеевич – кандидат технических наук, главный ревизор по безопасности движения поездов Акционерного общества «Федеральная пассажирская компания», Москва, Россия, Shinkarukas@mail.ru.

Куликов Юрий Михайлович – аспирант Российского университета транспорта, Москва, Россия, kulikov.ym@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 03.11.2023, одобрена после рецензирования 27.12.2023, принята к публикации 29.12.2023.





НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 531.3:656.022.846:624.19

DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-6-9>

Моделирование динамического воздействия высокоскоростного подвижного состава на заглубленные сооружения тоннельного типа



Андрей ВАТАЕВ



Ян ВАТУЛИН



Владимир КАВКАЗСКИЙ

Андрей Сергеевич Ватаев¹, Ян Семенович Ватулин², Владимир Николаевич Кавказский³

^{1, 2, 3} Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Санкт-Петербург, Россия.

✉ ³ Kavkazskiy_yn@mail.ru.

АННОТАЦИЯ

В статье рассматривается задача оценки степени влияния вибрационного воздействия высокоскоростного подвижного состава на несущие элементы заглубленного водопропускного сооружения тоннельного типа. В частности, рассмотрен процесс формирования направленного импульса механических колебаний, излучаемого рельсошпальной решеткой под воздействием движущейся, динамической нагрузки, с наличием двукратного фазового перехода между слоями грунта с различными физико-механическими свойствами. Численное моделирование осуществлено в среде Comsol в нестационарной постановке с по-

строением систем дифференциальных уравнений движения и последующим решением с применением метода конечных элементов. Установлен волновой характер распределения деформаций и ускорений в толще грунта, с тенденцией резкого снижения интенсивности энергетических процессов в пределах глубин заложения 5–7 м. Для коллекторов значительной толщины обделки характерна работа конструкции коллектора преимущественно на изгиб, для конструкции с меньшей толщиной стенки и большим диаметром тоннеля характерны высокие продольные и вертикальные нагрузки.

Ключевые слова: железнодорожный транспорт, сооружения тоннельного типа, напряженно-деформированное состояние, динамическое исследование, распределение модальных (эффективных) долей массы конструкции.

Для цитирования: Ватаев А. С., Ватулин Я. С., Кавказский В. Н. Моделирование динамического воздействия высокоскоростного подвижного состава на заглубленные сооружения тоннельного типа // Мир транспорта. 2023. Т. 21. № 6 (109). С. 72–84. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-6-9>.

Полный текст статьи на английском языке публикуется во второй части данного выпуска.
The full text of the article in English is published in the second part of the issue.

ВВЕДЕНИЕ

В процессе строительства и реконструкции высокоскоростных магистралей существенной проблемой является оценка эксплуатационной надежности сооружения на участках пересечения путей с заглубленными объектами тоннельного типа.

Совершенствование проектных решений требует системного подхода к анализу и обобщению данных об эксплуатационной надежности элементов сооружений с учетом как техногенных, так и природных факторов внешнего воздействия.

Непосредственный сбор данных о текущем состоянии инженерных сооружений крайне трудоемок и сопряжен с риском безопасности нахождения экспертов в тоннеле. Решением вопроса может быть применение численного эксперимента на основе математического моделирования.

Моделирование режимов нагружения тоннельных сооружений выполнено в рамках комплексного изучения инженерно-геологических условий и получения материалов, необходимых для разработки проектной документации реконструкции технологической площадки ст. «Обухово», г. Санкт-Петербург, на участках вблизи Фермского, Южного шоссе и Обводного канала.

В целом статья является представлением результатов исследования реконструируемых технологических площадок ряда станционных участков, расположенных на территории города Санкт-Петербург. Устройство земляного полотна, конструкции инфраструктурных элементов соответствуют реальному прототипу. В п. 4 Технического регламента Таможенного союза «О безопасности высокоскоростного железнодорожного транспорта» (ТР ТС 002/2011, с изменениями на 14 сентября 2021 года), а также в ГОСТ Р 55056–2012 «Транспорт железнодорожный. Основные понятия. Термины и определения» (статья 39) дается определение высокоскоростного подвижного состава, а именно: «высокоскоростной железнодорожный подвижной состав» – железнодорожный подвижной состав, состоящий из моторных и немоторных вагонов и предназначенный для перевозки пассажиров и (или) багажа, а также почтовых отправок со скоростью более 200 км/ч.». Авторы руководствовались указанным определением.

Целью работы является анализ напряженно-деформированного состояния несущих элементов заглубленных сооружений тоннельного типа под воздействием высокоскоростного подвижного состава (ВСПС) на основе методик моделирования методом конечного элемента.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Движение высокоскоростного транспорта является фактором техногенной сейсмичности, при котором формируется направленное периодическое механическое смещение подстилающей среды под верхним строением пути, при колебательном воздействии на него со стороны движущегося подвижного состава. В данном динамическом исследовании основное внимание уделяется усилиям, вызванным взаимосвязью между поступательными и крутильными колебаниями, возникающими за счет наличия эксцентриситета между центрами массы и жесткости сооружения.

Под исследуемым сооружением в настоящей статье понимается тоннельное сооружение – коллектор. Основное внимание в статье уделяется процессу динамического нагружения коллектора. При этом элементы верхнего строения пути редуцированы, – заменены эквивалентом.

В отношении коллектора следует обратить внимание на особенности конструктивного исполнения сечений, а также свойства материалов составных элементов, которые определяют соответствующий модуль Юнга и момент инерции текущего сечения. Формирующиеся характерные перемещения при косом изгибе определяют плоскость, расположенную перпендикулярно нейтральной линии сечения, по которой будет перемещаться центр тяжести сечения относительно (т.е. с эксцентриситетом) этой нейтральной линии¹ (см. далее в тексте рис. 2).

Функциональная математическая модель объекта представляет собой некоторый «эквивалент», состоящий из соотношений, связывающих между собой фазовые переменные, т.е. внутренние, внешние и выходные параметры системы. Практическая реализация модели выполнена на основе метода конечных

¹ Белорусско-российский университет. Учебные материалы. Сопротивление материалов. [Электронный ресурс]: http://cdo.bru.by/course/distan/PGS/sopromat_6sem_pgsdz/Fail/lekcher_11.pdf.



элементов, позволяющего формализовать в математической форме структуру объекта, геометрию компонентов, условия и законы их взаимодействия между собой и с окружающей средой. Данное определение используется в литературе, в частности в².

В настоящей работе рассмотрено численное моделирование в среде Comsol в нестационарной постановке: кинематическое и динамическое исследование с построением систем дифференциальных уравнений движения с последующим решением, а также анализ напряженно-деформированного состояния объекта с применением метода конечных элементов.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Любая обобщенная цифровая модель объекта исследования редуцирована (упрощена) в описательном смысле относительно реального прототипа. В данном случае объект, инициирующий силовое воздействие (подвижной состав), а также передаточный элемент (устройство верхнего строения пути) с целью снижения размерности задачи заменены эквивалентом в виде излучателя механического возбуждения, представленного как след (отпечаток) рельсошпальной решетки на дневной поверхности массива породы, к которому приложена динамическая поездная нагрузка³.

При прохождении фронта волны через слои массива породы с разной акустической жесткостью упругие волны меняют свое направление, возникают явления отражения и преломления волн³, в результате чего исследуемый объект – коллектор – подвергается механическому воздействию энергии упругой волны.

Данный факт подтверждает конфигурация эпюры векторного представления распространения фронта упругой волны (см. далее в тексте рис. 9).

Рассматриваемый объект водопропускного сооружения представляет собой двухкомпонентный тоннель, армированный железобетонной рубашкой, с железобетонным

лотком и торкретом свода, находящийся на глубине 11–7,46 м от дневной поверхности массива грунта.

Массив состоит из балластного слоя пути и грунта. На дневной поверхности массива находится рельсошпальная решетка, которая представлена двумя балками фасонного профиля (рельсами), опертыми на шпалы с эпюрой 1840 шт./км. Рельсошпальная решетка нагружена сосредоточенными силами, расположенными в точках контакта поверхности катания головки рельса и обода колес тележек движущегося подвижного состава.

К особенностям рассматриваемой задачи следует отнести факт формирования направленного импульса механических колебаний, излучаемого рельсошпальной решеткой под воздействием движущейся, динамически изменяющейся во времени нагрузки, с наличием двукратного фазового перехода между слоями грунта с различными физико-механическими свойствами.

Для оценки нагруженности свода водопропускного сооружения необходимо установить механизм формирования условий взаимодействия между подшпальным основанием и верхним строением пути, с учетом динамической нагрузки от подвижного состава, условий передачи динамических нагрузок между балластным слоем и грунтом, и грунта с элементами тоннеля.

С этой целью необходимо реализовать следующий алгоритм:

1. Составить расчетную схему для определения изгиба кровли водопропускного тоннеля с помощью конечных элементов, используя подходы теории упругости. Сложность аналитического решения заключается в том, что объект представляет собой систему взаимодействующих между собой сред с различными упруго-пластическими свойствами, а также динамическим режимом нагружения.

2. Определить механизм формирования направленного импульса механических колебаний, излучаемого рельсошпальной решеткой при воздействии динамической нагрузки, возникающей при движении высокоскоростного состава типа «Сапсан» (VelaroRus).

3. Установить механизм передачи направленного импульса механических колебаний в дискретной среде балластного слоя в подрельсовой зоне, грунте и кровле тоннельного сооружения.

² Шмитько Е. И. Процессы и аппараты в технологии строительных материалов и изделий: Учеб. пособие: Т. 1 (вопросы теории). – Воронеж, Воронеж. гос. арх. – строит. ун-т., 2009. – 348 с. С. 50.

³ Основание – принцип Гюйгенса: каждая точка среды, вовлеченная в волновое движение, становится источником новой волны излучения энергии колебаний в окружающую среду.

4. Построить векторную поверхность зависимости распределения давления во времени в поперечном сечении системы «балластный слой–грунт–тоннель».

5. Определить значения продольного изгиба кровли тоннельного сооружения.

Кинематическая модель подвижного состава (высокоскоростного пассажирского поезда VelaroRUS (ЭВС1/ЭВС2 «Сапсан») и грузового электровоза (ЭС10) представляет собой сплотку редуцированных массогабаритных моделей ходовых тележек подвижного состава. В зависимости от типа локомотива и скорости движения среднее значение вертикальной нагрузки колеса на рельс принято согласно требованиям Правил расчета пути, ГОСТ Р 55513–2013 «Локомотивы».

Функциональная зависимость нагружающего усилия верхнего строения пути получена в результате кинематического моделирования колебательного процесса надрессорной части подвижного состава с учетом условий контактирования обода колеса с поверхностью катания головки рельса [1].

С целью адекватного описания характера опирания рельсо-шпальной решетки необходимо учитывать характеристики отпора постели шпал. Зависимость давления под постелью шпалы от параметров верхнего строения пути изучали М. Ф. Веригу [2], А. Н. Яшнов [3], М. А. Чернышев [4], Г. М. Шахуянец [5]. По рекомендациям [5] осадка за счет деформаций железобетонных шпал и креплений принимается 5–25 % от общей осадки рельса, осадка за счет деформаций балластного слоя 75–95 %. По известным значениям $E_{по}$ модуль упругости балластного слоя $E_{б}$ находится в интервале 50...400 МПа [3].

Распределение давления в балластном слое с учетом неравномерности его передачи через шпалы вдоль и поперек оси пути, определяется с помощью решения задачи Буссинеска. Для балласта возможно применение понятия «однородного грунта» (С. Н. Попов [6]). Угол передачи давления в щебне фракции 25–60 мм, что соответствует ГОСТ 7392-2014, составляет 45°–50°, что позволяет применять при расчете давления в балласте формулы механики сплошной среды и, как следствие, метод конечных элементов [4; 5; 7].

Рельс рассматривается как протяженная балка Тимошенко, испытывающая деформации сдвига. Жесткость связей в продольном

направлении оси пути 250 МН/м, в поперечном направлении оси пути – 140 МН/м. Жесткость связей на сжатие – 110 МН/м (Huan Feng [8]).

Моделирование контакта шпал с балластом и балласта с грунтом осуществлено с помощью упругих связей, позволяющих балласту «скользить» по поверхности земляного полотна, шпалы при этом имеют одностороннюю связь с поверхностью балласта. Уточненное моделирование балластного слоя осуществлено с помощью упругих связей (элемент типа «spring»), соединяющих шпалы и балласт.

Рельсы и шпалы объединены по смежным узлам в области подкладок упругими связями, жесткость которых позволяет смещаться рельсу относительно шпал. Продольная жесткость упругих связей «рельс–шпала» при железобетонных шпалах принята по данным экспериментальных исследований [9] креплений КБ как $S_x = 8900$ кН/мм при нормативном уровне закрутки болтов.

Деформативные характеристики объемных конечных элементов, используемых при моделировании балластного слоя, определены в работах С. В. Ефимова [10], А. Н. Яшнова [3], В. ДеКорте (W. DeCorte) и Ф. Ван Богерта (Ph. Van Bogaert) [11].

Постановка задачи

Модель участка поверхности представляет собой прямоугольный параллелепипед с размерами 60 x 60 или 30 x 30 метров и высотой 15 м. С целью исключения влияния краевых эффектов геометрические размеры расчетного массива грунта пятикратно превышают размеры поперечного сечения тоннельного сооружения. По оси параллелепипеда расположена модель насыпи в виде прямоугольника высотой 0,4 м. Железнодорожный путь представлен в виде упрощенной модели, в которой отсутствует детализированное отображение рельса и шпалы. Размеры подошвы шпалы 2,7 x 0,3 м. Высота рельса соответствует типу Р75. Расстояние между осями шпал (0,54 м) соответствует эпюре 1840 шт./км. Коллектор рассматривается в виде цилиндра с наружным диаметром 2094 мм и внутренним – 1500 мм. Поперечное сечение лотка определяется в соответствии с технической документацией заказчика. Глубина заложения тоннеля варьируется в соответствии с техническим заданием и лежит в диапазоне от 7,46 (участок вблизи



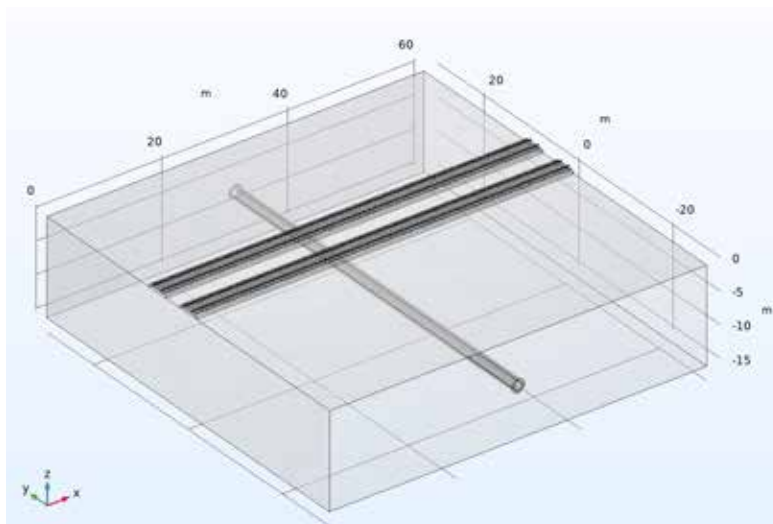


Рис. 1. Общий вид модели [разработана авторами].

Южного шоссе) до 11 метров (участок вблизи Фермского шоссе) от дневной поверхности. При моделировании колебательных процессов рассмотрены два пути. Первый путь проложен вдоль оси симметрии модели и параллелен оси X . Второй проходит параллельно первому. Расстояние между осями путей 6500 мм.

Рассматриваются случаи прохождения ВСПС по главному пути с нахождением на соседнем пути грузового поезда, а также при свободном пути.

На рис. 1 приведен общий вид расчетной модели пересечения путей и коллектора.

При моделировании приняты следующие упрощения и допущения:

1. Грунт, в котором расположен коллектор, представляет собой изотропную среду с неизменными параметрами. Слоистая структура не учитывается. Свойства грунта описываются с помощью модели Мора–Кулона со следующими параметрами: плотность грунта 1850 кг/м^3 , модуль Юнга 20 МПа , коэффициент Пуассона $0,27$, удельное сцепление 29 кПа , угол внутреннего трения 18° [12].

2. Балласт является изотропной средой, свойства которой описываются с помощью модели Мора–Кулона со следующими параметрами: плотность грунта 1850 кг/м^3 , модуль Юнга 18 МПа , коэффициент Пуассона $0,3$, удельное сцепление 1 кПа , угол внутреннего трения 15° [6].

3. Бетон коллектора и шпал рассматривается как эластичный линейный материал

с плотностью 2300 кг/м^3 и упругими свойствами, представленными в табл. 1.

4. Пустоты между поверхностью коллектора и грунтом, а также шпалами и балластом отсутствуют.

5. Форма поперечного сечения рельса и шпал оказывает пренебрежимо малое влияние на колебательные процессы и распределение напряжений в толще грунта и объеме коллектора.

6. Упругие свойства рельсового крепления моделируются с помощью тонкого упругого слоя, расположенного в зоне контакта поверхности шпалы и рельса. Жесткость рельсового крепления соответствует свойствам крепления типа АРС-4 [4; 10; 13], а именно: по осям X и Y (горизонтальное перемещение) $346 \cdot 10^6 \text{ Н/м}$, по оси Z (вертикальное перемещение) $37 \cdot 10^6 \text{ Н/м}$. Данный тип крепления был выбран по причине его применения на высокоскоростных и высоконагруженных участках.

Статический расчет напряженно-деформированного состояния коллектора

В качестве предварительной оценки несущей способности элементов конструкции определены максимальные значения напряжений в бетоне коллектора по осям X , Y и Z (см. табл. 1) от воздействия статической нагрузки.

Анализ результатов показывает, что максимальные значения напряжения характерны для участка коллектора, расположенного вблизи Южного шоссе, что объясняется ма-

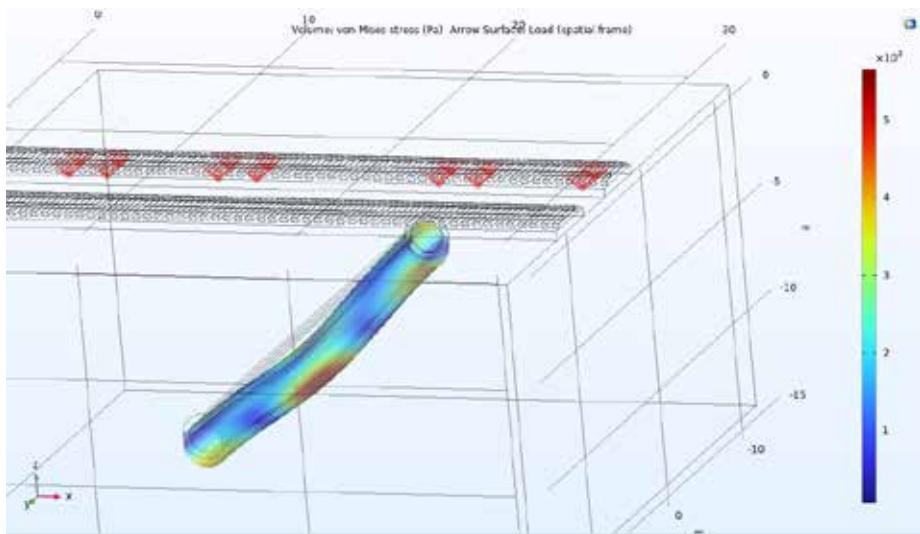


Рис. 2. Результат расчета деформаций коллектора на участке вблизи Южного шоссе под действием статической поездной нагрузки. Масштаб деформаций увеличен для наглядности [выполнено авторами].

лой глубиной заложения коллектора (7,46 м). Результат расчета деформаций коллектора для указанного участка представлен на рис. 2. Из рисунка видно, что максимальные напряжения соответствуют растяжению нижней поверхности коллектора.

Полученные значения напряжений и деформаций коллектора от поездных нагрузок в статическом режиме незначительны для всех участков и не оказывают значительного влияния на состояние конструкции.

Динамический расчет напряженно-деформированного состояния коллектора

Понятие динамического расчета является общеизвестным: «Расчет сооружения с учетом сил инерции и возникающих при этом колебаний называется динамическим расчетом»⁴.

⁴ Динамика транспортных сооружений: метод. указания / составители С. А. Галанский, Г. Р. Маеров. – Самара: СамГУПС, 2016. – 48 с.

Моделирование выполнено в среде программного обеспечения Comsol⁵ в нестационарной постановке. Параметры геометрической модели, сетки, а также граничные условия оставлены неизменными (соответствующими статическому расчету). Рассмотрен временной диапазон от нуля до двух секунд, что соответствует времени прохода трех вагонов поезда по боковому пути над коллектором [14]. Поезд движется над коллектором со скоростью 55 м/с. На пути 1 находится неподвижный грузовой электровоз. В качестве начальных условий при выполнении динамического расчета приняты результаты расчета статических деформаций [12; 15].

На рис. 3 приведен результат расчета деформаций балласта, коллектора и рельсового пути в момент времени 1,8 с. Рассмотренный

⁵ COMSOL Multiphysics v 6.0 Reference manual. ComsolInc, 2021, 1742 p. [Электронный ресурс]: https://doc.comsol.com/6.0/doc/com.comsol.help.comsol/COMSOL_ReferenceManual.pdf. Доступ 14.03.2023.

Таблица 1

Компоненты главного тензора максимальных напряжений при наличии поезда над коллектором, Па [выполнено авторами]

Участок	Ось X		Ось Y		Ось Z	
	работа на растяжение	работа на сжатие	работа на растяжение	работа на сжатие	работа на растяжение	работа на сжатие
Фермское шоссе	752	-890	2535	-2488	525	-1126
Южное шоссе	904	-1303	5489	-5499	1347	-1708
Обводный канал	3212	-3702	3398	-3358	2840	-3989



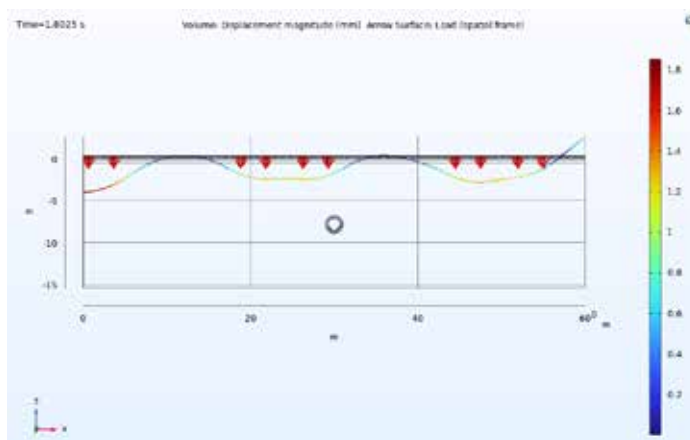


Рис. 3. Результат расчета деформаций балласта, коллектора и рельсового пути. Значения деформаций рельсов значительно увеличены по сравнению с реальными в целях наглядности [16] [выполнено авторами].

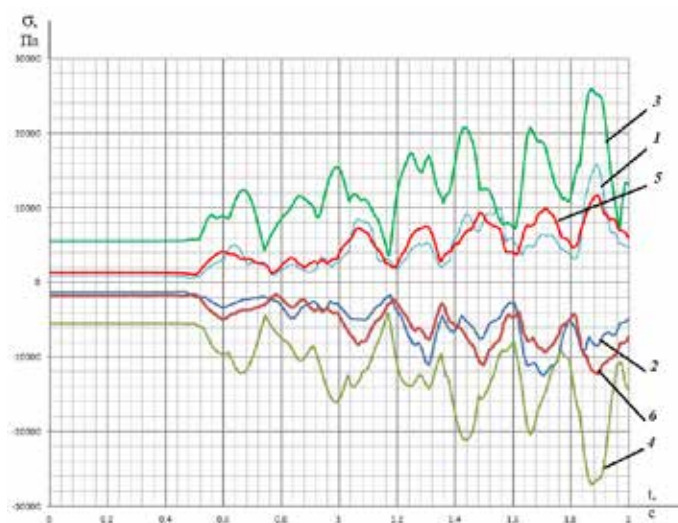


Рис. 4. Результаты расчета максимальных значений напряжений в бетоне коллектора по осям X , Y и Z при движении поезда по боковому пути со скоростью 55 м/с: 1 – работа на расширение вдоль оси X ; 2 – то же, но работа на сжатие; 3 – работа на расширение вдоль оси Y ; 4 – то же, но работа на сжатие; 5 – работа на расширение вдоль оси Z ; 6 – то же, но работа на сжатие [выполнено авторами].

момент времени соответствует максимальному значению деформации коллектора.

По аналогии выполнен расчет максимальных значений напряжений в бетоне коллектора по осям X , Y и Z для трех рассматриваемых участков коллектора, отличающихся формой поперечного сечения, диаметром и глубиной заложения. В качестве примера представлены результаты расчета для участка вблизи Южного шоссе (рис. 4).

Анализ полученных результатов выявил максимальные значения напряжения в бетонной обделке коллектора, амплитуда которых не превышает 45 кПа. Динамические нагруз-

ки на коллектор, обусловленные действием проходящих поездов, имеют явно выраженные гармонические составляющие с частотой порядка 2,5 Гц. Отметим, что для участков коллектора, имеющих значительную толщину, характерны более высокие значения (по сравнению с остальными компонентами) тензора напряжений по оси Y . Это указывает на то, что конструкция коллектора здесь работает на изгиб. При уменьшении толщины стенки и увеличении диаметра тоннеля, происходит снижение момента сопротивления изгибу, а значит возрастают продольные и вертикальные нагрузки (компоненты тензора по осям X и Z).

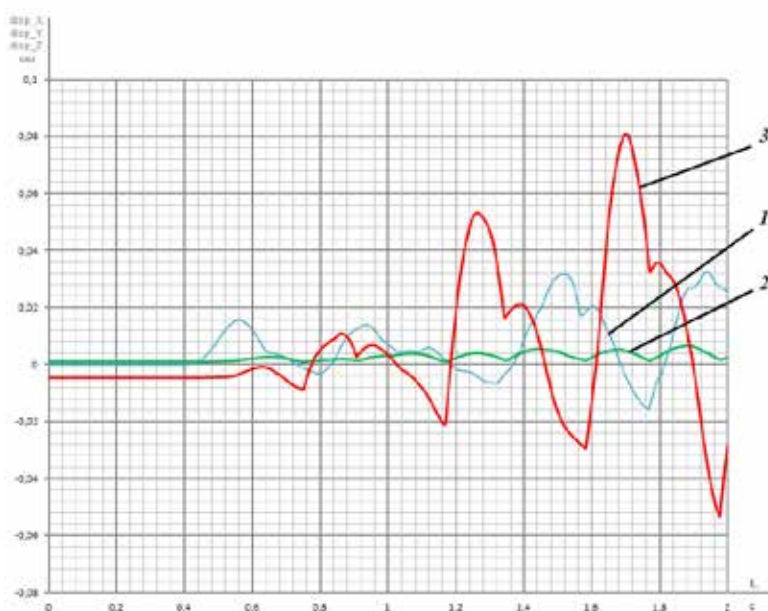


Рис. 5. Результат расчёта деформаций коллектора (перемещение вдоль оси X), рассчитанных на наружной поверхности коллектора на участке вблизи Южного шоссе [выполнено авторами].

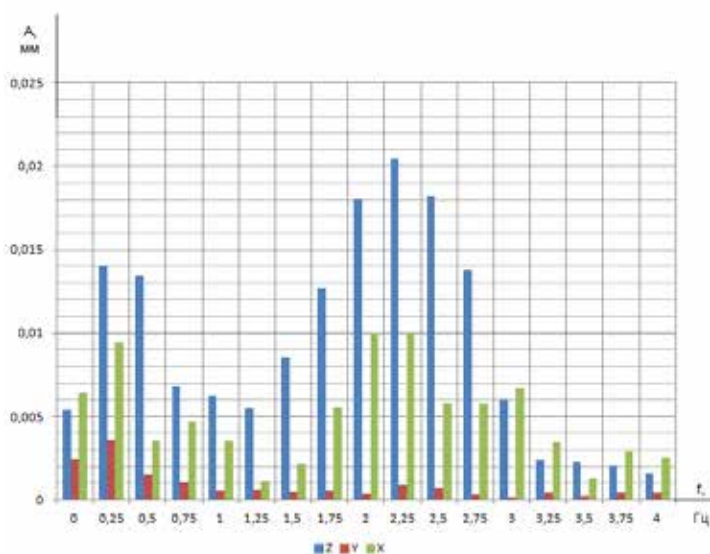


Рис. 6. Результаты спектрального анализа временных зависимостей деформации наружной поверхности коллектора на участке вблизи Южного шоссе по осям X, Y и Z [выполнено авторами].

Коллектор находится под воздействием возмущений от проходящего поезда и совершает колебания сложной формы, амплитуда которых не превышает 0,13 мм. В качестве примера на рис. 5 приведен результат расчета деформаций коллектора вдоль оси X, рассчитанных на наружной поверхности коллектора на участке вблизи Южного шоссе.

Колебания имеют сложную форму, причем в основном преобладают вертикальные коле-

бания (вдоль оси Z). Нарастание колебаний может свидетельствовать в том числе и о наличии резонансных явлений. Это обстоятельство требует выполнения частотного анализа и определения собственных частот конструкции.

Спектральный анализ временных зависимостей деформации наружной поверхности коллектора выполнен вдоль осей X, Y и Z (рис. 6).



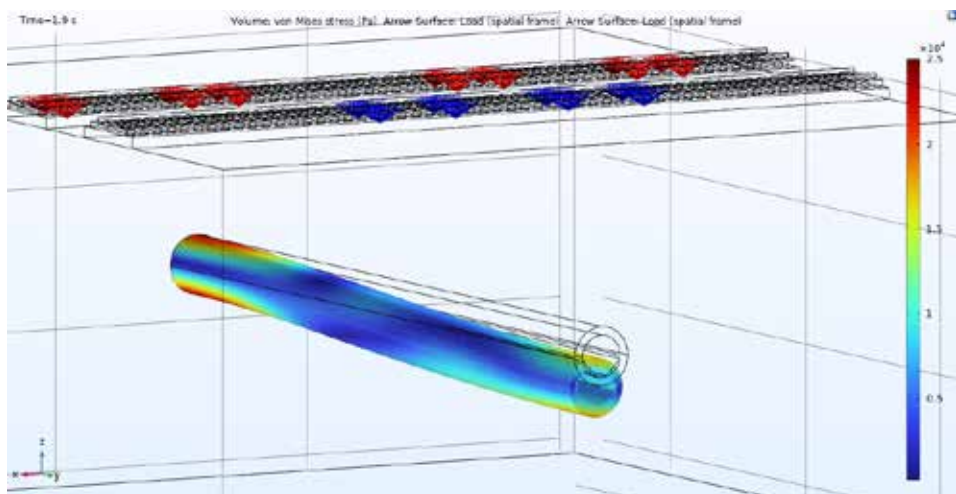


Рис. 7. Напряженно-деформированное состояние (по Мизесу) коллектора на участке вблизи Южного шоссе в момент времени (1,9 с), соответствующий максимальной деформации. Масштаб деформации значительно увеличен с целью наглядности. Нагрузка от неподвижного поезда показана красными стрелками, движущегося – синими [выполнено авторами].

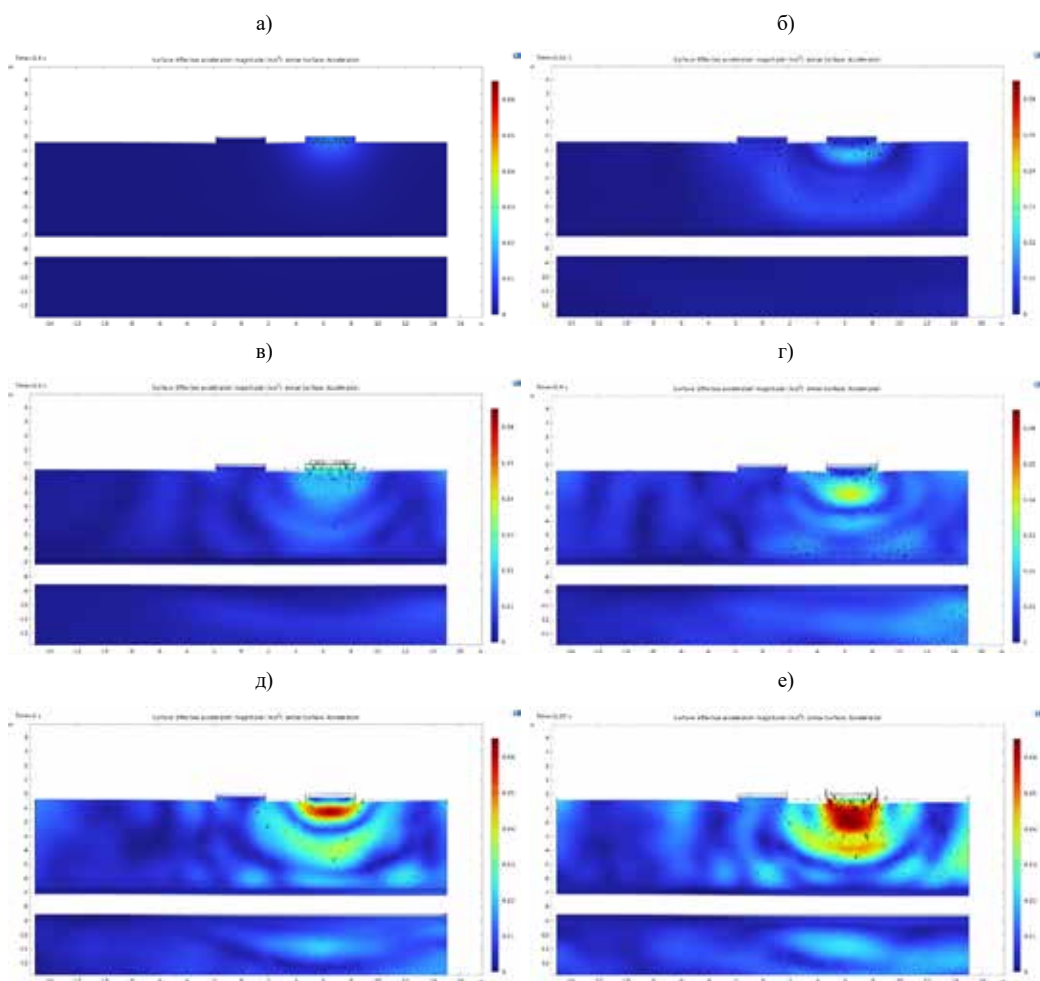


Рис. 8. Фазы поля распределения ускорений в толще грунта: а – в момент времени 0,4 с; б – в момент времени 0,51 с; в – в момент времени 0,6 с; г – в момент времени 0,9 с; д – в момент времени 1 с; е – в момент времени 1,07 с. Для наглядности масштаб деформации грунта увеличен в 2000 раз [выполнено авторами].

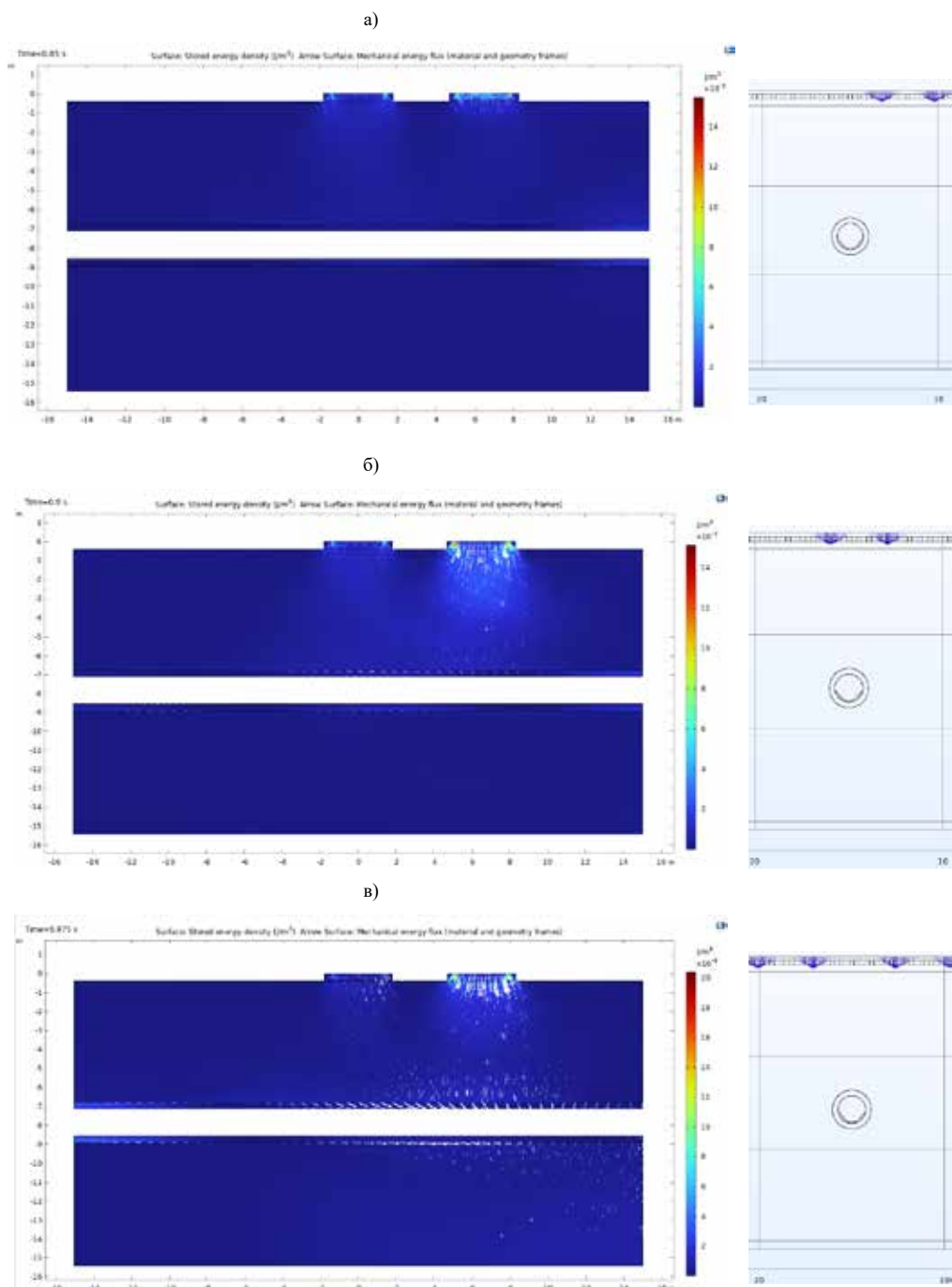


Рис. 9. Фазы поля распределения плотности энергии в толще грунта при проходе второй тележки головного вагона: а – в момент времени 0,85 с; б – в момент времени 0,9 с; в – в момент времени 0,975 с. Белыми стрелками показано направление потоков энергии [выполнено авторами].

Полученный спектр содержит два резонансных пика на частотах порядка 0,25 и 2,25 Гц по отведениям Y и Z, а по отведению X помимо указанных, выявлены два дополнительных пика на частотах 3 и 3,75 Гц.

Деформированное состояние коллектора, соответствующее моменту времени достижения максимальной деформации (1,9 с), представлено на рис. 7.

В целом результаты расчета показывают, что полученные значения деформаций участка кол-



Таблица 2

Сводная таблица значений массовых долей, участвующих в колебательном процессе на резонансных частотах, соответствующих амплитудных значений перемещений (мкм), и составляющих напряжений растяжение/сжатие на поверхности тоннеля, (МПа) [выполнено авторами]

Локализация	Параметр	X	Y	Z
<u>Вблизи Обводного канала</u>	Коэффициент массового участия, $m_{f,x}$, о. е. на частоте 1,9493 Гц	8,59E-10	0,000566	0,79543
	Коэффициент массового участия, $m_{f,y}$, о. е. на частоте 2,2184 Гц	0,556368	3,2E-10	1,08E-10
	Коэффициент массового участия, $m_{f,z}$, о. е. на частоте 2,3156 Гц	3,79E-10	0,507095	8,24E-05
	Суммарное значение массового участия, $\sum m_f$	0,644884	0,618909	0,81044
	Амплитудные значения перемещений при резонансных частотах (мкм)	46,7	46,7	45,3
	Значения составляющих напряжений растяжение/ сжатие на поверхности тоннеля, (МПа)	0,042/–0,037	0,024/–0,024	0,037/–0,047
<u>Вблизи Южного шоссе</u>	Коэффициент массового участия, $m_{f,x}$, о. е. на частоте 1,937 Гц	1,46E-10	0,000765	0,794426
	Коэффициент массового участия, $m_{f,y}$, о. е. на частоте 2,213 Гц	0,551516	7,7E-11	5,57E-11
	Коэффициент массового участия, $m_{f,z}$, о. е. на частоте 2,30 Гц	1,78E-10	0,504217	9,24E-05
	Суммарное значение массового участия, $\sum m_f$	0,6474	0,6241	0,8103
	Амплитудные значения перемещений при резонансных частотах (мкм)	45,3	46,7	45,3
	Значения составляющих напряжений растяжение/ сжатие на поверхности тоннеля, (МПа)	0,017/–0,009	0,027/–0,027	0,012/–0,011
<u>Вблизи Фермского шоссе</u>	Коэффициент массового участия, $m_{f,x}$, о. е. на частоте 1,9314 Гц	4,52E-10	0,000356	0,800222
	Коэффициент массового участия, $m_{f,y}$, о. е. на частоте 2,2158 Гц	0,551564	5,38E-10	5,64E-11
	Коэффициент массового участия, $m_{f,z}$, о. е. на частоте 2,3651 Гц	7,46E-10	0,460332	0,0001
	Суммарное значение массового участия, $\sum m_f$	0,650512	0,611397	0,812321
	Амплитудные значения перемещений при резонансных частотах (мкм)	45,3	48,3	45,3
	Значения составляющих напряжений растяжение/ сжатие на поверхности тоннеля, (МПа)	0,011/–0,017	0,016/ –0,011	0,009/–0,013

лектора, обусловленные действием поездных нагрузок незначительны, и не могут оказать существенного влияния на состояние конструкции.

Начальная стадия колебательного процесса грунта под воздействием смещений верхнего строения пути, соответствующая прохождению первой тележки над коллектором, отображена на рис. 8.

Установлен волновой характер распределения ускорений в толще грунта. Значение

ускорения значительно затухает по мере удаления от железнодорожного полотна. Максимальные значения ускорений в толще грунта обнаружены вблизи полотна в моменты времени, соответствующие проходу колеса над осью симметрии коллектора.

Результат расчета распределения удельной энергии системы представлен на рис. 9, здесь рассмотрен процесс, сопровождающий проход колеса над осью симметрии коллек-

тора. Справа показано положение нагрузки на рельс относительно оси коллектора.

Рассмотрены следующие моменты времени: 0,85 с – подход колесной пары второй тележки головного вагона; 0,9 с – ось симметрии второй тележки расположена над осью симметрии коллектора; 0,975 с – подход тележки второго вагона; 1,015 с – ось колесной пары первой тележки второго вагона находится над осью симметрии коллектора; 1,04 с – ось симметрии первой тележки второго вагона расположена над осью симметрии коллектора; 1,1 с – удаление первой тележки второго вагона от оси симметрии коллектора.

По результатам исследования распределения удельной энергии системы можно сделать вывод о тенденции резкого снижения интенсивности энергетических процессов для уровня глубин в пределах 5–7 м. Таким образом, влияние динамических поездных нагрузок и вибрации верхнего строения пути на рассматриваемый объект незначительно.

Расчет собственных частот колебательных процессов участков коллектора

Для оценки надежности сооружения, информационно-достаточную картину представляет собой распределение модальных (эффективных) долей массы конструкции, участвующих в колебательном процессе на резонансных частотах. Расчет производится в программе Comsol с помощью инструмента Eigenfrequency. В результате расчета определены массы, вовлеченные в колебательный процесс по отведениям X , Y и Z , m_{px} , m_{py} , m_{pz} соответственно. Полученные значения были соотнесены с полной массой рассматриваемой колебательной системы.

Суммарные значения составляющих коэффициента массового участия элементов конструкции сооружения по отведениям базисного вектора (X , Y , Z) показывают достижение резонансных частот в пределах седьмой итерации (задействовано в колебательном процессе более 50–60 % массового участия конструкции [7]), что позволяет считать достигнутыми резонансные частоты, а результаты динамического исследования достоверными.

Относительные значения долей масс, участвующих в колебательном процессе для

соответствующих значений значения модальных частот представлены в сводной табл. 2.

ВЫВОДЫ

Моделирование напряженно-деформированного состояния коллектора под действием статических и динамических нагрузок от поездной нагрузки (с осевой нагрузкой 25 т) позволило установить волновой характер распределения деформаций и ускорений в толще грунта с выраженными гармоническими составляющими. Частотный спектр колебательного процесса в целом идентичен для всех участков коллектора и содержит два резонансных пика на частотах порядка 0,25 и 2,25 Гц по отведениям Y и Z , а по отведению X (по оси тоннеля) помимо указанных, выявлены два дополнительных пика на частотах 3 и 3,75 Гц. Частота возмущающих сил близка к резонансной, однако ввиду малости амплитуд колебаний, данное явление не представляет опасности.

Для участков коллектора, имеющих значительную толщину обделки, характерны более высокие значения компонентов тензора напряжений по оси Y (в пределах 45 кПа), что подтверждает факт работы конструкции коллектора преимущественно на изгиб. Для конструкции с меньшей толщиной стенки и большим диаметром тоннеля (соответственно, меньшим моментом сопротивления изгибу) характерны относительно высокие продольные и вертикальные нагрузки (компоненты по осям X и Z).

В результате исследования процесса распределения удельной энергии системы по массиву выявлена тенденция резкого снижения интенсивности энергетических процессов в пределах глубин 5–7 м.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Чemezov Д. А. Гармонический анализ статически неопределимой рамы // Молодой ученый. – 2014. – № 12 (71). – С. 122–127. [Электронный ресурс]: <https://moluch.ru/archive/71/12203>. Доступ 14.03.2023.
2. Веригo М. Ф., Коган А. Я. Взаимодействие пути и подвижного состава / Под ред. М. Ф. Веригo. – М.: Транспорт, 1986. – 559 с. [Электронный ресурс]: <https://lokomotiv.ru/zheleznodorozhnyy-puti/vzaimodeystviye-puti-i-sostava.html>. Доступ 14.03.2023.
3. Власов Г. М., Широков Ю. М., Яшнов А. Н. Методика и некоторые результаты экспериментальных исследований работы плиты балластного корыта железобетонных пролетных строений // Повышение надежности и эффективности работы ж. д. транспорта. Тезисы докладов. – Новосибирск: Новосибирский институт инженеров железнодорожного транспорта, 1988. – С. 5–11.





4. Чернышев М. А. Практические методы расчета пути. – М.: Транспорт, 1967. – 235 с. [Электронный ресурс]: https://rusneb.ru/catalog/000200_000018_rc_4792595/. Доступ 14.03.2023.
5. Шахунянц Г. М. Железнодорожный путь. – М.: Транспорт, 1987. – 479 с. [Электронный ресурс]: <https://vtome.ru/knigi/tehnika/453305-zheleznodorozhnyj-put-1987.html>. Доступ 14.03.2023.
6. Попов С. Н. Балластный слой железнодорожного пути. – М.: Транспорт, 1965. – 183 с. [Электронный ресурс]: <https://www.fractr.one/file/1469391/>. Доступ 14.03.2023.
7. Лайрд Д. Конечно-элементный анализ для всех. – Часть 2. [Электронный ресурс]: <http://sapr.ru/article/21944>. Доступ 14.03.2023.
8. Feng, H. 3D models of Railway Track for Dynamic Analysis. Master Degree Project. Stockholm, 2011. [Электронный ресурс]: <http://kth.diva-portal.org/smash/get/diva2:467217/FULLTEXT01.pdf>. Доступ 14.03.2023.
9. Даренский А. Н., Витольберг В. Г. Сопротивление промежуточных скреплений КБ и КПП-5 перемещения рельсов в продольной плоскости // Сб. научных трудов ДонИЖТ. – 2008. – № 14. – С. 142–152. [Электронный ресурс]: <https://cyberleninka.ru/article/n/soprotivlenie-promezhutochnyh-skrepleniy-kb-i-kpp-5-peremescheniyam-relsov-v-prodolnoy-ploskosti/viewer>. Доступ 14.03.2023..
10. Ефимов С. В. Лабораторные исследования работы продольных бортов плиты балластного корыта железобетонных пролетных строений с ездой на балласте на действие горизонтальной нагрузки // Транспорт: наука, образование, производство (Транспорт-2016). – Ростов-на-Дону: РГУПС, 2016. – С. 44–48. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28342638>. Доступ 14.03.2023.
11. De Corte, W., Van Bogaert, Ph. The use of continuous high-frequency strain gauge measurements for the assessment of the role of ballast in stress reduction on steel railway bridge decks. Insight – Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, 2006, Vol. 48, No. 6, pp. 352–356. DOI: 10.1784/insi.2006.48.6.352.
12. Suiker, A. S. J. The Mechanical Behaviour of Ballasted Railway Tracks. Delft University Press, 2002, 236 p. ISBN 90-407-2307-9.
13. Омаров А. Д., Нусупбеков С. И. Оценка надежности рельсовых скреплений // Вестник Национальной инженерной академии РК. – 2008. – № 2 (28). С. 93–97. [Электронный ресурс]: http://www.elibrary.kz/download/zhurnal_st/st2049.pdf. Доступ 14.03.2023.
14. Bonifacio, C., Ribeiro, D., Calçada, R., Delgado, R. Dynamic Behaviour of a Short Span Filler-Beam Railway Bridge under High Speed Traffic. In: J. Pombo, (Editor), Proceedings of the Second International Conference on Railway Technology: Research, Development and Maintenance, Civil-Comp Press, Stirlingshire, UK, Paper 79, 2014. DOI: 10.4203/ccp.104.79.
15. Shih, Jou-Yi, Thompson, D., Zervos, A. Assessment of track-ground coupled vibration induced by high-speed trains. In: The 21st International Congress on Sound and Vibration, 13–17 July 2014, Beijing, China. [Электронный ресурс]: <http://eprints.hud.ac.uk/id/eprint/29165>. Доступ 14.03.2023. ●

Информация об авторах:

Ватаев Андрей Сергеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники и теплотехники Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I, Санкт-Петербург, Россия, avataev@yandex.ru.

Ватулин Ян Семенович – кандидат технических наук, доцент кафедры наземных транспортно-технологических комплексов Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I, Санкт-Петербург, Россия, yaп-roos@yandex.ru.

Кавказский Владимир Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры тоннелей и метрополитенов Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I, Санкт-Петербург, Россия, Kavkazskiy_vn@mail.ru.

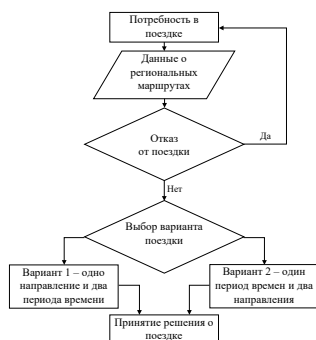
Статья поступила в редакцию 22.02.2023, одобрена после рецензирования 27.12.2023, принята к публикации 27.12.2023.

От редакции. Данная статья, представляющая, по мнению авторов, новый подход к постановке и решению заявленной проблемы, вызвала у рецензентов целый комплекс вопросов, часть из которых авторы уточнили, а по некоторым представили свои контраргументы. Редакция, понимая весьма дискуссионный характер содержания статьи, новизну и сложный характер поставленной в рамках заявленной темы проблемы, сочла тем не менее возможным представить ее на суд читателей в порядке открытия широкой дискуссии.

Отмечая практический и научный интерес, который представляют выводы авторов о волновом характере распределения деформаций и ускорений в толще грунта с выраженными гармоническими составляющими, рецензенты указали на возникающий при этом логический разрыв между формулировками задачи как оценки степени влияния вибрационного воздействия высокоскоростного подвижного состава на несущие элементы заглубленного водопропускного сооружения тоннельного типа, проблемой как оценкой эксплуатационной надежности сооружения и целью как анализом напряженно-деформированного состояния несущих элементов заглубленных сооружений и выводами. Редакция также отмечает определенное несоответствие между заявленной целью и вполне обоснованным частным выводом.

Авторы также отмечают отсутствие отмеченного рецензентами противоречия между заявленным анализом динамического воздействия и используемым в статье статическим анализом. Авторам известно, что при увеличении скорости движения увеличиваются динамические воздействия на путь и элементы инфраструктуры. Именно с этой целью выполнен статический расчет тоннельного сооружения, а также динамический расчет при движении скоростного поезда. По мнению авторов, результаты, приведенные в настоящей статье, как раз показывают характер изменения напряжений и деформаций в тоннельном сооружении в динамическом режиме, о чем свидетельствуют временные зависимости изменения компонентов тензора напряжений и максимальные значения величин деформаций; для сравнения приведены компоненты тензора напряжений в статическом режиме; четко выявлено, что в динамическом режиме нагрузки выше, чем в статическом.

В любом случае, по мнению редакции, только последующая дискуссия поможет сблизить возникшие при работе над статьей противоречивые мнения.



ВОЗДУШНЫЙ ТРАНСПОРТ

86

Отношения на рынке региональных авиаперевозок: в центре внимания – пассажир.

ЛОКОМОТИВНОЕ ДЕПО

96

Повышение пропускной способности за счет организационно-технических мероприятий: содержательная сторона и определение приоритетов.

ТРАНСПОРТНЫЕ КИБЕРФИЗИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

103

Транспортная информация, железнодорожная информация, транспортная кибербезопасность.



МОРСКОЙ ТРАНСПОРТ

110

Современные подходы к диагностике судовых двигателей: вейвлет-нейронная сеть, техническое зрение, программируемые логические схемы.

КОНТРЕЙЛЕРНЫЕ СИСТЕМЫ

119

Как выявить преимущества при наличии множества факторов?

ТРАНСПОРТНЫЕ ИЗДЕРЖКИ

131

Перевозки угля: оптимизация использования контейнеров.



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 629.73:656.7.073.436:334.5:339.137

DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-6-10>

Мир транспорта. 2023. Т. 21. № 6 (109). С. 86–95

Модель взаимодействия участников рынка региональных авиаперевозок в условиях ограниченной конкуренции



Александр БАНДУРИН



Сергей МАТЮХА

**Александр Владимирович Бандурин¹,
Сергей Владимирович Матюха²**

¹ Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, Москва, Россия.

² АНО ВО «Международный институт управления и права», Москва, Россия.

¹ ORCID 0000-0002-3608-4168; Web of Science Researcher ID: C-9406-2015; Scopus Author ID: 56527389700; РИНЦ SPIN-код: 4988-2805.

² ORCID 0009-0009-5717-809X; РИНЦ SPIN-код: 8674-7605.

✉ ¹ abander@mail.ru.

✉ ² m-83@bk.ru.

АННОТАЦИЯ

Цель статьи состоит в построении модели взаимодействия участников рынка региональных авиаперевозок с учетом особенностей внутренней конкуренции в России.

В статье рассмотрены основные параметры модели поведения потребителя на рынке региональных авиаперевозок, предложены варианты зависимостей потребительских решений от стоимости, географии маршрутной сети, графиков осуществления полетов и общей

емкости перевозочных мощностей на конкретных направлениях.

Также предложена модель поведения авиаперевозчика, включающая параметры затрат на осуществление перевозки, дополнительные затраты на оплату услуг вспомогательных и обеспечивающих участников. Сформированы функции, описывающие взаимодействие участников на основе эффективного сочетания моделей поведения и возможного конфликта интересов.

Ключевые слова: воздушный транспорт, рынок региональных перевозок, модель поведения потребителя, модель поведения авиакомпании, ограниченная конкуренция, взаимодействие участников рынка авиаперевозок.

Для цитирования: Бандурин А. В., Матюха С. В. Модель взаимодействия участников рынка региональных авиаперевозок в условиях ограниченной конкуренции // Мир транспорта. 2023. Т. 21. № 6 (109). С. 86–95. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-6-10>.

Полный текст статьи на английском языке публикуется во второй части данного выпуска.
The full text of the article in English is published in the second part of the issue.

ВВЕДЕНИЕ

Взаимодействие на региональном рынке авиаперевозок осуществляется в условиях трехсекторной схемы. Основными секторами авиаперевозки как рыночного продукта являются:

1) участники процесса производства авиаперевозки как продукта (производители продукта);

2) потребители продукта авиаперевозки, к которым относятся пассажиры – для пассажирских авиаперевозок и грузовладельцы – для грузовых авиаперевозок;

3) вспомогательные и обеспечивающие участники рынка, которые не участвуют непосредственно в авиаперевозке, но создают необходимые условия для бесперебойного функционирования рынка.

К основным участникам процесса производства перевозки как продукта мы предлагаем относить, например, авиакомпании, аэропорты, диспетчерскую службу, навигационную службу. Тогда вспомогательными и обеспечивающими участниками рынка выступают ремонтные заводы, предприятия питания, сервисные службы по обслуживанию пассажиров и посетителей транспортной инфраструктуры (встречающие, провожающие, общественный и личный транспорт и пр.), службы транспортной безопасности, службы уборки и т. п. Соответственно, с другой стороны продукта находится потребитель.

Очевидно, что в более широкой трактовке рынка авиаперевозок необходимо также учитывать государство как регулятора и контролера деятельности участников рынка, население, которое подвержено воздействию различных факторов, возникающих в процессе производства продукта, а также другие заинтересованные стороны, в том числе производителей авиационной техники, строительные организации и пр. Тем не менее, ключевыми

участниками рынка являются рассмотренные ранее сектора. С точки зрения зон взаимодействия схема авиаперевозки как продукта имеет форму треугольника, вершинами которого являются группы участников, а стороны представляют собой возникающие отношения (рис. 1).

Здесь важно понимать, что в такой схеме существуют не только экономические отношения. Помимо отношений «купля – продажа» продукта между секторами возникают социальные отношения, например, в форме лояльности бренду, устойчивые связи между конкретными компаниями в части привлечения для выполнения регулярных и разовых действий, а также кобрендинговые инициативы, направленные на продвижение торговой марки в несвойственной сфере потребления.

Объективное требование баланса хозяйственной деятельности предполагает, что все участники рынка стремятся к установлению взаимовыгодного равновесия, когда для выполнения авиаперевозок на конкретном маршруте используется такое количество ресурсов (самолетов, инфраструктуры, персонала), которое позволяет в полном объеме удовлетворить платежеспособный спрос. В этой ситуации важнейшим ориентиром для установления стратегических приоритетов развития рынка является правильное определение множества потребителей.

Таким образом, рассматриваемая в статье проблематика имеет высокую актуальность в российском транспортном секторе и может быть применена и в других странах. Поэтому основная цель статьи состоит в разработке методики корректной оценки количества и качества потенциальных пассажиров, имеющих мотивацию к приобретению продуктов на рынке региональных авиационных перевозок, которая позволит повысить эффек-



Рис. 1. Основные сектора отношений в процессе потребления авиаперевозки как продукта [выполнено авторами].

тивность управления данным сектором транспортной отрасли. Из-за высокой капиталоемкости бизнеса и низкого уровня фондоотдачи участников рынка авиаперевозок чрезвычайно важным становится вопрос повышения качества прогнозов потенциального спроса.

Основная методология исследования включает аппарат теории множеств, теории математического моделирования, теории принятия решений, принципы полезности, графический и табличный методы.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Вопросы анализа рынков авиаперевозок различного масштаба достаточно часто рассматриваются современными авторами. Например, среди свежих публикаций следует отметить работы [1–6]. Однако большинство работ в плане анализа, как правило, рассматривает общие статистические показатели состояния рынка в целом, не разделяя рынок на отдельные сегменты. Такой подход не позволяет оценивать тенденции колебания предпочтений потребителей, а также проблемы перевозчиков.

Механизмы и модели отношений между различными группами заинтересованных сторон на рынке авиаперевозок рассматриваются в работах [7–12]. Здесь следует указать, что в большинстве работ отсутствует анализ механизма взаимодействия, целеуказания заинтересованных сторон в процессе принятия решения не учитываются, поэтому в процессе принятия маркетинговых решений основным источником интересов выступает авиаперевозчик. Также в современных условиях необходимо учитывать изменение характера рынка и трансформацию отношений в парадигме «рынок покупателя».

Экономическая база функционирования рынка авиаперевозок рассматривается авторами таких работ, как [13–19]. Однако в большинстве работ в данной предметной области не учитываются реалии постковидной и последующей трансформации рынка авиаперевозок, что существенно сокращает спектр анализируемых рисков и источников угроз отечественному рынку региональных авиаперевозок.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В своих исследованиях мы достаточно подробно рассматривали пассажирские перевозки

и структуру потребления данного продукта [20–22]. Как мы указывали ранее, потребитель – это отдельное лицо, домохозяйство или группа лиц с общими интересами, выбирающее и реализующее план потребления конкретного продукта. При выборе и реализации своего плана потребления любой потребитель руководствуется имеющимися объективными ограничениями выбора и субъективными критериями выбора. По нашему мнению, существует два основных вида ограничений:

1) «априорные ограничения, например, географические предпочтения или временной период потребления продукта» [21];

2) бюджет потребителя как объем средств, изначально выделяемых потребителем на приобретение продукта.

Мы полагаем, что при прочих равных условиях общая стоимость потребительского плана не должна превышать бюджет потребителя. Таким образом, наложение всех ограничений ведет к тому, что у потребителя возникает единственный потребительский план. Рассмотрим возможности оценки схемы взаимодействия между участниками с точки зрения потребителя [21].

Пусть, зафиксировано число m (m – целое положительное число), характеризующее количество потребителей на рынке региональных авиаперевозок. Каждый потребитель получает индекс i : $i = 1, \dots, m$. У каждого потребителя есть собственный потребительский план, который описывается элементом x – региональным маршрутом, входящим в заранее определенное пространство продуктов R^I . Данное пространство продуктов мы называем региональной маршрутной сетью. Причем для i -го потребителя конкретный потребительский план x_i является либо допустимым, либо недопустимым.

Тогда для i -го потребителя можно сформировать потребительское множество X_i , включающее все допустимые для этого потребителя маршруты. Пусть x – спрос i -го потребителя, описываемый точкой на пространстве продуктов. Если для всех потребителей заданы потребительские планы x_i , вектор $x = \sum_{i=1}^m x_i$ описывает совокупное потребление или совокупный спрос на заданном рынке региональных авиаперевозок. Тогда $X = \sum_{i=1}^m X_i$ – это совокупное потребительское множество.

Здесь важно использовать определенные обобщения, которые иллюстрируются приме-

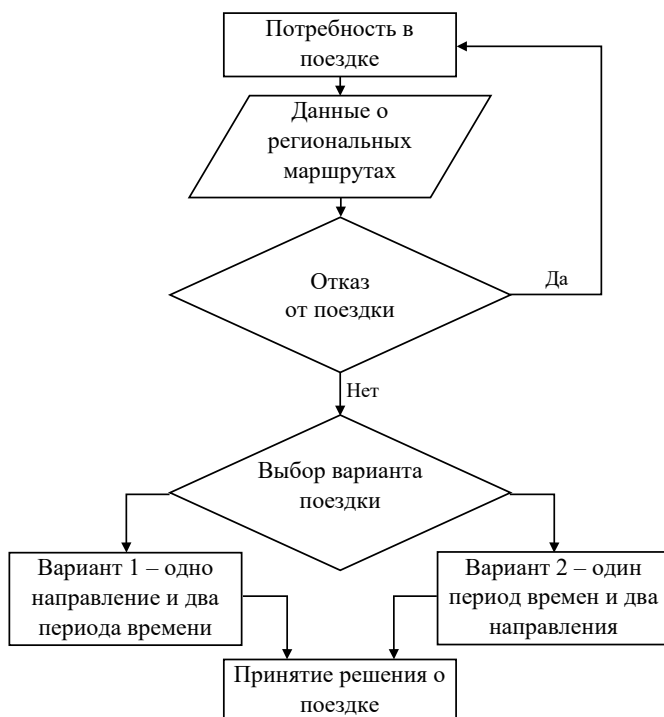


Рис. 2. Блок-схема принятия решения потребителем о поездке [выполнено авторами].

рами. Мы предлагаем зафиксировать локальное соглашение о знаках переменных. Пусть все числа, описывающие входы конкретного потребителя, имеют положительный знак, а все выходы – это отрицательные числа. Например, входами для любого потребителя являются продукты регионального рынка авиаперевозок, то есть существующие и доступные региональные маршруты. Тогда предположим, что выходами для потребителя будут различные виды выполняемого им труда.

Также необходимо понимать, что каждый потребитель может выбирать из всех доступных ему возможностей, доступных на рынке. В свою очередь, предложение на рынке состоит из производственных планов всех производителей. То есть, если входом для потребителя является h -й продукт, его наименьшее значение равно 0, например, когда продукт отсутствует на рынке. Вместе с тем, этот же h -й продукт для производителя (авиаперевозчика) является выходом. Очевидно, что для заданного количества труда существует соответствующее наибольшее значение продукта. Варианты выбора конкретным потребителем различных потребительских планов представлены на рис. 2.

Фактически, на рынке региональных авиаперевозок i -й потребитель не может достичь точки насыщения. То есть, каким бы ни был его первоначальный выбор из потребительского множества X_i , всегда можно сформировать альтернативное потребление, которое потребитель предпочтет первоначальному. Таким образом, для описания поведения потребителя на рынке региональных авиаперевозок вводится первая функция. В качестве «меры количественного предпочтения i -го потребителя из набора региональных маршрутов x_i использовать функцию полезности u_i » [21]. Данная функция характеризует количественный смысл степени удовлетворения выбором x_i для i -го потребителя.

Важную роль в процессе выбора начинает играть бюджетное ограничение конкретного потребителя. Мы придерживаемся принципов классической экономики, поэтому в категориях теории множеств данное ограничение описывается так: пусть задано множество цен p и потребление x_i , тогда прямые затраты i -го потребителя будут p^*x_i . При этом затраты не могут превосходить бюджет конкретного потребителя w_i .

Тогда, «при заданной системе цен p на рынке региональных авиаперевозок и заданном бюджете w_i затраты i -го потребителя p^*x_i



на свое потребление (региональный маршрут) x_i из собственного потребительского множества X_i удовлетворяют бюджетному ограничению $p^*x_i \leq w_i$ [21]. При этом бюджетное распределение $w = (w_i)$ описывается единичным элементом множества допустимых бюджетов R^m . Тогда типовая пара «цена – бюджет» является элементом (p, w) множества R^{l+m} .

Мы полагаем, что в отдельных случаях после выбора пары (p, w) множество потребительских планов x_i будет пустым. Поэтому целесообразно выделить множество S_i , которое включает только пары «цена – бюджет» (p, w_i) , при выборе которых множество потребительских планов содержит хотя бы один элемент. Тогда для каждой пары (p, w) из множества S_i существует непустое множество $\gamma_i(p, w) = \{x_i \in X_i \mid p^*x_i \leq w_i\}$ допустимых потребительских планов, удовлетворяющих бюджетному ограничению именно для выбранной пары (p, w) . То есть, существует однозначно определенное отображение γ_i из S_i в X_i .

Данное отображение должно быть представлено так, чтобы индивидуальный спрос разных потребителей мог суммироваться. Тогда, используя функцию полезности u_i для оценки региональных маршрутов, любой потребитель на рынке региональных авиаперевозок выберет наилучший элемент в соответствии со своим предпочтением, то есть вариант с максимальным значением функции u_i на $\gamma_i(p, w)$, или допустимый потребительский план, являющийся оптимальным при ограничениях его бюджета.

Причем в данную модель спроса на региональном рынке авиаперевозок корректно вписываются любые однофакторные функции спроса. «Соответствующие этим функциям кривые вида $y_i = f_i(Z)$ называются кривыми Энгеля» [23]. По нашему мнению, региональные авиаперевозки не являются продуктом первой необходимости, поэтому спрос возникает только после достижения потребителем минимального порога собственных доходов. С другой стороны, предметом роскоши региональные авиаперевозки тоже не являются. Следовательно, региональные авиаперевозки – это товар второй необходимости (длительного пользования), «спрос на которые описывается функцией Торнквиста» [24]. Для товаров длительного пользования «функция имеет следующий вид:

$$D = a^*(I_1 - I_2) / (I + b),$$

где I – доход, если $I_1 \geq I_2$,

a, b – параметры модели» [21].

Как правило, полезность таких продуктов оценивается только потребителями, достигшими необходимого порога дохода. Причем насыщение спроса для такой категории продуктов всегда имеет асимптотический характер и не может быть ограничено заранее.

Предпосылками разработанной модели функционирования рынка региональных авиаперевозок явились модели агрегированного и дезагрегированного спроса. В частности, в агрегированных моделях точность некоторых зависимостей недостаточна, поэтому для поглощения накапливающейся ошибки и описания зависимостей, которые для целей исследования неважны, в уравнение включаются соответствующие переменные. Тогда функция спроса имеет следующий вид:

$$Y = F(X) + \varepsilon,$$

где Y – спрос;

X – вектор аргументов, влияющих на спрос;

$F(X)$ – форма зависимости;

ε – параметр для учета влияния накопленной ошибки и второстепенных переменных.

В свою очередь, дезагрегированные (поведенческие) модели спроса на транспортные услуги базируются на результатах анализа параметров потребителей, формирующих потребительский план. Например, одна из разновидностей дезагрегированных моделей – это модель дискретного выбора. В подобных моделях у принимающего решения потребителя n всегда есть набор дискретных альтернатив $j = 1, \dots, J$, из которых он выбирает вариант, максимизирующий полезность выбора. Функция имеет вид:

$$U_{jn} = V(z_{jn}, s_n; \beta) + \varepsilon_{jn},$$

где $V()$ – вид функции систематической полезности;

z_{jn} – вектор альтернативных решений;

s_n – вектор характеристик потребителей;

β – вектор неизвестных параметров;

ε – ненаблюдаемая компонента полезности.

Вне зависимости от выбранного типа модели необходимо прогнозировать значения агрегированных величин, составляющих набор независимых переменных конкретного уравнения спроса. В частности, для рынка авиаперевозок такими переменными являются

размер совокупного пассажиропотока на конкретном маршруте или общий пассажиропоток между конкретными точками путешествий. Задача оценки влияния каждой переменной на модель требует, чтобы эта переменная была в явном виде включена в такую модель.

Таким образом, для сбора необходимой информации требуется изменить формы статистического учёта на воздушном транспорте. Например, достаточно информативными для обобщения являются панельные данные, сбор которых в системе авиаперевозок не составляет труда. Причём панельные данные позволяют анализировать динамику поведения и факторы выбора любой выборки потребителей регионального рынка авиаперевозок не только в заданный момент времени, но и в динамике за несколько периодов, обеспечивая необходимую достоверность и возможность анализа сезонности. Панельные данные предоставляют возможность верификации в процессе формирования всех описанных выше топологических множеств.

Помимо потребителей на рынке авиаперевозок присутствуют и производители продукта. По нашему мнению, «производитель на рынке региональных авиаперевозок – это специализированное предприятие, прошедшее квалификационный отбор и наделённое органами государственной власти Российской Федерации юридическим правом осуществлять деятельность по перевозке пассажиров воздушным транспортом, подтвержденным наличием Сертификата эксплуатанта коммерческой авиации» [21]. Для простоты назовем такого производителя «авиакомпания». Фактически производитель на региональном рынке авиаперевозок является экономическим агентом, формирующим и выполняющим собственный производственный план за счет предложения потребителям набора авиаперевозок как своего основного продукта.

Пусть количество производителей на рынке региональных авиаперевозок задано числом n (n – положительное целое число), и каждому производителю присвоен индекс $j: j = 1, \dots, n$. Тогда совокупность продуктов как единичных элементов y составляет производственный план любого производителя. Причем y_j – это региональный маршрут, входящий в пространство продуктов R^l – региональную маршрутную сеть авиакомпании.

Для j -ой авиакомпании конкретный производственный план y_j или технологически

допустим, или технологически недопустим, например, из-за отсутствия воздушных судов определенного класса, невозможности выполнить полет на заданную дальность или на аэродромы некоторых классов. Тогда производственное множество j -ой авиакомпании представляет собой множество Y_j всех ее производственных планов, то есть выполнимых региональных маршрутов.

Предложение j -ой авиакомпании представляет собой элемент y_j , представляющий собой точку в пространстве продуктов, предлагаемых j -ой авиакомпанией на региональном рынке авиаперевозок. Если зафиксирован производственный план y_j , то сумма вида $y = \sum_{j=1}^n y_j$ называется совокупным производством или совокупным предложением авиакомпании.

Множество $Y = \sum_{j=1}^n Y_j$ – это множество совокупных производственных возможностей. Поэтому, если $y_j \in Y_j$ для всех $j = 1, \dots, n$, то $y \in Y$. Причем мощность множества производственных возможностей рынка региональных авиаперевозок однозначно больше мощности множества продуктов R^l .

На основании перечисленных параметров и множеств формируется система потребительских планов и производственных планов авиакомпаний, количественные оценки входа и выхода, а также оценивается совокупное количество каждого из продуктов, доступных участникам регионального рынка авиаперевозок. В результате получается оценка общего количества ресурсов рассматриваемого рынка (совокупные ресурсы) ψ .

Здесь также требуется договориться о знаках. Пусть отрицательными числами описываются все входы конкретного производителя, тогда все его выходы – это положительные числа. Рассмотрим региональные маршруты региональной маршрутной сети как выходы производителя на данном рынке. Здесь каждый вид продукта не только безусловно содержит соответствующие признаки и цену, но и является единственным. То есть, потребитель всегда выбирает конкретный региональный маршрут как наиболее полезный для себя продукт.

Взаимодействие авиакомпании и аэропорта также описывается теорией множеств. Аэропорт не является производителем на рынке региональных авиаперевозок, так как не создает независимый продукт, потребляе-



мый на этом рынке. Поэтому авиакомпания является единственным типом производителя при формировании множества производителей рынка региональных авиаперевозок, так как только авиакомпания производит необходимый потребителю продукт.

На входе любая авиакомпания получает необходимые для функционирования ресурсы: технические ресурсы воздушных судов, авиатопливо, услуги управления взлетом-посадкой воздушного судна, услуги регулирования воздушного движения, метеорологические услуги, труд работников авиакомпании и прочее. Причём производственный план авиакомпании выбирается так, чтобы при заданных ценах продукта максимизировать прибыль, то есть разницу между стоимостью выходов авиакомпании и затратами на обеспечение входа.

Рассмотрим подробнее отдельные свойства модели рынка региональных авиаперевозок. Первое свойство – аддитивность. Пусть у j -ой авиакомпании есть два различных региональных маршрута y_j^1 и y_j^2 – по определению непустые множества допустимых производственных планов, тогда сумма

$$y_j^1 + y_j^2$$

также является допустимым производственным планом, то есть:

$$(Y_j^1 + Y_j^2) \subset Y_j.$$

Действительно, если возможно выполнение рейсов авиакомпании по двум независимым региональным маршрутам (два производственных плана по отдельности допустимы), то их сумма – тоже допустимый производственный план. Одно из следствий аддитивности продукта – это аддитивность издержек.

Другим свойством является мультипликативность, то есть возможность умножения множества y_j на неотрицательное число t . Для авиакомпании это означает возможность изменения масштабов деятельности. Если $t > 1$, масштаб деятельности авиакомпании увеличивается. Если $t < 1$, соответственно масштаб деятельности авиакомпании уменьшается. Таким образом, если можно увеличить масштаб деятельности авиакомпании в рамках производственного плана y_j , это свидетельствует о появлении неубывающей отдачи от масштаба.

Соответственно, если можно уменьшить масштаб деятельности авиакомпании в рамках производственного плана y_j , то можно

говорить о формировании невозрастающей отдачи от масштаба. Рассмотрим ситуацию для j -й авиакомпании. Если существуют два независимых производственных плана y_j^1 и y_j^2 , то существует взвешенное среднее $t * y_j^1 + (1 - t) * y_j^2$, для любого t ($0 \leq t \leq 1$).

Так проявляется описанная выше невозрастающая отдача от масштаба. Данный частный случай математического описания четко поясняет возможность использования рассматриваемой теории локального рынка авиаперевозок для гражданской авиации страны в целом.

Выше была введена система цен p . Тогда, если известны система цен p (конечные цены единицы авиаперевозки для конкретного потребителя x_j) и стоимость производственного плана y_j (затраты на перелет по региональному маршруту y_j), то доход j -ой авиакомпании составляет $p * y_j$, а ее общий доход рассчитывается как $p * y$.

В рыночных условиях любая авиакомпания действует так, чтобы максимизировать собственную прибыль. В соответствии с этим предположением выбор каждой j -ой авиакомпанией производственного плана как некоторой совокупности региональных маршрутов из имеющегося производственного множества Y_j означает, что авиакомпания будет максимизировать свою прибыль на каждом региональном маршруте.

Поскольку общая максимальная прибыль может не существовать при произвольном p , то существует такое множество T_j элементов p из R^l , для которого прибыль является максимальной. Также во всей совокупности маршрутов всегда существует определенное множество региональных маршрутов, генерирующих максимальную прибыль для авиакомпании. Примем за аксиому выполнение неравенства $p * y_j > 0$ в строгом виде, то есть невозможность существования для авиакомпании как «рога изобилия», так и «вечного двигателя».

Тогда для каждой системы цен p , входящих в множество T_j , существует непустое множество $\eta_j(p)$ допустимых производственных планов, при выполнении которых авиакомпания генерирует максимальную прибыль. То есть, на пространстве продуктов рынка региональных авиаперевозок, составляющих региональную маршрутную сеть R^l , у каждой j -ой авиакомпании существуют производственные множества Y_j , представ-



Рис. 3. Динамика значений индекса Херфиндаля-Хиршмана для отдельных компаний и авиационных альянсов [выполнено авторами на основании собственных расчетов].

ляющие собой всю совокупность региональных маршрутов рассматриваемой авиакомпании, и только некоторая часть из них является множеством $\eta_j(p)$, приносящим авиакомпании прибыль при уровне цен p . Данная система цен p , максимизирующая прибыль авиакомпании, составляет множество T'_j . То есть, региональная маршрутная сеть каждой авиакомпании включает заведомо прибыльные и убыточные маршруты.

Рассмотрим функцию прибыли j -ой авиакомпании. Функция прибыли j -ой авиакомпании – это такая функция π на множестве цен p ($\pi_j(p)$), для которой существует максимум прибыли в системе цен p из множества цен региональных маршрутов T'_j в региональной маршрутной сети R^l . Математически это означает, что максимум прибыли существует в заданной системе цен p для $j = 1, \dots, n$, если $p \in \bigcap_{j=1}^n T'_j$, а функция π из $\bigcap_{j=1}^n T'_j$ – это функция общей прибыли.

Анализ структуры российского рынка авиаперевозок показывает, что данный рынок в текущем моменте является высококонцентрированным. На рис. 3 представлены данные о величине индекса Херфиндаля-Хиршмана (HHI), значения которого рассчитаны как для отдельных авиакомпаний, так и для альянсов авиакомпаний по панельным статистическим данным о количестве перевезенных пассажиров в 2014–2021 гг.

Как видно из рис. 3, в настоящее время на российском рынке перевозок пассажиров воздушным транспортом наблюдается высокая концентрация, снижающая уровень рыночной конкуренции. Анализ динамики

структурных сдвигов в рыночных сегментах показывает, что количество авиакомпаний, предлагающих маршруты местного, регионального и межрегионального уровня, имеющие ненапряженный пассажиропоток, в современных условиях недостаточно.

Предложенные выше модели описания основных участников рынка авиаперевозок позволяют сформировать единую модель системы отношений между ними как описание общего состояния рынка региональных авиаперевозок E . Пусть каждый потребитель характеризуется потребителемским множеством X_p , а каждый производитель – производственным множеством Y_j . Причем конкретные действия экономических агентов – потребителей и авиакомпаний – определяют текущее состояние рынка региональных авиаперевозок E .

Тогда для описания состояния рынка E необходимо использовать набор элементов (x_p, y_j) на пространстве R^l , размером $(m + n)$. Пусть любой элемент $(x-y)$, описывающий результат попарного взаимодействия всех агентов, является чистым спросом. По определению чистый спрос $x-y$ является элементом множества $X-Y$. Тогда избыточный спрос – это фактическое превышение чистого совокупного спроса всех агентов над ресурсами регионального рынка авиаперевозок $(x-y-\psi)$, который обозначается z . Избыточный спрос составляет множество Z .

Под рыночным равновесием будем понимать такое состояние регионального рынка авиаперевозок, когда избыточный спрос равен 0. Из определения равновесия ясно, что



чистый спрос всех агентов соответствует совокупным ресурсам, то есть: $x-y = \psi$. При чем состояние рыночного равновесия по определению не единственно.

Например, любое конкретное состояние (x, y) экономики E регионального рынка авиаперевозок является допустимым, если существует бесконечно большой набор сочетаний спроса на региональные маршруты, установлена желательная система цен, отсутствуют бюджетные ограничения потребителя, разработаны региональные маршруты, выполняемые авиакомпаниями в желательной системе цен при отсутствии избыточного спроса. Множество рыночных равновесий экономики E регионального рынка авиаперевозок обозначим M .

Производителем продукта на региональном рынке авиаперевозок является авиакомпания. У каждой авиакомпании есть выгодоприобретатели, заинтересованные в получении прибыли пропорционально доли владения капиталом авиакомпании. Тогда δ_j – это доля капитала j -ой авиакомпании, принадлежащая конкретному выгодоприобретателю.

Соответственно доли прибыли j -ой авиакомпании могут быть записаны как $\delta_1, \dots, \delta_n$, где $j \in [1, n]$, а δ_j – действительные числа ($\delta_j \geq 0$, $\sum \delta_j = 1$ для каждого j). Символ j в доле δ относит ее к конкретной авиакомпании, но не идентифицирует владельцев капитала. Функция прибыли j -ой авиакомпании описана ранее. Прибыль, возникающая в экономике E регионального рынка авиаперевозок, – это сумма всех произведений прибыли j -ой авиакомпании на долю δ_j : $\sum_{j=1}^n \delta_j * \pi_j(p)$. Прибыль j -ой авиакомпании всегда содержится в бюджете i -го потребителя. Поэтому математическое описание бюджета i -го потребителя следующее:

$$w_i = p * \psi_i + \sum_{j=1}^n \delta_j * \pi_j(p).$$

Мы полагаем, что в установленной системе цен в процессе выбора потребителем предложения j -ой авиакомпании (x, y) бюджетное ограничение будет иметь вид нестроного неравенства:

$$p * x_i \leq p * \psi_i + \sum_{j=1}^n \delta_j * p * y_j \text{ для каждого } i.$$

Суммируя для всех i , получим:

$$p * x \leq p * \psi + p * y.$$

Здесь становится понятен экономический смысл равновесия на рынке региональных авиаперевозок, который является целью управления отраслью в любом масштабе. По

нашему мнению, задача регулирования состоит в том, чтобы уравновесить элементы p_i множества цен P_i потребителя и элементы p_j множества цен P_j авиакомпании. Тогда целевая функция управления состоит в максимальном снижении разности множеств P_j и P_i , то есть устранении дополнения множества P_i до множества P_j , которое обозначается L_{ji} :

$$L_{ji} = P_j / P_i = \{p_j \in P_j \mid p_j \notin P_i\}.$$

Фактически стимулирование авиаперевозок при любом масштабе рынка представляет собой целенаправленные действия лиц, принимающих решения, для повышения спроса за счет увеличения ресурсов рынка, снижения бюджетных ограничений и сокращения затрат на вход авиакомпаний.

ВЫВОДЫ

Экономика E рынка региональных авиаперевозок имеет замкнутый характер, поэтому при выполнении описанных выше условий может быть обеспечено рыночное равновесие, выгодное для всех участников рынка. Необходимо обеспечить ситуацию, когда спрос потребителя удовлетворяется из совокупности региональных маршрутов, всегда существует конкретный региональный маршрут, выполнимый для авиаперелета, авиакомпания предоставляет региональный маршрут из своего производственного плана.

В условиях отсутствия избыточного спроса установление рыночного равновесия является результатом выбора парной связи обоими агентами регионального рынка авиаперевозок. Поэтому система цен должна быть такой, чтобы оба экономических агента рынка не стремились сделать другой выбор. Равновесие достижимо, если при выбранной системе цен ни один потребитель не может изменить бюджет перевозки без увеличения своих затрат, и ни одна авиакомпания не может увеличить свою прибыль.

На интуитивном уровне понятно, что при превышении бюджета потребителя на авиаперевозку по региональному маршруту для компенсации убытков авиакомпании необходимо ввести механизм регуляторного воздействия. Именно этот вывод является фундаментальным при рассмотрении экономики регионального рынка авиаперевозок в условиях квазиоткрытой экономики частной собственности.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Аладьев А. А. Мировой рынок авиаперевозок: современное состояние, тенденции, история и перспективы развития // *Colloquium-Journal*. – 2019. – № 13–10 (37). – С. 220–222. EDN: AORPGF.
2. Губенко А. В., Растова Ю. И., Панкратова А. Р. Современное состояние и перспективы развития рынка пассажирских авиаперевозок в России // *Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Экономика и экологический менеджмент*. – 2019. – № 2. – С. 82–90. EDN: KLMXDX.
3. Клочков В. В., Рождественская С. М. Анализ предпосылок формирования рынков сверхзвуковых пассажирских авиаперевозок и самолетов // *Инновации*. – 2019. – № 8 (250). – С. 60–66. EDN: OMXZSV.
4. Страдомский О. Ю., Самойлов И. А., Лесничий И. В. [и др.] Мониторинг рынка авиаперевозок и парка воздушных судов российских авиакомпаний // *Научный вестник ГосНИИ ГА*. – 2020. – № 32. – С. 17–28. EDN: YREDOE.
5. Николишвили Д. З. Международный рынок авиаперевозок в глобальной экономической системе // *Информация и инновации*. – 2022. – Т. 17. – № 1. – С. 38–43. EDN: ZVOMLS.
6. Орлова Л. В., Гиматдинова Э. М., Кондрацкий Е. О. Анализ последствий пандемии COVID-19 на состояние мирового рынка авиаперевозок // *Тенденции развития науки и образования*. – 2020. – № 67–4. – С. 137–140. EDN: AOOUNN.
7. Беленов О. Н., Шурчкова Ю. В. Особенности комплекса маркетинга на международном рынке пассажирских авиаперевозок // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Экономика и управление*. – 2020. – № 1. – С. 141–148. EDN: LHRQMD.
8. Ванжула А. В. Перспективы развития лоукостеров на российском рынке авиаперевозок // *Гагаринские чтения – 2020: Сб. тезисов докладов*, Москва, 27 декабря 2019 года – 17 апреля 2020 года. – М.: МАИ (национальный исследовательский университет), 2020. – С. 1392–1394. EDN: ZGTDNO.
9. Гусева В. И., Айдарова К. Р. Конкуренция на рынке услуг пассажирских авиаперевозок в Кыргызской Республике на современном этапе // *Вестник Кыргызско-Российского Славянского университета*. – 2020. – Т. 20. – № 7. – С. 16–20. EDN: OKUORK.
10. Куликова О. М., Пак В. В. Анализ рынка пассажирских авиаперевозок России // *Инновационная экономика: перспективы развития и совершенствования*. – 2020. – № 8 (50). – С. 56–61. EDN: KCZXXZ.
11. Рублев В. В. Перспективы развития рынка бюджетных пассажирских авиаперевозок в Республике Казахстан // *Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Экономика*. – 2020. – № 2. – С. 70–80. EDN: JATSBW.
12. Харченко О. А., Шумовская Н. Е. Тенденции развития мирового рынка международных авиаперевозок // *Исследования. Инновации. Практика*. – 2022. – № 5 (5). – С. 32–36. EDN: TAEUWE.
13. Макашин А. Е. Тенденции развития сервисных услуг сферы бизнес-авиации на современном российском рынке авиаперевозок // *Молодой ученый*. – 2021. – № 6 (348). – С. 347–348. EDN: RLZUTL.
14. Перевознюк С. В., Шараборина А. Д. Модели и методы исследования российского рынка международных пассажирских авиаперевозок // *Научный электронный журнал Меридиан*. – 2020. – № 9 (43). – С. 571–573. EDN: QBFWWK.
15. Саранин И. И. Ценообразование на рынке авиаперевозок // *Научно-исследовательский центр «Technical Innovations»*. – 2022. – № 9–1. – С. 188–191. EDN: GEJLHK.
16. Сафрончук М. В., Викулова Д. А. Ценовая дискриминация и методы ценообразования на рынке пассажирских авиаперевозок // *Экономика и управление: проблемы, решения*. – 2019. – Т. 9. – № 1. – С. 4–9. EDN: ASZIWO.
17. Скляр А. И., Купрюхин А. А. Факторы, влияющие на современное состояние рынка грузовых авиаперевозок // *Актуальные вопросы современной экономики*. – 2022. – № 4. – С. 33–39. EDN: OJDXAU.
18. Скрылева Е. В. О дискретной конкуренции на российском рынке пассажирских авиаперевозок // *Транспортное дело России*. – 2019. – № 1. – С. 231–233. EDN: YSWDQK.
19. Яскевич Д. И., Карлова Т. В. Анализ статистических данных по качеству авиаперевозок в РФ и перспектив их развития на логистических рынках // *Качество. Инновации. Образование*. – 2019. – № 3 (161). – С. 51–57. EDN: KFWVMQ.
20. Матюха С. В. Развитие модели рынка региональных авиаперевозок: регуляторное воздействие государства // *Креативная экономика*. – 2023. – Т. 17. – № 1. – С. 257–276. EDN: SBJOWQ.
21. Матюха С. В. Формирование организационно-экономического механизма развития региональной авиации России // *Дисс. ... докт. экон. наук*. – М.: Государственный университет управления, 2023. – 311 с. [Электронный ресурс]: https://guu.ru/files/dissertations/2023/02/matyuha_s_v/dissertation.pdf. Доступ 25.06.2023.
22. Бандурин А. В., Шилин А. Н., Дьяков М. М. Пассажирский транспорт в густонаселенных городах: проблемы, ограничения и решения // *Транспортное дело России*. – 2014. – № 1. – С. 191–194. EDN: SDVTDZ.
23. Хайман Д. Н. Современная микроэкономика: анализ и применение / В 2 т. – Т. 1. – М.: Финансы и статистика, 1992. – 362 с. ISBN 5-279-01135-5.
24. Балашов В. В., Смирнов А. В. Модель оценки спроса на пассажирские авиаперевозки, оплачиваемые пассажирами из собственных средств // *Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации*. – 2006. – № 104. – С. 24–31. EDN: KPHDBX.

Информация об авторах:

Бандурин Александр Владимирович – доктор экономических наук, профессор Факультета социальных наук и массовых коммуникаций Департамента психологии и развития человеческого капитала Финансового университета при Правительстве Российской Федерации, Москва, Россия, abander@mail.ru.

Матюха Сергей Владимирович – кандидат химических наук, доцент кафедры экономики и управления АНО ВО «Международный институт управления и права», Москва, Россия, m-83@bk.ru.

Статья поступила в редакцию 14.04.2023, актуализирована 05.10.2023, одобрена после рецензирования 21.11.2023, принята к публикации 22.11.2023.



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 629.421:629.423:620.178.3:620.178.7

DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-6-11>

Мир транспорта. 2023. Т. 21. № 6 (109). С. 96–102

Повышение пропускной способности локомотивного депо путем определения приоритета организационно-технических мероприятий



Георгий ГОГРИЧИАНИ



Наталья КОРНИЕНКО

Георгий Венедиктович Гогричани¹,
Наталья Владимировна Корниенко²

^{1, 2} АО «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (АО «ВНИИЖТ»), Москва, Россия.

¹ ORCID 0000-0001-8586-8068; РИНЦ Author ID: 762111.

² ORCID 0000-0002-1375-2071; РИНЦ Author ID: 1080941.

✉ ² korniyenko.natalia@vniizht.ru.

АННОТАЦИЯ

На технических станциях, имеющих пункты оборота локомотивов, одним из ключевых элементов, влияющих на пропускную способность станции и в целом железнодорожного полигона, является недостаточное техническое оснащение пунктов технического обслуживания локомотивов (ПТОЛ) – «барьерные места», препятствующие стабильному пропуску грузового поездопотока.

Для ликвидации таких «барьерных мест» в конкретном депо и исключения потерь, связанных с непроизводительными простоями транзитных поездов, а также для повышения эффективности работы ПТОЛ необходимо предусмотреть ряд организационно-технических мероприятий. Таких мероприятий может быть несколько и определить их приоритетность – довольно сложная задача. Эта сложность заключается в том, что критерии принятия решения, необходимые для правильного определения приоритетности, имеют разную значимость (влияние на процесс) и разные размерности при сопоставлении их между собой.

В статье предложено использовать специальный метод, проверенный на большом количестве самых разнообразных практических задач, который позволяет выбрать лучшее решение из рассматриваемых или определить их

приоритетность (полезность) для повышения пропускной способности локомотивного депо без ограничения числа критериев принятия решения при рассмотрении возможных организационно-технических мероприятий.

В работе предложено определение наиболее перспективной последовательности рассматриваемых организационно-технических мероприятий для повышения эффективности работы ПТОЛ при помощи метода экспертных оценок, основанного на многокритериальном оценивании, который подразумевает использование информации, необходимой для решения задачи, путем преобразования ее в безразмерную форму, что позволяет оперировать соответствующими исходными данными независимо от их размерности. Преобразование информации осуществляется по детерминированному алгоритму и не зависит от расчетчика, что свидетельствует об объективности полученного результата решения поставленной задачи.

Предложенный метод выбора наилучшего варианта из рассматриваемых, а также последовательности их выполнения, может быть использован также для решения подобных задач в случае отсутствия или недостаточности статистических данных без проведения сложных экономических расчетов.

Ключевые слова: железнодорожный транспорт, грузовой поездопоток, железнодорожный полигон, коэффициент значимости, метод экспертных оценок, пропускная способность локомотивного депо, эффективность работы ПТОЛ.

Для цитирования: Гогричани Г. В., Корниенко Н. В. Повышение пропускной способности локомотивного депо путем определения приоритета организационно-технических мероприятий // Мир транспорта. 2023. Т. 21. № 6 (109). С. 96–102. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-6-11>.

Полный текст статьи на английском языке публикуется во второй части данного выпуска.
The full text of the article in English is published in the second part of the issue.

ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях управление движением на железных дорогах России осуществляется посредством перехода от региональных принципов организации эксплуатационной работы к полигонным технологиям, однако на практике в полной мере реализовать принцип сквозного управления не всегда представляется возможным ввиду ограничения пропускной способности железнодорожных направлений из-за наличия «узких» мест, которыми, в том числе, являются станции стыкования родов тока. С позиции тягового обслуживания российская железнодорожная сеть представляет собой «лоскутное одеяло», на стыках которого в настоящее время расположено 25 технических станций стыкования родов тока, или «барьерных» мест, ограничивающих в движении груженный поездопоток.

Станции стыкования родов тока являются также и станциями стыкования участков обращения локомотивов. Одним из «индикаторов», определяющих недостаточную пропускную способность станции и в целом железнодорожного полигона, является недостаточное техническое оснащение пунктов технического обслуживания локомотивов (ПТОЛ).

ПТОЛ на технических станциях – это система массового обслуживания локомотивов, где одним из устройств локомотивного хозяйства, по которому определяется наличная пропускная способность участка обращения локомотивов, являются стойла для выполнения технического обслуживания ТО-2. Численность локомотивного парка неразрывно связана с мощностью депокских устройств.

Цель работы заключается в разработке решений, направленных на повышение пропускной способности локомотивного депо, что, как общеизвестно на железнодорожном транспорте, является одним из основных возможных условий роста производительности перевозок. Теория, на которой строится решение задачи, относится к широко применяемой в мировой практике теории принятия решений. В АО «ВНИИЖТ» эта теория с успехом применяется при решении ряда практических задач различной направленности [1–4].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Авторы используют метод экспертных оценок, основанный на многокритериальном

оценивании, с привлечением специалистов-экспертов. В основу метода закладывается их мнение относительно поставленной задачи и использования критериев принятия решения. Существо задачи основано на математической обработке значений критериев принятия решений.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Определение лимитирующего элемента

Оборот локомотивов на технической станции «включает в себя такие элементы как «от прибытия до контрольного поста (КП)», «от КП до ТО-2», «проведение ТО-2», «от ТО-2 до КП» и «от КП до отправления» [5]. Как правило, согласно статистическим данным, оборот локомотива по станции лимитирует такой элемент как «от КП до ТО-2», где среднестатистическое значение ожидания постановки локомотива на смотровую канаву составляет более одного часа. Это связано, в основном, с недостаточным путевым развитием ПТОЛ (недостаточное количество путей для проведения технического обслуживания локомотивов в объеме ТО-2 и их малая вместимость) и недостаточным количеством стойл для проведения ТО-2.

Проведенные авторами исследования позволяют утверждать (станция Карымская Забайкальской железной дороги, станция Бабаево Октябрьской железной дороги), что на технических станциях одним из «индикаторов», определяющих недостаточную пропускную способность станции, железнодорожного полигона, служит недостаточное техническое оснащение ПТОЛ.

Согласно статистике [5] в 2017 году по станции Карымская 73,53 % электровозов ожидали освобождения стойла более 0,5 часа, 45,2 % локомотивов – более одного часа. Средний простой электровозов в рассматриваемый период составил один час. По станции Бабаево по итогам 2020 года доля прибывших с поездами электровозов, поступающих под ТО-2, составляет 30 %, при этом доля такого элемента как проход локомотивом контрольного поста до захода на смотровую канаву для проведения ТО-2 в обороте локомотива по станции составляет 40 % (рис. 1).

Согласно проведенному анализу основная доля времени ожидания освобождения стойл для проведения ТО-2 электровозами и постоянного, и переменного тока начинается от одного часа и более, причем для времени





Рис. 1. Анализ продолжительности простоя локомотивов постоянного и переменного тока от КП до ТО-2 на станции Бабаево за 2020 год [выполнено авторами].

ожидания локомотивов постоянного тока характерны более длительные периоды ожидания – от двух до четырех часов.

Выбор организационно-технических мероприятий

Для исключения потерь, связанных с непроизводительными простоями транзитных поездов без переработки в ожидании поездного локомотива и задержками поездов на подходах к станции из-за ожидания локомотивами освобождения ремонтных стоек для проведения ТО-2, а также в целях повышения эффективности работы ПТОЛ целесообразно предусмотреть следующие организационно-технические мероприятия P :

1. увеличение количества смотровых канав P_1 на существующих путях ПТОЛ;
2. увеличение количества путей и смотровых канав P_2 на территории ПТОЛ;
3. при невозможности развития существующей территории ПТОЛ рассмотреть варианты размещения ПТОЛ с более развитым в техническом отношении путевым хозяйством непосредственно в парках приема-отправления поездов для сокращения потерь времени, связанных с передвижением локомотивов на тяговую территорию – P_3 ;
4. переход от жесткой специализации смотровых канав на «плавающую, гибкую» специализацию, технологию (постановка на любую из канав любой серии локомотива как постоянного, так и переменного тока) – P_4 ;
5. переход P_5 от жесткой специализации смотровых канав на «плавающую, гибкую» специализацию за счет перехода на двухсистемные электровозы;
6. установление минимального фиксированного времени P_6 занятия ремонтных стоек (пересмотр существующих нормативов времени);
7. сокращение P_7 нормативного времени на проведение технического обслуживания локомотивов за счет увеличения численности работников (штата) ПТОЛ.

Предложенные мероприятия позволяют увеличить пропускную способность локомотивных депо, расположенных на технических станциях грузонапряженных участков сети ОАО «РЖД», что, в свою очередь, приведет к увеличению пропускной способности самих станций и прилегающих к ним железнодорожных перегонов за счет сокращения время нахождения готовых к отправлению грузовых составов (транзита без переработки) в ожидании поездного локомотива, а также к увеличению участковой скорости на подходах к техническим станциям.

Для решения задачи приняты критерии K принятия решения для определения лучшего организационно-технического мероприятия [6; 8]:

1. процент увеличения пропускной способности технической станции, K_1 – чем больше процент, тем лучше;
2. процент увеличения пропускной способности железнодорожных перегонов, прилегающих к техническим станциям, K_2 – чем больше процент, тем лучше;
3. процент сокращения простоя готовых к отправлению поездов в ожидании поездного локомотива, K_3 – чем больше процент, тем лучше;
4. процент сокращения потребного рабочего парка локомотивов, K_4 – чем больше процент, тем лучше;
5. процент сокращения технологического резерва локомотивов, K_5 – чем больше процент, тем лучше;
6. процент сокращения продолжительности проведения работ, K_6 – чем больше процент, тем лучше;
7. экономический эффект, K_7 , млн руб. / год – чем больше, тем лучше;
8. стоимость проведения работ, K_8 , млн руб. – чем меньше, тем лучше;
9. стоимость обслуживания выполненных организационно-технических мероприятий, K_9 , млн руб. / год – чем меньше, тем лучше.

Таблица 1

Значения критериев принятия решения [выполнено авторами]

	Организационно-технические мероприятия						
Критерии	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅	P ₆	P ₇
K ₁ , %	15	25	10	25	30	20	25
K ₂ , %	15	25	10	25	30	20	25
K ₃ , %	15	25	10	25	30	20	25
K ₄ , %	10	20	10	10	20	15	20
K ₅ , %	10	20	5	10	20	15	20
K ₆ , %	0	0	0	0	0	20	30
K ₇ , млн руб. /год	1	1,5	1,5	0,8	1	0,9	1
K ₈ , млн руб.	0,5	0,8	3	0,3	3	0,2	0
K ₉ , млн руб. /год	0,5	0,8	0	0	1	0,2	1

Критерии принятия решения предлагаются квалифицированными специалистами (в данном случае экспертами).

Пример числовых значений критериев K₁, ... K₉ принятия решения по каждому из мероприятий P₁, ... P₇ приведен в табл. 1

Определение приоритета организационно-технических мероприятий методом экспертных оценок

Согласно данным табл. 1, целесообразно дать оценку значимости (важности для рассматриваемого процесса) каждого показателя K_i (то есть дать оценку в пределах от 1 до 7 каждому показателю отдельно по каждой горизонтали).

Этот процесс состоит из четырех этапов.

Первый этап

По цифровым значениям критериев принятия решения, указанным в табл. 1, определяем места рассматриваемых мероприятий от 1 до 7 (табл. 2), при этом лучшему месту соответствует большая цифра. Процесс присвоения мест начинается с большей цифры (в нашем случае с 7). В частном случае внутри одного критерия места для разных мероприятий могут совпадать.

В табл. 2 места мероприятий P₁, ... P₅ по критерию K₆ (процент сокращения продолжительности работ) отмечены самой низкой цифрой в связи с полным отсутствием этого сокращения.

Второй этап

Уточним полученные результаты путем использования линейной интерполяции (определим уточненные места каждого мероприятия по конкретным критериям). «Линейная интерполяция – простейший и часто используемый

вид интерполяции. Она состоит в том, что заданные точки с координатами x_i, y_i при i = 0, 1, 2, ... n соединяются прямолинейными отрезками, а функцию y(x) можно приближенно представить в виде ломаной. Уравнения каждого отрезка ломаной в общем случае разные. Поскольку имеется n интервалов (x_{i-1}, x_i), то для каждого из них в качестве уравнения интерполяционного многочлена используется уравнение прямой, проходящей через две точки: для i-го интервала в общем можно написать уравнение прямой, проходящей через точки (x_{i-1}, y_{i-1}) и (x_i, y_i)» [9]:

$$\frac{y - y_{i-1}}{y_i - y_{i-1}} = \frac{x - x_{i-1}}{x_i - x_{i-1}}. \quad (1)$$

В рассматриваемом нами случае принимаем, что x, x_i, x_{i-1} → μ, μ_i, μ_{i-1}, где μ, μ_i, μ_{i-1} – места критерия K_i.

При этом μ – уточняемое место, μ_i, μ_{i-1} – высшее и низшее места соответственно, y, y_i, y_{i-1} → ч, ч_i, ч_{i-1} – значения критерия K_i, при этом ч – значение критерия K_i для уточняемого места, ч_i, ч_{i-1} – значения критерия K_i для высшего и низшего мест соответственно.

Определим уточненные места для P каждого из критериев.

Для примера здесь уточним места для критерия K₇ (экономический эффект) при увеличении смотровых канав на существующих путях ПТОЛ (мероприятие P₁). При проведении расчетов не требуется уточнение низшего и высшего места, все остальные промежуточные места уточняются, тогда формула (1) для рассматриваемого случая принимает следующий вид:

$$\frac{\mu_7^1 - \mu_7^4}{\mu_7^2 - \mu_7^4} = \frac{\mu_7^1 - \mu_7^4}{\mu_7^2 - \mu_7^4}. \quad (2)$$

При увеличении количества смотровых канав на существующих путях ПТОЛ (мероприятие P₁)





Таблица 2

**Распределение мест мероприятий согласно информации, размещенной в таблице 1
[выполнено авторами]**

Критерии	Организационно-технические мероприятия						
	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅	P ₆	P ₇
K ₁	4	6	3	6	7	5	6
K ₂	4	6	3	6	7	5	6
K ₃	4	6	3	6	7	5	6
K ₄	5	7	5	5	7	6	7
K ₅	5	7	4	5	7	6	7
K ₆	0	0	0	0	0	6	7
K ₇	6	7	7	4	6	5	6
K ₈	4	3	2	5	2	6	7
K ₉	5	4	7	7	3	6	3

Таблица 3

Уточненное распределение предлагаемых критериев выбора наиболее перспективного варианта организационно-технических мероприятий по мере значимости (уточненные места) [выполнено авторами]

Критерии	Организационно-технические мероприятия						
	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅	P ₆	P ₇
K ₁	4	6	3	6	7	5	6
K ₂	4	6	3	6	7	5	6
K ₃	4	6	3	6	7	5	6
K ₄	5	7	5	5	7	6	7
K ₅	5	7	4	5	7	6	7
K ₆	0	0	0	0	0	6	7
K ₇	4,86	7	7	4	4,86	4,43	4,86
K ₈	6,17	5,67	2	6,50	2	6,67	7
K ₉	5	3,8	7	7	3	6,2	3

приятие P₁) критерий K₇ имеет значение $x = \mu_7^1 = 1$ (табл. 1), по своей значимости располагается на 6 месте, $y = \mu_7^1 = 6$ (табл. 2).

Значения согласно табл. 1, 2 для:

- низшего места $x_{i-1} = \mu_7^4 = 4, y_{i-1} = \mu_7^4 = 0,8$;
- высшего места $x_i = \mu_7^2 = 7, y_i = \mu_7^2 = 1,5$.

Тогда $\frac{1-0,8}{1,5-0,8} = \frac{\mu_7^1-4}{7-4}$, откуда $\mu_7^1 = 4,86$.

Таким образом получаем, что критерий K₇ при проведении организационно-технического мероприятия P₁ по своей значимости будет располагаться не на 6, а на 4,86 месте. Аналогично уточняем места для каждого из рассматриваемых критериев, полученные результаты сводим в табл. 3. Для того, чтобы строже определять уточненные места, полученные значения не округляем, а оставляем с учетом цифр после запятой¹.

¹ Для более точного определения мест мероприятий можно использовать нелинейную аппроксимацию (полином Лагранжа). Уточнение с приведенными примерами может доходить до 2–2,5 %.

Третий этап

Необходимо определить коэффициент значимости для каждого критерия на основе экспертных оценок. «Экспертный подход позволяет решать задачи, не поддающиеся решению обычным аналитическим способом, в том числе:

- выбора лучшего варианта решения среди имеющихся;
- поиска возможного решения сложных задач;
- получения рекомендаций от специалистов со знаниями и опытом в определенной сфере» [9].

Для решения задачи привлекаются независимые эксперты в области исследуемого вопроса (нечетное количество человек). «Участники экспертной группы неизвестны друг другу, взаимодействие членов группы при заполнении анкет полностью исключается. Эксперты должны обладать опытом в областях, соответствующих решаемым задачам. При

Таблица 4

Коэффициенты значимости критериев (0–1) [выполнено авторами]

	K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	K_6	K_7	K_8	K_9
Эксперт 1	1	1	0,5	0,5	0,1	0,2	0,3	0,5	0,3
Эксперт 2	1	0,9	0,8	0,8	0,2	0,3	0,7	0,8	0,6
Эксперт 3	1	1	0,6	0,6	0,2	0,2	0,7	0,6	0,4
Среднее значение	1	0,97	0,63	0,63	0,17	0,23	0,57	0,63	0,43

подборе экспертов в общем случае следует учитывать момент личной заинтересованности, который может стать существенным препятствием для получения объективного суждения» [9; 10]. Такая проблема в настоящей работе не рассматривается.

Методы получения индивидуального мнения членов экспертной группы основаны на получении информации от экспертов, опрашиваемых независимо друг от друга, с последующей обработкой полученных данных². Основные преимущества метода индивидуального экспертного оценивания состоят в их оперативности, возможности в полной мере использовать индивидуальные способности эксперта, отсутствии давления со стороны авторитетов и в низких затратах на экспертизу³.

Перед экспертами ставится задача определения коэффициентов значимости каждого из рассматриваемых критериев принятия решения наиболее перспективного варианта организационно-технических мероприятий от 0 до 1 (при этом несколько критериев могут иметь одинаковый приоритет, чем больше значение – тем лучше).

На основе этой оценки составляется табл. 4 и рассчитывается среднее значение коэффициента значимости для каждого из критериев принятия решения [11; 12].

Четвертый этап

После получения средневзвешенного значения коэффициента значимости, еще раз уточняем распределение предлагаемых критериев принятия решения для определения наиболее перспективного варианта организационно-технических мероприятий по их приоритету (уточненные места) путем перемножения соответствующего места нужного критерия (табл. 3) и полученного средневзвешенного

коэффициента значимости (табл. 4). Полученные результаты представлены в табл. 5.

По данным табл. 5 путем сложения цифр отдельно по каждой вертикали можно получить рекомендуемую приоритетность проведения мероприятий $P_1, \dots, P_7$ по критериям $K_1, \dots, K_9$ при решении задачи о повышении эффективности работы ПТОЛ. Большей сумме цифр будет соответствовать лучшее организационно-техническое мероприятие по ряду рассматриваемых критериев [13–15].

Как видно, лучшим является мероприятие P_7 – сокращение нормативного времени на проведение цикловых операций технического обслуживания локомотивов за счет увеличения численности работников (штата) ПТОЛ.

Лучший вариант организационно-технического мероприятия получен при сравнении этих мероприятий по комплексу критериев с учетом значимости этих критериев между собой.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложено определение наиболее перспективной последовательности рассматриваемых организационно-технических мероприятий для увеличения пропускной способности ПТОЛ при помощи метода экспертных оценок при решении многокритериальной задачи.

Следует отметить, что при решении задачи об увеличении пропускной способности локомотивного депо лучшим мероприятием оказалось увеличение штата работников ПТОЛ. Полученный результат также можно обосновать тем, что проведение иных мероприятий, к примеру, таких как увеличение количества смотровых канав на существующих путях ПТОЛ, увеличение количества путей и смотровых канав на территории ПТОЛ и т. д. требуют значительных финансовых и временных затрат. Такие решения в условиях дефицита пропускной способности, особенно на грузонапряженных направлениях, когда требуется решения вопроса «здесь и сейчас», не всегда могут быть рациональными, что подтвердилось проведенным исследованием.



² Орлов А. И. Экспертные оценки. Учеб. пособие. – М., 2002. – 31 с.

³ Экспертные оценки // Stat Soft: SPC Consulting. [Электронный ресурс]: <http://www.spc-consulting.ru/app/expert.htm>. Доступ 21.03.2023.

Уточненное распределение предложенных критериев принятия решения при выборе наиболее перспективного варианта организационно-технических мероприятий с учетом коэффициента значимости критериев [выполнено авторами]

Критерии	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7
K_1	4,00	6,00	3,00	6,00	7,00	5,00	6,00
K_2	3,88	5,82	2,91	5,82	6,79	4,85	5,82
K_3	2,52	3,78	1,89	3,78	4,41	3,15	3,78
K_4	3,15	4,41	3,15	3,15	4,41	3,78	4,41
K_5	0,85	1,19	0,68	0,85	1,19	1,02	1,19
K_6	0	0	0	0	0	1,38	1,61
K_7	2,77	3,99	3,99	2,28	2,77	2,53	2,77
K_8	3,89	3,57	1,26	4,095	1,26	4,20	4,41
K_9	2,15	1,63	3,01	3,01	1,29	2,67	1,29
Сумма значений	23,21	30,39	19,89	28,99	29,12	28,58	31,28

Предложенный метод выбора лучшего варианта из рассматриваемых, а также последовательности их рационального по многим критериям выполнения на основе экспертных оценок может быть использован для решения подобных по постановке вопроса задач, когда нужно получить объективно лучшее решение из рассматриваемых.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Гогричани Г. В. Объективное определение по результатам сравнений (испытаний) перспективного объекта при неограниченном множестве рассматриваемых противоречивых критериев // Вестник ВНИИЖТ. – 2006. – № 6. – С. 14–15. EDN: HYOXKV.
2. Гогричани Г. В., Ляшенко А. Н. Регулярный метод решения задач по нахождению лучшего варианта из рассматриваемых применительно к транспортному комплексу / Сб. трудов I Международной научно-практ. конференции «Наука 1520 ВНИИЖТ: Загляни за горизонт». – М.: АО «ВНИИЖТ», 2021. – С. 83–86. EDN: YFFVLU.
3. Гогричани Г. В., Казаринова Д. А. Выбор перспективного противоюзного устройства из рассматриваемых по совокупности противоречивых критериев // Вестник ВНИИЖТ. – 2014. – № 6. – С. 26–32. EDN: TOLHNF.
4. Мачерет Д. А., Гогричани Г. В., Сыродоева Т. И. Экономико-математический подход к вопросам кадровых перемещений в организациях железнодорожного транспорта // Экономика железных дорог. – 2015. – № 37. – С. 68–76. EDN: UAECKN.
5. Мехедов М. И., Корниенко Н. В. Влияние технического и технологического оснащения пункта технического обслуживания локомотивов на пропускную спо-

собность железнодорожной линии // Вестник ВНИИЖТ. – 2021. – Т. 80. – № 4. – С. 225–232. EDN: DDAGDB.

6. Кини Р. Л., Райфа Х. Принятия решений при многих критериях: предпочтения и замещения / под ред. И. Ф. Шахнова; пер. с англ. В. В. Подиновского и др. – М.: Радио и связь, 1981. – 560 с.

7. Котенко А. Г. Методология риск-ориентированного планирования качественных показателей эксплуатационной работы железных дорог / Дисс ... докт. техн. наук. – СПб., ПГУПС, 2014. – 330 с. EDN: ZPKMED.

8. Котенко А. Г. О подходах к снижению вычислительной сложности логических задач анализа риска // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2011. – № 1 (26). – С. 180–188. EDN: NTZCGJ.

9. Дanelян Т. Я. Формальные методы экспертных оценок // Экономика, статистика и информатика. – 2015. – № 1. – С. 183–187. EDN: TQJPJL.

10. Орлов А. И. Экспертные оценки // Заводская лаборатория. – 1996. – Т. 62. – № 1. – С. 54–60. [Электронный ресурс]: <http://orlovs.pp.ru/stat/s3p8exp.zip>. Доступ 25.04.2023.

11. Емельянов С. В., Ларионов О. И. Многокритериальные методы принятия решений. – М.: Знание, 1985. – 32 с.

12. Ларичев О. И. Принятие решений как научное направление: методологические проблемы. Системные исследования. Методологические проблемы. Ежегодник / Под ред. Д. М. Гвишиани, В. Н. Садовского. – № 14. – М.: Наука, 1982. – С. 227–243. [Электронный ресурс]: https://raai.robobof.ru/about/persons/larichev/papers/text/Larichev_1982.pdf. Доступ 25.04.2023.

13. Aven, T. Misconceptions of Risk. John Wiley and sons Inc., 2010, 264 p. ISBN 978-0-470-68388-0.

14. Aven, T. Risk Analysis: Assessing Uncertainties Beyond Expected Values and Probabilities. John Wiley and Sons Inc., April 2008, 208 p. ISBN 978-0-470-69443-5.

15. Aven, T., Vinnem, J. E. Risk Management: With Application from the Offshore Petroleum Industry. Springer, 2007, 211 p. ISBN 978-1-84628-652-0. ●

Информация об авторах:

Гогричани Георгий Венедиктович – доктор технических наук, старший научный сотрудник АО «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (АО «ВНИИЖТ»), Москва, Россия, gogrichiani.g@vniizht.ru.

Корниенко Наталья Владимировна – ведущий технолог научного центра «Цифровые модели перевозок и технологии энергосбережения» АО «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (АО «ВНИИЖТ»), Москва, Россия, korniyenko.natalia@vniizht.ru.

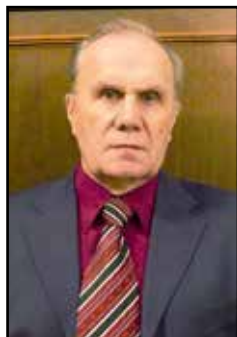
Статья поступила в редакцию 19.05.2023, одобрена после рецензирования 10.09.2023, принята к публикации 15.09.2023.



Транспортная кибербезопасность



Евгений НЕСТЕРОВ



Виктор ЦВЕТКОВ

**Евгений Александрович Нестеров ¹,
Виктор Яковлевич Цветков ²**

^{1,2} Российский университет транспорта, Москва, Россия.

¹ ORCID 0009-0009-9100-3410; Web of Science Researcher ID: JUF-4957-2023; Scopus ID: 58707809100; PИИЦ SPIN-код: 9008-0780; PИИЦ Author ID: 1119794.

² ORCID 0000-0003-1359-9799; Web of Science Researcher ID J-5446-2013; Scopus ID: 000313599799; PИИЦ Author ID: 1399061.

✉ ² cvj2@mail.ru.

АННОТАЦИЯ

Одной из особенностей цифровой трансформации транспортной отрасли является тенденция повышения числа кибератак, которые входят в число информационных угроз. Транспортная кибербезопасность является более широким явлением по сравнению с кибератакой и информационной безопасностью. Она включает организационную безопасность и другие виды безопасности, которые в таком виде в информационной области не встречаются.

Актуальность транспортной кибербезопасности дополнительно обусловлена широким применением информационно-вычислительных сетей и информационных пространств. Киберпространство в транспортной сфере можно трактовать как совокупность сетей, информационных пространств, коммуникационного и реального пространства. Включение реального пространства является отличительной особенностью транспортного киберпространства.

При этом рост информационных угроз происходит независимо от развития транспортного киберпространства.

Он обусловлен цифровизацией общества, включая сферу транспорта. Киберпространство создаёт предпосылки для киберугроз нового качества, и для новых киберугроз прежние методы информационной безопасности становятся неэффективными. Возникновение информационных угроз продиктовано не столько цифровизацией, сколько большей открытостью информационных и коммуникационных технологий. Мультимодальные перевозки как отношения между многими организациями также способствуют росту киберугроз и снижению информационной безопасности.

Статья предлагает построенный на обзоре тематических публикаций анализ состояния и подходов, применяемых в транспортной кибербезопасности. Приведена систематика угроз и рисков транспортной кибербезопасности. Введены понятия «железнодорожная информация», «транспортная информация». Описаны уязвимости транспортного киберпространства.

Ключевые слова: транспорт, транспортное киберпространство, транспортная кибербезопасность, киберфизические системы, сетевые системы, цифровые риски, киберфизические угрозы.

Для цитирования: Нестеров Е. А., Цветков В. Я. Транспортная кибербезопасность // Мир транспорта. 2023. Т. 21. № 6 (109). С. 103–109. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-6-12>.

Полный текст статьи на английском языке публикуется во второй части данного выпуска.
The full text of the article in English is published in the second part of the issue.

ВВЕДЕНИЕ

Цифровизация трансформирует железные дороги во всем мире. Одной из особенностей цифровой трансформации любой отрасли, включая железную дорогу, является повышенная подверженность кибератакам [1–3]. Железнодорожная отрасль уязвима для таких атак, поскольку количество цифровых элементов, а также количество интерфейсов между цифровыми и физическими компонентами в железнодорожных системах продолжает расти. Увеличение количества элементов и интерфейсов требует новых структур, концепций и архитектур для обеспечения устойчивости железнодорожной системы к проблемам кибербезопасности, таким как отсутствие проактивности, отсутствие целостного подхода и старение систем безопасности, подверженных будущим киберугрозам.

Железнодорожный транспорт является важной производственной отраслью. В настоящее время в сфере транспорта существует киберпространство как промышленный кластер, включающий интеграцию информационных систем, интеллектуальных транспортных систем, технологии Интернета вещей, транспортные кибер-физические системы, телекоммуникационные сети, цифровую железную дорогу [4] и прочее. Нарушение транспортной кибербезопасности может создать множество критических ситуаций. Современные транспортные системы не работают изолированно, а используют разные сети для улучшения бизнес-процессов. Следствием этого развития является повышенная подверженность киберугрозам.

Целью исследования, описанного в статье, являлись анализ состояния транспортной кибербезопасности и используемых подходов, описанных в научной литературе, систематики угроз и рисков транспортной кибербезопасности, уязвимостей транспортного киберпространства.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Причины киберугроз

Киберпространство железной дороги включает линии связи и точки доступа, а также точки управления транспортом. На железнодорожном транспорте широко практикуют корпоративный бизнес. Это особенно заметно в мультимодальных перевозках. В этом бизнесе участвует большое количество организаций и лиц. Большое количество участников корпоративного бизнеса создает большое количество связей, в которых существует много точек доступа. Связи растут в кубической прогрессии. Связи и точки доступа создают посторонним лицам

возможность доступа в киберпространство, то есть создают киберугрозы. Эти угрозы следует отнести к внешним угрозам.

В киберпространстве дополнительно функционирует большое количество разнообразных программ, которые не всегда должным образом согласованы. Рассогласование программного обеспечения создает дополнительные угрозы, пропорциональные объему сети в киберпространстве. Специфика коммуникаций на транспорте требует введения понятия «транспортная информация». В сфере железнодорожного транспорта транспортная информация (ТИ) становится железнодорожной информацией (ЖИ). Эта информация делится на управляющую и дескриптивную. Несанкционированный доступ к любой из этих информационных представляет угрозу.

Дополнительным источником киберугроз являются организационные или нормативные угрозы. Большое количество нормативных документов разных отраслей и организаций не согласованы полностью. Рассогласование нормативной документации служит источником внутренних угроз функционированию транспортной системы. Особенностью ТИ и ЖИ является то, что они организованы в блоки, которые обладают свойством целостности и системности. Возможное нарушение целостности информации также представляет собой причину угрозы. Таким образом, нормативы, линии коммуникации, точки доступа, информационные блоки создают внешние и внутренние киберугрозы.

Железнодорожная инфраструктура все больше переходит к интеллектуальным и киберфизическим системам, что создает новые риски и возможности для киберпреступлений.

Существуют проблемы в работе транспортной инфраструктуры, проблемы, связанные с большими данными [5], имеющие свою специфику для железных дорог [6], отсутствует законодательство о транспортной кибербезопасности.

Меры противодействия кибератакам на железнодорожном транспорте находятся в состоянии разработки. Пока идет процесс систематизации рисков и их последствий, которых следует избегать. Например, эти риски систематизированы в работе [7]. С позиций категориального анализа можно ввести понятие категории риска или рискованных категорий. К числу рискованных категорий относят: задержки движения; антропоэнтропию; столкновения; повреждение путей; террористические акты; человеческие жертвы; техногенные факторы; потерю конкурентоспособности; утечку ценной информации.

На объектах транспортной инфраструктуры периодически возникают аномальные или нештатные ситуации, ряд из которых описан в [1]. Эти случаи обусловлены развитием ИТ технологий и возможностью умышленного или неумышленного доступа к каналам связи и вмешательства в каналы управления транспортом.

При этом доступ к конфиденциальной информации может быть не только прямым, но и косвенным. Например, информация, передаваемая по электронной почте, является открытой не менее чем в семи точках на разных узлах передачи. Здесь следует отметить такую угрозу как передача служебной информации или информации о служебной информации в личных почтовых сообщениях. Для предотвращения этой угрозы, например, в Великобритании запрещено использовать служебную электронную почту для передачи личной информации или в частные адреса лиц.

Инициатива Shift2Rail.

В исследовании [8] рассмотрено несколько европейских проектов, посвященных кибербезопасности, в контексте Shift2Rail.

В рамках пяти этапов проекта Shift2Rail был реализован ряд рабочих пакетов (IP2 Technical Demonstrators, Advanced Traffic Management and Control Systems¹), пятый этап завершился в октябре 2023 года.

Для повышения безопасности киберпространства применяют в том числе методы стандартизации и стандарты ISO. Метод стандартизации и стандарты подразделяют на четыре группы: международные, национальные, отраслевые и в рамках конкретного предприятия.

Доминанты в обеспечении безопасности

Среди множества технологий безопасности в киберпространстве транспортной инфраструктуры на основе анализа и обобщения были выявлены доминирующие или наиболее важные для транспортной отрасли технологии [10]. Эти технологии называют доминантами безопасности. Среди них следует выделить стандартные – такие как контроль доступа, и специальные – типа редукции точек входа. Кроме того, можно отметить когнитивно-информационные технологии типа технология «рукопожатия», технология унифицированного центра безопасности и т. д. [11].

¹ [Электронный ресурс]: https://projects.shift2rail.org/s2r_ip_TD_r.aspx?ip=2&td=1bccaf76-7915-4283-8b52-36afdb1bdf42.

Безопасность контроля доступа

Безопасность контроля доступа является основным вопросом для обеспечения безопасности любой системы управления или технической системы. Типичный подход к реализации доступа заключается в использовании списка (матрицы) управления доступом (ACL), управление доступом на основе ролей (RBAC) [12], управление доступом на основе задач (TBAC) [13]. Технологии контроля доступа делят на четыре категории: командный (TMAC), пространственный [14], когнитивный (CAC), контекстный (CBAC) [15]. Пространственный контроль связан с действиями в реальном пространстве и требует организации физической защиты. TMAC требует коммуникационной, информационной и криптографической защиты. Когнитивный контроль доступа требует анализа когнитивных моделей и использования когнитивной логики. Контекстный контроль доступа требует применения семантического анализа и латентного анализа передаваемой ТИ и ЖИ. Дополнительно ко всему в целях безопасности применяют аутентификацию личности клиента, методологию единого входа и т. д. В [16] обобщены требования к контролю доступа.

Одним из методов является использование списка безопасных данных. Некорректный список безопасных данных создает некорректный контроль доступа. Это может привести к опасным сценариям, когда некорректные данные могут быть использованы для ослабления безопасности инфраструктуры.

Безопасность передачи информации

Важным фактором киберпространства является безопасность передачи информации. Технология Enterprise Service Bus (ESB) используется для понимания нескольких систем, совместно использующих данные и услуги на железнодорожной платформе обмена информацией.

Безопасность хранения информации и ресурсов

Обеспечение надежного хранения информации, моделей и ресурсов является важной задачей безопасности ЖИ и ТИ. Базы данных являются слабым звеном в этой проблеме, поскольку широко используют типовые методы запросов и поиска, а главное – типовые и простые структуры данных, так как базы данных ориентированы на простоту и доступность, в то время как технологии безопасности требуют ограничения доступа и уникальности форм хранимой информации. Облачная обработка и облачное хранение частично решают



данную проблему. Однако применение облачных и туманных технологий вычислений усложняет структуру управления информацией. Это влечет рост угроз кибербезопасности в технологиях управления информацией. Простая технология управления несет меньшие риски. Сложная технология управления информацией несет *большие* риски и большее число нештатных ситуаций. Эту проблему отчасти решает технология специализированных хранилищ данных.

Центр управления безопасностью [11]

Эти функции выполняют ситуационные центры. Централизация управления безопасностью является эффективной организационной мерой, исключающей мелкие и случайные проникновения в доступ к конфиденциальной информации. Ситуационные центры создают единую систему защиты и легко управляемую систему безопасности. Они позволяют накапливать опыт возникавших угроз и попыток проникновения. На этой основе с привлечением интеллектуальных систем, таких как искусственные нейронные сети, создают уникальные системы защиты для каждого объекта транспортной инфраструктуры. Централизованная система защиты создает внутреннюю систему безопасности киберпространства как самоорганизующуюся систему. Это очень важно на фоне постоянно растущих и меняющихся внешних угроз.

Угрозы кибербезопасности для железных дорог

Существует несколько угроз, связанных с кибербезопасностью железных дорог. Преобладающей операционной проблемой для железнодорожного сектора являются угрозы для систем идентификации, конфиденциальности и данных. Следует выделить наиболее важные [2].

Мотивированные риски и угрозы

Этот класс угроз направлен не на уничтожение, порчу или кражу информации, а на нанесение ущерба репутации: организации, корпорации, фирме-посреднику, правительству. Основная причина мотивированной атаки на систему – это конкурентная борьба, которая состоит в потере клиентуры и последующего ущерба.

Достаточно часто в этих угрозах применяют «агентный» подход, использующий индивидуальные и групповые алгоритмы. Агент как вирус может адаптироваться к среде и обладает полиформностью, то есть способностью изменения формы при его обнаружении. Этот тип угроз также называют «политическим».

Прагматические угрозы

Они состоят в использовании посредников и третьих лиц, способных иметь финансовую информацию, или информацию о финансовой информации, или информацию о лицах, имеющих доступ к финансовой информации.

Коммуникационные угрозы

Они связаны со слабостью коммуникаций и наличием в них слабых мест. Они включают не только кражу информации, но и порчу информации и даже ее подмену с целью нанести вред технологиям и перевозкам.

Изъятие данных

Эта угроза включает использование атрибутов ИТ технологий для последующего незаконного использования уже важной информации. Эти данные могут быть предметом торга или шантажа.

Угрозы БД

База данных является информационной системой хранения данных и информационной системой обработки данных. Изначально базы данных создавались для широких слоев потребителей, и их концепцией была и остается простота использования. Существуют стандартные или типовые форматы баз данных, что существенно упрощает доступ к таким системам. Методом защиты может быть хранение данных в БД не в «чистом» виде, а в виде фрагментов конструкций или в закодированном виде.

Зеркалирование и резервирование

Эти технологии близки, но имеют различие. При зеркалировании практически осуществляется клонирование информации и информационных образов или кластеров. При резервировании (которое тоже основана на копировании) допускается исключение малосущественной информации с целью экономии физической памяти. Слабым местом обеих технологий является то, что «зеркала» и резервные копии не хранят с такой же тщательностью, как оригинал. Система безопасности для копий обычно много слабее, чем для оригинальной информации. Поэтому рекомендуется вести политику безопасности для копий, такую же, как и для оригиналов.

Серверные угрозы

Принято делить серверы на основные и серверы приложений. Принято защищать основные серверы с большей тщательностью, чем серверы приложений. Опасность состоит в том, что через

слабозащищенный сервер приложений появляется возможность доступа к основному серверу с ценной информацией.

Администраторские угрозы

Этот специфический вид угроз является антропогенным и строится на психологических особенностях любого человека, к числу которых относится системный администратор. В силу этого тип угроз имеет такое название. Угроза реализуется путем коммуникации злоумышленника с системным администратором в условиях информационной неопределенности. Злоумышленник выдает себя за другое лицо и в конце концов получает фрагмент или полностью необходимую информацию для входа в защищаемую систему. Такой механизм входа допустим по отношению к любому сотруднику системы безопасности. Но администраторы представляют наибольшую информационную ценность.

Близким к данной угрозе является «аварийный» вход. В случае сбоя или отключения питания информационной системы система безопасности отключается на секунды. Злоумышленникам этого достаточно для проникновения в систему и последующего входа после ликвидации сбоя.

Нарушение системности

Системность данных и алгоритмов обработки включает полноту, целостность, структурность, комплементарность. В первую очередь уделяют внимание конфиденциальности. Во вторую очередь проводят анализ целостности. Что касается модификации данных, то это третья по очередности задача. Одним из инструментов безопасности в этой части является журнализация. Но она фиксирует события, оставляя без внимания содержание событий. Можно отметить, что многие алгоритмы являются аналогом системы. Многие алгоритмы формируют по образцу прототипов алгоритмов. Знание прототипа алгоритма дает знание о модифицированном алгоритме и дает знание, позволяющее модифицировать текущий алгоритм.

Это же относится и к данным. Их форматы и структура строятся на основе прототипов. Знание структуры прототипа дает знание о текущей структуре данных, а модификация алгоритма и модификация формата данных влекут деструктивные последствия.

В отношении систем безопасности и защищаемых ими систем существует большое количество типов атак, которые делят на распределенные,

когнитивные и целевые (векторные). Соразмерно этому стоят системы отражения атак.

Выделяют группы стохастических угроз. Они чаще всего связаны с воздействием внешней среды и стохастичностью среды функционирования системы управления или управляемой транспортной системы.

Внутренние угрозы аналогичны злонамеренным действиям, но исходят от сотрудников организации.

Кибербезопасность транспортных киберфизических систем

Из числа кибер-физических систем выделяют транспортные кибер-физические системы (TCPS/ТКФС) [18]. Эти системы приходят на смену интеллектуальным транспортным системам (ИТС) и служат основой управления цифровым транспортом. Рост применения ТКФС для соединения различных компонентов железнодорожной отрасли, расширение возможностей подключения с помощью коммуникационных технологий также привело к рискам киберугроз ТКФС. Реализации ТКФС требуют упреждающей идентификации рисков, четкого определения и обеспечения их безопасности. Для повышения эксплуатационной безопасности и эффективности все большее число физических компонентов железных дорог соединяется с помощью различных ТКФС посредством коммуникаций, создавая новую парадигму «железнодорожного Интернета вещей». Тенденция к интеграции ТКФС также привела к постоянно растущей зависимости железнодорожной отрасли от кибертехнологий и технологий IoT, что повышает опасности киберугроз. Железнодорожная отрасль подвержена киберрискам, присущим развертываниям ТКФС. К сожалению, компоненты ТКФС обеспечивают не только желаемое подключение, но и возможности для злоумышленников при достижении злонамеренных целей. В таблице 1 [19] дана систематика угроз для ТКФС.

Общие кибертехнологии [19] часто используются в разных отраслях, поэтому их основные схемы безопасности хорошо изучены в ходе технических модернизаций и исследований в области ИТ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Киберпространство трактуют в узком и широком смысле. В узком смысле – это информационное пространство цифровых двойников и киберфизических систем, информационное пространство беспилотного транспорта, а также технологии интернета вещей. В широком



Систематика угроз ТКФС

Субъекты железнодорожной киберфизической системы	Возможные угрозы
Системы управления поездом нового поколения (например, зарубежные ERTMS, ETCS, PTC, CBTC)	Множественные атаки, включая электромагнитные помехи, глушение, отказ в обслуживании (DoS), модификацию сообщений и несанкционированный доступ и т. д.
	Атаки полным перебором, несанкционированный доступ к сети и модификация сообщений
	Пассивное подслушивание, активный отказ от контроля и принятие контроля
Традиционные системы железнодорожной сигнализации	Несанкционированный доступ к сети, отказ в обслуживании и модификация сообщений
	Электромагнитная интерференция
Балисная передача данных	Нарушение доступности или целостности данных балис [евробалис], глушение, электромагнитные помехи
Службы тяги железных дорог, системы электроснабжения	Атаки с внедрением ложных данных, модификация сообщений и несанкционированный доступ к сети
Человеко-машинный интерфейс	Множественные атаки, включая отказ в обслуживании, модификацию сообщений, несанкционированный доступ и т. д.
Системы громкой связи или системы отображения информации для пользователей	Несанкционированные вторжения
Железнодорожная путевая инфраструктура	Как физическое, так и кибервторжение

смысле киберпространство включает открытые сети и все средства коммуникации, связанные с управлением транспортными, информационными и интеллектуальными системами. Для всех видов этих пространств существуют киберугрозы или угрозы в киберпространстве.

Рост киберугроз имеет несколько причин. Первая причина состоит в росте открытых сетей и систем.

Вторая причина заключается в глобализации, которая повышает доступ общества к технологиям и системам.

Третья причина состоит в конвергенции или универсализации. Выпускают универсальные пульты, которые управляют телевизором и транспортным средством. Выпускают смартфоны, которые могут не только осуществлять телефонную связь, но и управлять телевизором и создавать помехи или управлять транспортным средством.

Четвертая причина в росте объемов информации, который вызывает у человека противоположную реакцию в стремлении упростить информацию. Растущий объем информации не сопровождается ростом применения и усложнением паролей как средств защиты. Все легче взламывать пароли, используя стереотипы.

Пятая причина состоит в росте сложности технических и информационных систем. Этот рост также создает тенденцию к упрощению работы с такими системами. Упрощение работы влечет снижение информационной безопасности.

Шестая причина состоит в росте информационной асимметрии между требованиями технических и информационных систем и реальной способностью человека управлять этими системами. Имеет место опережение роста сложности систем по отношению к росту способностей и возможностей человека-управленца.

Седьмая причина состоит в росте цифрового неравенства². Это неравенство в уровне ИТ-подготовки между странами и между людьми. Некоторые продвинутые в ИТ-технологиях специалисты противопоставляют себя обществу и совершают деструктивные действия для демонстрации превосходства. Цифровое неравенство растёт в системе «руководитель – исполнитель». Как правило, руководитель понимает в ИТ технологиях меньше, чем рядовой сотрудник, и тем более меньше, чем эксперт. Это непонимание выражается в торможении инновационных ИТ разработок. Такой руководитель отдаёт предпочтение простым, но более понятным для него системам безопасности, не обращая внимание на их слабую защищённость. Такой руководитель отвергает сложные и непонятные для него, но хорошо защищённые системы безопасности.

² См., напр.: DiMaggio, P., Hargittai, E. From the ‘Digital Divide’ to ‘Digital Inequality’: Studying Internet Use as Penetration Increases. Princeton University, Woodrow Wilson School of Public and International Affairs, Center for Arts and Cultural Policy Studies, Working Papers. 2001.

Восьмая причина состоит в появлении киберпространства как инструмента управления открытой системой.

Девятая причина роста киберугроз обусловлена использованием больших сетей, значительная часть из которых является открытой.

Наблюдается растущая тенденция к дифференциации исследования кибербезопасности, вместо написания общей теории. Актуальным остаётся необходимость разработки интегрированной основы для решения многих проблем кибербезопасности. Анализ [2] показывает, что большинство исследований кибербезопасности, проводимых на железных дорогах, пока носят концептуальный характер и отстают в применении безопасности на основе искусственного интеллекта (ИИ). Как и в других отраслях, очень важно, чтобы железные дороги также следовали новейшим технологиям безопасности.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Thaduri, A., Aljumaili, M., Kour, R., Karim, R. Cybersecurity for eMaintenance in railway infrastructure: risks and consequences. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, 2019, Vol. 10, Iss. 6, pp. 149–159. DOI: 10.1007/s13198-019-00778-w.
2. Kour, R., Thaduri, A., Karim, R. A review on cybersecurity in railways. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 2023, Vol. 237, Iss. 1, pp. 3–20. DOI: 10.1177/09544097221089389.
3. Wang, Z., Liu, X. Cyber security of railway cyber-physical system (CPS) – A risk management methodology. *Communications in Transportation Research*, 2022, Vol. 2, Iss. 4, 100078. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.commtr.2022.100078>.
4. Лёвин Б. А., Цветков В. Я. Цифровая железная дорога: принципы и технологии // *Мир транспорта*. – 2018. – Т. 16. – № 3 (76). – С. 50–61. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2018-16-3-5>.
5. Лёвин Б. А., Цветков В. Я. Информационные процессы в пространстве «больших данных» // *Мир транспорта*. – 2017. – Т. 15. – № 6 (73). – С. 20–30. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2017-15-6-2>.
6. Hashem, I. A. T., Yaqoob, I., Anuar, N. B., Mokhtar, S., Gani, A., Khan, S. U. The rise of «big data» on cloud computing: review and open research issues. *Information Systems Journal*, 2015, Vol. 47, pp. 98–115. DOI: 10.1016/j.is.2014.07.006.
7. Bloomfield, R., Bendele, M., Bishop, P., Stroud, R., Tonks, S. The Risk Assessment of ERTMS-based Railway Systems from a Cyber Security Perspective: Methodology and Lessons Learned. In: *International Conference on Reliability, Safety and Security of Railway Systems*. Springer, 2016, pp 3–19. DOI: 10.1007/978-3-319-33951-1_1.
8. Masson, É., Gransart, C. Cyber Security for Railways – A Huge Challenge – Shift2Rail Perspective. In: *International workshop on communication technologies for vehicles*. Springer, Cham, 2017, Vol. 10222, pp. 97–104. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-56880-5_10 [ограниченный доступ].
9. Álvarez, A., Ioannidis, S., Schlehuber, C., Rodríguez, F., Vallero, V. CIPSEC Project [Online], 2017. [Электронный ресурс]: DOI: <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/106378>. Доступ 14.11.2023.
10. Cao, N., Wang, C., Li, M., Ren, K., Lou, W. Privacy-Preserving Multi-Keyword Ranked Search over Encrypted Cloud Data. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2014, Vol. 25, Iss. 1, pp. 222–233. DOI: 10.1109/TPDS.2013.45.
11. Shi, H. Railway Information Sharing Platform Security Requirements Analysis. In: *ICLEM 2014: System Planning, Supply Chain Management, and Safety*, 2014, pp 1116–1121. DOI: <https://doi.org/10.1061/9780784413753.169>.
12. Edwards, W. K. Policies and Roles in Collaborative Applications. In: *Proceedings of the 1996 ACM conference on Computer supported cooperative work 1996*. ACM, pp 11–20. [Электронный ресурс]: DOI: <https://faculty.cc.gatech.edu/~keith/pubs/policy.pdf>. Доступ 14.11.2023.
13. Thomas, R. K., Sandhu, R. S. Task-based authorization controls (TBAC): a family of models for active and enterprise-oriented authorization management. *Database security XI*. Springer, Berlin, 1998, pp 166–181. DOI: 10.1007/978-0-387-35285-5_10.
14. Bullock, A. SPACE: Spatial Access Control for collaborative virtual Environments. Doctoral dissertation, University of Nottingham, 1999, 183 p. [Электронный ресурс]: <http://www.adrianbullock.com/documents/thesis.pdf>. Доступ 14.11.2023.
15. Covington, M. J., Long, W., Srinivasan, S., Dev, A. K., Ahamad, M., Abowd, G. D. Securing Context-Aware Applications Using Environment Roles. In: *Proceedings of the sixth ACM symposium on access control models and technologies 2001*, ACM, pp 10–20. DOI: <https://doi.org/10.1145/373256.373258> [ограниченный доступ].
16. Tolone, W., Ahn, G., Pai, T., Hong, S. Access Control in Collaborative Systems. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 2005, Vol. 37, Iss. 1, pp. 29–41. DOI: 10.1145/1057977.1057979.
17. ENISA (2015) Cyber Security and Resilience of Intelligent Public Transport. Good practices and recommendations, European Union Agency for Network and Information Security. [Электронный ресурс]: <https://www.enisa.europa.eu/publications/good-practices-recommendations>. Доступ 14.11.2023.
18. Цветков В. Я. Управление с применением киберфизических систем // *Перспективы науки и образования*. – 2017. – № 3 (27). – С. 55–60. [Электронный ресурс]: https://pnojurnal.files.wordpress.com/2017/04/pdf_170310.pdf. Доступ 14.11.2023.
19. Knowles, W., Prince, D., Hutchison, D. [et al]. A survey of cyber security management in industrial control systems. *International journal of critical infrastructure protection*, 2015, Vol. 9, pp. 52–80. DOI: 10.1016/j.ijcip.2015.02.002 [ограниченный доступ].

Информация об авторах:

Нестеров Евгений Александрович – кандидат юридических наук, доцент, директор Юридического института Российского университета транспорта, Москва, Россия, jnesterov@yandex.ru.

Цветков Виктор Яковлевич – доктор технических наук, профессор, заместитель директора Юридического института Российского университета транспорта, Москва, Россия, svj2@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 22.09.2023, одобрена после рецензирования 19.12.2023, принята к публикации 23.12.2023.





НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 621.431.7

DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-6-13>

Мир транспорта. 2023. Т. 21. № 6 (109). С. 110–118

Диагностика судовых двигателей на основе вейвлет-нейронной сети и сканирования изображений с помощью программируемой логической схемы



Алексей ЕПИХИН



Сергей КОНДРАТЬЕВ



Евгений ХЕКЕРТ

Алексей Иванович Епихин ¹, Сергей Иванович Кондратьев ², Евгений Владимирович Хекерт ³

^{1, 2, 3} Государственный морской университет им. адмирала Ф. Ф. Ушакова, Новороссийск, Россия.

¹ ORCID 0000-0001-8086-536X, Web of Science Researcher ID: X-2415-2018; Scopus ID: 57321825100; РИНЦ Author ID: 830732.

² ORCID 0000-0001-6145-8718; Web of Science Researcher ID: AAL-1619-2021; Scopus ID: 57321941300; РИНЦ Author ID: 751295.

³ ORCID 0000-0003-0953-3949; Web of Science Researcher ID: AAL-1290-2021, Scopus ID: 57320865700; РИНЦ Author ID: 765031.

✉ ¹ bsmbeton@mail.ru.

АННОТАЦИЯ

Статья посвящена системе диагностики судовых двигателей на основе вейвлет-нейронной сети и сканирования изображений с помощью программируемой логической схемы. Рассматривается метод анализа мультифрактальных вейвлет-моделей.

Для целей неразрушающего контроля, который позволяет точно диагностировать неисправности и принимать эффективные меры по предиктивному обслуживанию, что в свою очередь дает возможность эффективно повысить безопасность и надежность оборудования, снизить затраты на обслуживание, значительный потенциал имеет сочетание вейвлет-нейронных сетей с программируемой на базе ПЛИС (программируемая логическая интегральная схема) платформой обработки изображений в реальном времени.

В статье предложен усовершенствованный подход к диагностике судовых двигателей, который основан на вейвлет-нейронной сети и сканировании изображений с помощью программируемой логической схемы. Вейвлет-пакетное разложение представляет собой метод локального анализа времени и частоты. Он постепенно уточняет сигнал в нескольких масштабах посредством операций масштабирования и перевода, также он может автоматически адаптироваться к требованиям частотно-временного анализа сигнала, чтобы сосредоточиться на его любых деталях. Его преимуществом является хорошая диагностическая точность для информации с различными уровнями шума, а также высокая надежность, поскольку используются данные изображения от нескольких сигналов двигателя.

Ключевые слова: водный транспорт, суда, двигатель, вейвлет-преобразование, изображение, сеть, предиктивное обслуживание.

Для цитирования: Епихин А. И., Кондратьев С. И., Хекерт Е. В. Диагностика судовых двигателей на основе вейвлет-нейронной сети и сканирования изображений с помощью программируемой логической схемы // Мир транспорта. 2023. Т. 21. № 6 (109). С. 110–118. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-6-13>.

Полный текст статьи на английском языке публикуется во второй части данного выпуска.
The full text of the article in English is published in the second part of the issue.

ВВЕДЕНИЕ

В последние несколько лет все большее распространение получает метод анализа мультифрактальных вейвлет-моделей. Связано это с тем, что его основной функцией является функция активации, формирования нейрона, объединения взаимных преимуществ, установления автоматического расширения и трансляции. Благодаря этим свойствам мультифрактальные вейвлет-модели эффективно применяются для анализа нестационарных случайных шумов, что позволяет рассматривать их в качестве полезного инструмента для обработки сигналов в области диагностики неисправностей различных технических механизмов и оборудования, таких, например, как судового двигателя.

Возможности предиктивного обслуживания с использованием вейвлет-нейронных сетей широко изучаются на различных типах датчиков, таких как датчики вибрации, температуры, тока, напряжения и устройства формирования изображений. В рамках проводимых экспериментов особое внимание исследователей в области прогностики, мониторинга состояния и управления состоянием сложных технических систем привлекает анализ изображений благодаря разнообразной информации, которую они предоставляют [1; 2].

В контексте вышеизложенного, для целей неразрушающего контроля значительный потенциал имеет сочетание вейвлет-нейронных сетей с программируемой на базе ПЛИС (программируемая логическая интегральная схема) платформой обработки изображений в реальном времени. Эта платформа представляет собой мощный процессор технического зрения для различных высокоскоростных приложений распознавания и классификации изображений в режиме онлайн, требующих больших вычислительных затрат.

Однако, несмотря на широкий спектр работ, в которых анализируются возможности использования изображений для мониторинга/диагностики состояния оборудования и установок, существует ограниченное количество исследований, в которых рассматриваются вопросы прогнозирования на базе потоков многосигнальных изображений.

Обозначенные обстоятельства определяют выбор темы данной статьи.

МЕТОДОЛОГИЯ И ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Над разработкой методов диагностики неисправностей двигателей внутреннего сгорания с использованием дискретного вейвлет-преобразования и нейронной сети в разное время трудились многие авторы. В качестве примеров многочисленных публикаций можно привести работы [3–8].

Ряд работ был посвящен двигателям различных видов транспорта, развитию и обобщению подхода к прогнозированию надежности оборудования на основе графической информации, который заключается в моделировании потоков деградационных изображений как пространственно-временного процесса и использовании его параметров для оценки времени наработки на отказ системы посвятили свои труды [9–14].

В то же время, высоко оценивая имеющиеся на сегодняшний день результаты, следует отметить, что разработка теории интеллектуального диагностирования неисправностей еще не завершена, поэтому возникает ряд трудностей и ограничений в плане ее непосредственного использования при испытаниях. Кроме того, в более углубленном анализе нуждаются методика, позволяющая эффективно сочетать измерения и анализ неисправностей, сбор данных, отображения интерфейса и алгоритмы диагностики для принятия окончательного решения о состоянии технического средства [15–16].

Таким образом, *цель* статьи заключается в рассмотрении возможностей диагностики судовых двигателей на основе вейвлет-нейронной сети и сканирования изображений с помощью программируемой логической схемы.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Рассматриваемая в рамках проводимого исследования система диагностики неисправностей судового двигателя основывается на информации, которая собирается с различных датчиков, вейвлет-нейронной сети и платформе обработки изображений, что в совокупности дает возможность анализировать поток данных, форму сигнала и, наконец, достигать цели диагностики возникших поломок и повреждений [17–18]. На рис. 1 представлена общая схема системы.

Наиболее информативные, с конструктивной точки зрения, параметры:



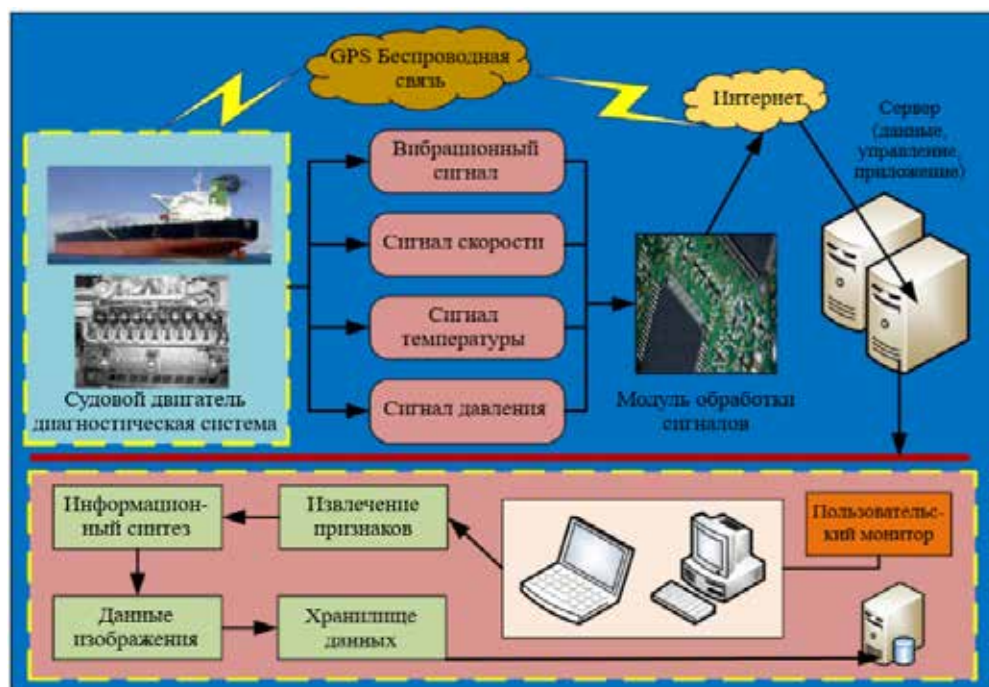


Рис. 1. Общая схема системы диагностики судового двигателя [18].

1. температура охлаждающей воды;
2. давление, температура и расход масла;
3. давление газов в картере и на выходе из цилиндров;
4. нагрузка дизельного двигателя;
5. частота вращения коленчатого вала и ротора турбокомпрессора;
6. топливоподача по цилиндрам дизельного двигателя;
7. давление наддувочного воздуха.

Эти параметры тесно связаны с отказами в таких системах и механизмах двигателя, как газораспределительный механизм, кривошипно-шатунный механизм, топливная система, система смазки, система охлаждения.

Судовые двигатели внутреннего сгорания работают в зонах с различными метеорологическими условиями, при изменяющемся техническом состоянии основных узлов и деталей.

В эксплуатации происходит ухудшение технического состояния элементов топливной системы высокого давления, цилиндропоршневой группы, агрегатов наддува, выпускной системы дизеля и других узлов, деталей и систем. Ухудшение технического состояния приводит к нарушению работоспособности дизеля (отказу), выражающемуся в изменении значений параметров его работы за пределами, регламентируемыми норма-

тивно-техническими документами, или к полной его остановке.

В результате воздействия эксплуатационных факторов уменьшается масса воздуха, участвующего в процессе сгорания; нарушается запрооектированное заводом-изготовителем протекание процессов распыливания топлива, смесеобразования и сгорания; возрастают потери рабочего тела через неплотности деталей цилиндропоршневой группы на линии расширения.

Контрольными параметрами для оценки технического состояния могут служить:

- характеристики процессов топливоподачи, сжатия и сгорания в цилиндре ДВС;
- давление и температура воздуха на входе и выходе из турбоагнетателя;
- виброакустические характеристики;
- содержание продуктов износа в системе смазки или в выпускных газах.

Наиболее оптимальным явился бы смешанный способ контроля, включающий вышеприведенные характеристики.

Как свидетельствует рис. 1, диагностическая система состоит из аппаратной платформы двигателя, схемы формирования сигнала, платы сбора сигнала и терминала ПК. Аппаратная платформа двигателя включает в себя двигатель и датчики (рис. 2). Благодаря плате сбора данных накапливается ин-

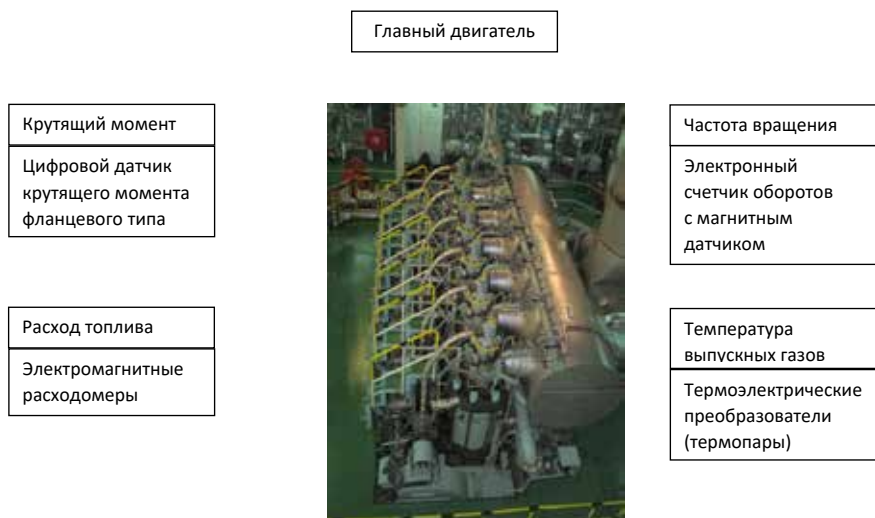


Рис. 2. Параметры контроля технического состояния судового двигателя [выполнено авторами].

формация, поступающая от датчиков. Терминал ПК включает в себя средства хранения и отображения данных LabVIEW, инструменты извлечения признаков MATLAB и объединения информации [19–20].

В контексте мониторинга состояния судового двигателя предлагается использовать несколько типов нейронных сетей для анализа параметров различных систем. Для этого можно разделить анализ на несколько этапов (рис. 3). Первый этап состоит в фильтрации сигналов от помех и шумов, с целью выделения реального сигнала. Это позволяет работать с более чистыми данными и повышает точность анализа.

Второй этап включает непосредственный анализ снимаемых параметров, их сравнение с эталоном, определение текущего состояния и предсказание остаточного ресурса элементов системы. На этом этапе можно применять различные методы анализа данных и алгоритмы машинного обучения для получения более точных результатов.

Важным этапом в разработке системы диагностики параметров с использованием нейронных сетей является фильтрация сигналов, получаемых датчиками и подверженных различным помехам и шумам. Такие искаженные аналоговые сигналы, например, акустические или вибрационные, требуют извлечения полезной информации. Для этого предлагается использовать нейронные сети распознавания образов, такие как сети DAE (Denoising Auto Encoder) [21], сети ARM

и сети RBF. Эти нейронные сети способны обрабатывать сигналы и удалять нежелательные искажения, позволяя получить чистый и полезный сигнал для дальнейшего анализа и диагностики.

Решение, принимаемое системой диагностики, может базироваться на данных во временной области или в других областях, например, в частотной, частотно-временной или масштабно-временной [22–23]. Учитывая задачу комбинирования вейвлет-нейронной сети с программируемой на базе ПЛИС платформой обработки изображений, критически важное значение для получения достоверных данных, имеет форма входного сигнала для нейронной сети. Как показано на рис. 4, в качестве входного сигнала могут использоваться либо один сигнал двигателя, либо несколько сигналов двигателя, полученных из отмеченных выше областей.

Согласно рис. 4 в случае односигнальных моделей входной сигнал может иметь одну из следующих форм:

- односигнальный одноканальный вход, где сигнал двигателя используется как дискретный одномерный вектор или одно полутоновое изображение, как показано на рис. 4 а;
- односигнальный многоканальный вход, где используются цветные изображения из 3 или 4 цветовых каналов, как показано на рис. 4 б.

Для случая многосигнальных моделей входные данные могут быть представлены в одной из следующих форм:



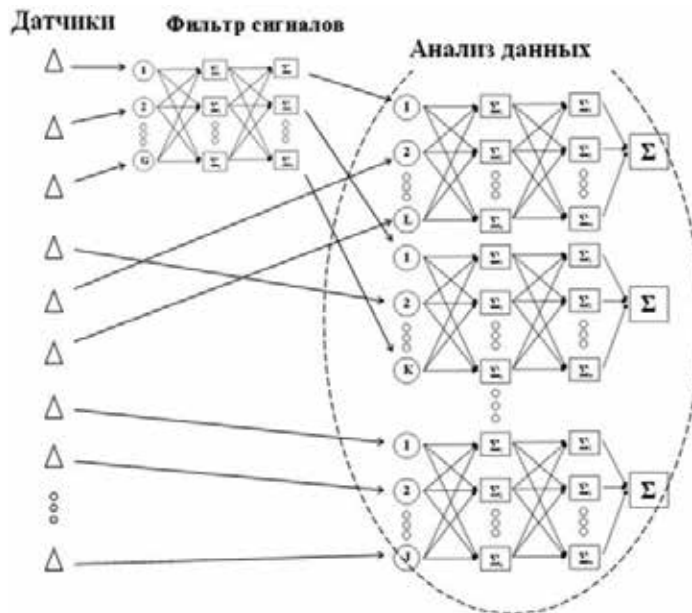


Рис. 3. Этапы подготовки данных для анализа нейронной сетью [выполнено авторами].

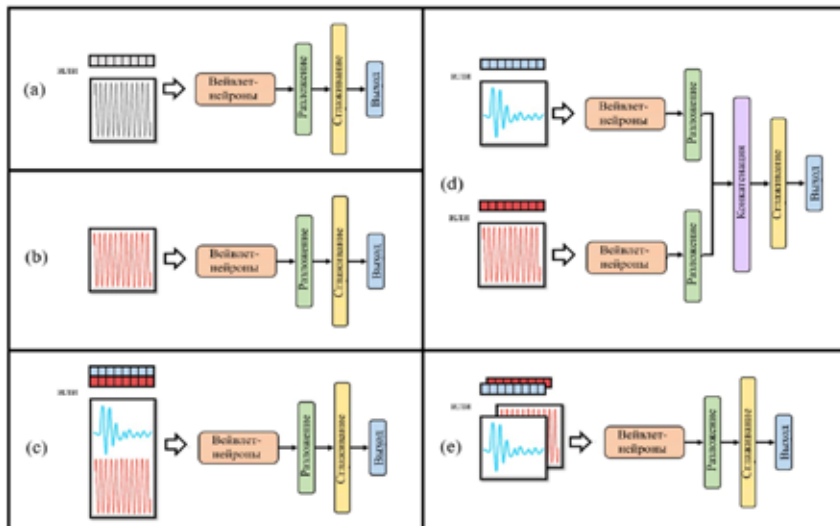


Рис. 4. Различные формы входных данных для вейвлет-нейронной сети [16].

1. многосигнальный одноканальный вход, где все сигналы либо:

- размещаются на одном рисунке (складываются по вертикали), образуя большое одноканальное изображение (см. рис. 4 с);
- сохраняются как отдельные изображения, но используются с мультимодальными сетями с различными путями свертки и последующего сглаживания для каждого сигнала, требующими последующего объединения (см. рис. 4 d).

2. многоканальный вход нескольких сигналов – каждое изображение сигнала отображается в одном канале, а после все изображе-

ния складываются для формирования трехмерной матрицы, как показано на рис. 4 е.

Как известно, основная идея вейвлет-нейронной сети заключается в использовании вейвлет-нейронов вместо традиционных нейронов, а затем в разложении сигнала с помощью многоразрешающего анализа вейвлетов [24]. Далее можно использовать нейронную сеть для аппроксимации любой функции, при этом представляется возможным использовать вейвлет-преобразование и нейронную сеть, связанные между собой. Вейвлет-нейронная сеть сочетает в себе хорошую способность вейвлет-преобразования

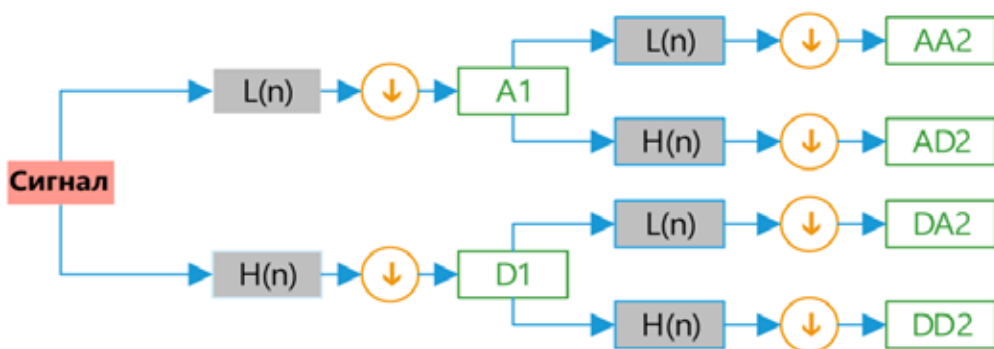


Рис. 5. Общая схема двухслойного вейвлет-разложения пакетов [26].

к временно-частотной локализации и способность нейронной сети к самообучению и аппроксимации функций. Благодаря использованию вейвлетных масштабных коэффициентов и коэффициентов перевода при вейвлетных преобразованиях, ряд после всех модификаций становится более гибким и может обладать эффективными возможностями аппроксимации функций и распознавания образов.

Для формулы генерации вейвлета $\psi(t)$, если функция $x(t)$ удовлетворяет квадратичной интегрируемости, то непрерывное вейвлет-преобразование (WT) определяется как:

$$C_{\psi}(f_s, f_t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi(t | f_s, f_t) dt, \quad (1)$$

в свою очередь:

$$\psi(t | f_s, f_t) = \frac{1}{\sqrt{f_s}} \psi\left(\frac{t - f_s}{f_t}\right), \quad (2)$$

где $\psi(t | f_s, f_t)$ – вейвлет-функция; f_s, f_t – коэффициент масштабирования и коэффициент трансляции соответственно.

Последовательность входных сигналов $x(n)$ длины N дискретизируется для получения дискретного вейвлет-преобразования:

$$A(n | j, k) = DS \left[\sum_n x(n) l_j^*(n - 2^j k) \right], \quad (3)$$

$$D(n | j, k) = DS \left[\sum_n x(n) h_j^*(n - 2^j k) \right], \quad (4)$$

где A – низкочастотный коэффициент; D – высокочастотный коэффициент; $l(n)$ и $h(n)$ – фильтр низких и высоких частот соответственно; $l^*(n)$ и $h^*(n)$ – сопряженные функции $l(n)$ и $h(n)$ соответственно; j и k – коэффициент масштабирования и коэффициент трансляции соответственно; DS – дискретизация вниз.

После разложения входного сигнала на высокочастотный и низкочастотный поддиапазоны с помощью вышеописанного процесса полученный низкочастотный поддиапазон может быть использован в качестве входного сигнала, после чего вейвлет-разложение выполняется для получения следующего уровня высокочастотного и низкочастотного поддиапазонов и т. д. С увеличением прогрессии вейвлет-разложения повышается и разрешение в частотной области.

Для случая многосигнальных моделей (рис. 4 *c, d, e*) используется дискретное пакетное вейвлет-преобразование (DWPT). Оно по сути является расширением и оптимизацией дискретного вейвлет-преобразования (DWT). В отличие от DWT на каждом уровне процесса разложения сигналов происходит не только дальнейшее разложение низкочастотного поддиапазона, но и высокочастотного поддиапазона [25]. DWPT рассчитывает оптимальный путь разложения сигнала путем минимизации функции стоимости, которая разлагает сигнал, передаваемый во входном канале. На рис. 5 показано двухслойное разложение вейвлет-пакета.

Итак, в процессе тестирования предложенной системы диагностики судового двигателя, задавая различные значения пикселей изображения и устанавливая семь тестовых времен с помощью таймера, был проведен анализ и проверка скорости захвата изображения системой и скорость потери кадров. На рис. 6 видно, что при пикселях изображения $1024 * 768$ с увеличением разности времени тестирования, начиная с 30 сек. наблюдается потеря пакетов данных изображения. В это время общее количество собранных кадров составляет 7750, с учётом количества поте-



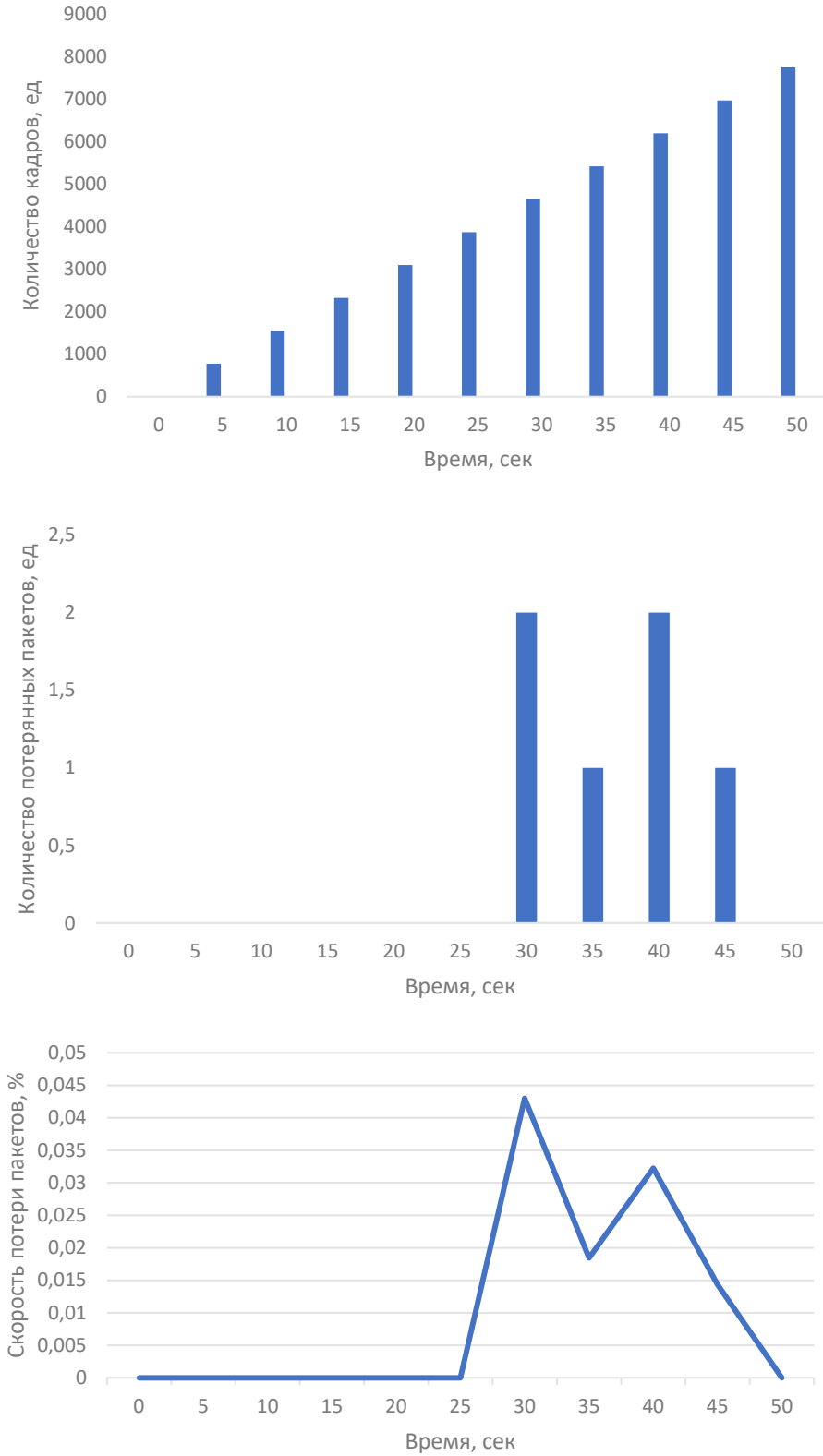


Рис. 6. Тест производительности при разрешении 1024 * 768 пикселей [выполнено авторами].

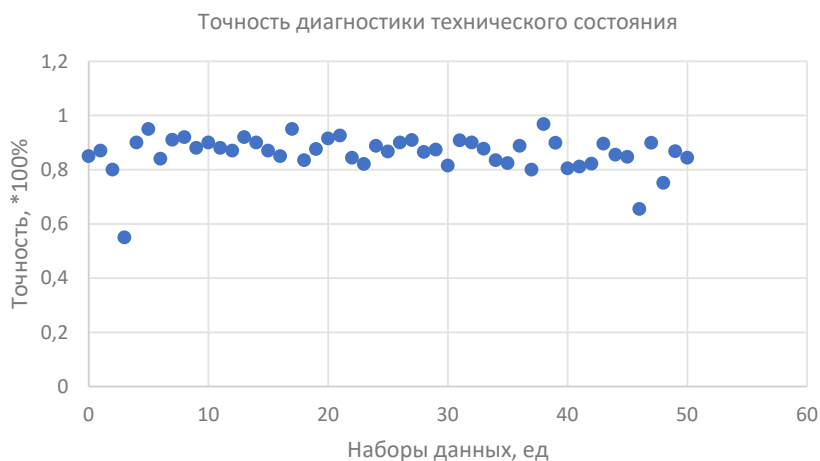


Рис. 7. Результаты диагностики судового двигателя [выполнено авторами].

рянных пакетов на один пакет, скорость потери пакетов составляет 0,043 %. При дальнейшем увеличении времени тестирования общее количество кадров увеличивается, скорость потери кадров начинает снижаться, и максимальная скорость захвата системы достигает 168 кадров в секунду.

Для дальнейшей проверки реального применения системы диагностики в полевых условиях из системы микрокомпьютерного мониторинга на судне было получено 50 наборов кривых мощности двигателя за последние шесть месяцев, включающих все режимы отказов. Результаты диагностики с использованием адаптивной вейвлет-нейросетевой модели и платформы обработки изображений в реальном времени представлены на рис. 7.

Как свидетельствует рис. 7, в 39 наборах кривых мощности была получена правильная классификация неисправностей с помощью системы диагностики, и один набор был оценен неверно.

ВЫВОДЫ

Резюмируя полученные результаты, отметим, что для повышения точности диагностики неисправностей судового двигателя в статье предложен подход, который основан на сочетании технологии вейвлет-нейронных сетей с мультиинформационным синтезом изображений с помощью программируемой логической схемы. Вейвлет-пакетное разложение представляет собой метод локального анализа времени и частоты. Он постепенно уточняет сигнал в нескольких масштабах посредством опе-

раций масштабирования и перевода, также он может автоматически адаптироваться к требованиям частотно-временного анализа сигнала, что позволяет сосредоточиться на его любых деталях.

Результаты диагностики показывают, что эффективность распознавания поломок и отказов судового двигателя может соответствовать реальным эксплуатационным требованиям объекта и найти свое применение на практике.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Tianlong Lu, Zhen Lu, Yuchuan Gao, Lei Shi, Huaiyin Wang, Tianyou Wang. Investigation on suitable swirl ratio and spray angle of a large-bore marine diesel engine using genetic algorithm. *Fuel*, 2023, Vol. 345, 128187. DOI: 10.1016/j.fuel.2023.128187.
2. Епихин, А. И. Подход нечеткой кластеризации в распределенных информационных системах судовых двигателей. *Морские интеллектуальные технологии*. – 2023. – № 2–1 (60). – С. 75–79. DOI: 10.37220/MIT.2023.60.2.008.
3. Marko, K. A., Bryant, B., Soderborg, N. Neural network application to comprehensive engine diagnostics. In: *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, Chicago, IL, 1992, pp. 1016–1022.
4. Глушков С. П., Жидких В. О. Выбор вейвлет-образующей функции для анализа динамических характеристик сигнала двигателя внутреннего сгорания // *Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения*. – 2017. – № 1 (40). – С. 51–56. [Электронный ресурс]: http://www.stu.ru/particular/get_teamwox_file.php?id=28121&ext=.pdf [полный текст номера]. Доступ 20.11.2023.
5. Shatnawi, Y., Al-Khassaweneh, M. Fault Diagnosis in Internal Combustion Engines Using Extension Neural Network. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2014, Vol. 61, Iss. 3, pp. 1434–1443. DOI: 10.1109/TIE.2013.2261033 [ограниченный доступ].
6. Ravikumar, K. N., Madhusudana, C. K., Kumar, H., Gangadharan, K. V. Classification of gear faults in internal combustion (IC) engine gearbox using discrete wavelet



transform features and K star algorithm. Engineering Science and Technology, 2022, Vol. 30, 101048. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jestech.2021.08.005>.

7. Ghaedi, A., Pour, E. S., Hosseinzadeh, F. Application of the discrete wavelet transform and probabilistic neural networks in IC engine fault diagnostics. Indian Journal of Fundamental and Applied Life Sciences, 2015, Vol. 5 (S1), pp. 1587–1592. [Электронный ресурс]: www.cibtech.org/sp.ed/jls/2015/01/jls.htm (online). Доступ 27.11.2023.

8. Czech, P., Wojnar, G., Burdzik, R., Konieczny, L., Warczek, J. Application of the discrete wavelet transform and probabilistic neural networks in IC engine fault diagnostics. Journal of Vibroengineering, 2014, Vol. 16, Iss. 4, 1268, pp. 1619–1639. [Электронный ресурс]: <https://www.extrica.com/article/15251>. Доступ 27.11.2023.

9. Кириллов А. В., Деста А. Б., Дубесса М. Х., Акалу Й. А. Применение нейронных сетей для диагностики и предупреждения отказов датчиков турбореактивного двухконтурного двигателя. Перспективы науки. – 2021. – № 11 (146). – С. 35–37. EDN: ZBQMDY

10. Енчев С. В., Товкач С. С. Вейвлет-анализ параметров систем автоматического управления авиационных двигателей. Научный вестник МГТУ ГА. – 2014. – № 204. – С. 90–96. [Электронный ресурс]: <https://avia.mstuca.ru/jour/article/view/593>. Доступ 27.11.2023.

11. Monday, H. N., Li, J., Nneji, G. U. [et al]. A wavelet convolutional capsule network with modified super resolution generative adversarial network for fault diagnosis and classification. Complex and Intelligent Systems, 2022, pp. 4831–4847. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40747-022-00733-6>.

12. Wenliao Du, Jianfeng Tao, Yanming Li, Chengliang Liu. Wavelet leaders multifractal features based fault diagnosis of rotating mechanism. Mechanical Systems and Signal Processing, 2014, Vol. 43, Iss. 1–2, pp. 57–75. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2013.09.003>.

13. Dong, D. W., Hopfield, J. J., Unnikrishnan, K. P. Neural Networks for Engine Fault Diagnostics. In: Proceedings of the 1997 IEEE Workshop, 1997, pp. 636–644.

14. Kobayashi, T., Simon, D. L. A Hybrid Neural Network-Genetic Algorithm Technique for Aircraft Engine Performance Diagnostics. In: Proceedings of the 37th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, Salt Lake City, Utah, 2001, paper no. AIAA-2001–3763.

15. Sadollah, A., Travieso-Gonzalez, C. M. [Eds]. Recent Trends in Artificial Neural Networks: from Training to Prediction. London, IntechOpen, 2020, 150 p. ISBN 978-1-78985-420-6.

16. Luo, Qiwu; Yigang, He; Sun, Yichuang. Time-efficient fault detection and diagnosis system for analog circuits. Automatika, 2018, Vol. 59, pp. 303–311. DOI: 10.1080/00051144.2018.1541644.

17. Ma, Y., Han, R., Wang, W. Prediction-Based Portfolio Optimization Models Using Deep Neural Networks. IEEE access, 2020, Vol. 8, pp. 115393–115405. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3003819.

18. Song, J., Xue, G., Pan, X., Ma, Y., Li, H. Hourly Heat Load Prediction Model Based on Temporal Convolutional Neural Network. IEEE access, 2020, Vol. 8, pp. 16726–16741. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2968536.

19. Yüce, A., Nur Deniz, F., Tan, N. Interactive Analysis of Integer Order Approximation Methods in LabVIEW

Environment. 1st International Mediterranean Science and Engineering Congress (IMSEC 2016), Çukurova University, Congress Center, October 26–28, 2016, Adana / TURKEY, paper ID 686, pp. 2357–2365. [Электронный ресурс]: https://www.researchgate.net/profile/Furkan-Deniz/publication/348326399-Kesir_dereceli_transfer_fonksiyonlari_icin_tamsayi_yaklasim_yontemlerinin_LabVIEW_ortaminda_interaktif_analizi_Interactive_Analysis_of_Integer_Order_Approximation_Methods_in_LabVIEW_Environme/links/5ff82609a6fdccdb83b7523/Kesir-dereceli-transfer-fonksiyonlari-icin-tamsayi-dereceli-yaklasim-yoentemlerinin-LabVIEW-ortaminda-interaktif-analizi-Interactive-Analysis-of-Integer-Order-Approximation-Methods-in-LabVIEW-Environm.pdf?_tp=eyJjb250ZXh0Ijp7ImZpcnN0UGFnZSI6InB1YmxpY2F0aW9uIiwicGFnZSI6InB1YmxpY2F0aW9uIn19. Доступ 27.11.2023.

20. Ruiz de Miras, J. Fractal Analysis in MATLAB: A Tutorial for Neuroscientists. In: A. Di Ieva (ed.). The Fractal Geometry of the Brain, Springer Series in Computational Neuroscience, 2016, pp. 523–532. DOI: 10.1007/978-1-4939-3995-4_33.

21. Yue Gao, Dai-Jun Zhang, Cui-Na Jiao, Ying-Lian Gao, Jin-Xing Liu. Spatial Domain Identification Based on Graph Attention Denoising Auto-encoder, 2023. In: Advanced Intelligent Computing Technology and Applications: 19th International Conference, ICIC 2023, Zhengzhou, China, August 10–13, 2023, Proceedings, Part III, pp. 359–367. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-99-4749-2_31.

22. Abdelmaksoud, M., Torki, M., El-Habrouk, M., Elgeneidy, M. Convolutional-neural-network-based multi-signals fault diagnosis of induction motor using single and multi-channels datasets. Alexandria Engineering Journal, 2023, Vol. 73, pp. 231–248. DOI: 10.1016/j.aej.2023.04.053.

23. Jian Zhang, Yangqian Meng, Dai Liu, Long Liu, Xiuzhen Ma, Changzhao Jiang, Xiannan Li, Li Huang. Modelling and multi-objective combustion optimization of marine engine with speed maintaining control target. Thermal science and engineering progress, 2023, Vol. 41, pp. 12–18. DOI: 10.1016/j.tsep.2023.101852.

24. Chao Luo, Haiyue Wang. Fuzzy forecasting for long-term time series based on time-variant fuzzy information granules. Applied soft computing, 2020, Vol. 88, pp. 65–72. DOI: 10.1016/j.asoc.2019.106046 [ограниченный доступ].

25. Zhou, W., Wu, J., Liu, A., Zhang, W. A., Yu, L. Neurodynamics-based distributed model predictive control of a low-speed two-stroke marine main engine power system. ISA Transactions, 2023, Vol. 138, pp. 341–358. DOI: 10.1016/j.isatra.2023.03.006.

26. Zhenyi Kuai, Guoyong Huang. Fault Diagnosis of Diesel Engine Valve Clearance Based on Wavelet Packet Decomposition and Neural Networks. Electronics, 2023, Vol. 12, 353. DOI: 10.3390/electronics12020353.

27. Ofner, A. B., Kefalas, A., Posch, S., Pirker, G., Geiger, B. C. In-cylinder pressure reconstruction from engine block vibrations via a branched convolutional neural network. Mechanical systems and signal processing, 2023, Vol. 183, 109640. DOI: 10.1016/j.ymssp.2022.109640. ●

Информация об авторах:

Епихин Алексей Иванович – кандидат технических наук, доцент, начальник кафедры эксплуатации судовых механических установок Государственного морского университета имени адмирала Ф. Ф. Ушакова, Новороссийск, Россия, bsmbeton@mail.ru.

Кондратьев Сергей Иванович – доктор технических наук, профессор, ректор Государственного морского университета имени адмирала Ф. Ф. Ушакова, Новороссийск, Россия, sikondr@gmail.com.

Хекерт Евгений Владимирович – доктор технических наук, профессор, проректор Государственного морского университета имени адмирала Ф. Ф. Ушакова, Новороссийск, Россия, zur_tga@nsma.ru.

Статья поступила в редакцию 20.11.2023, одобрена после рецензирования 27.12.2023, принята к публикации 29.12.2023.



Мультикритериальное сравнение контрейлерных систем



Никита ОСИНЦЕВ



Александр ЦЫГАНОВ



Александр РАХМАНГУЛОВ



Вера БАГИНОВА

**Никита Анатольевич Осинцев¹, Александр Владимирович Цыганов², Александр Нельевич Рахмангулов³,
Вера Владимировна Багинова⁴**

^{1, 2, 3}Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова, Магнитогорск, Россия.

⁴Российский университет транспорта, Москва, Россия.

¹ORCID 0000-0003-1168-6725; Web of Science Researcher ID: K-6237-2013; Scopus Author ID: 56386223400;
РИНЦ SPIN-код: 9791-1889; РИНЦ Author ID: 401461.

²ORCID 0000-0002-8857-6287; Web of Science Researcher ID: AAH-9785-2019; Scopus Author ID: 57209470019;
РИНЦ SPIN-код: 5281-7511; РИНЦ Author ID: 677084.

³ORCID 0000-0002-6419-2561; Scopus Author ID: 13805427400; РИНЦ Author ID: 101054.

⁴ORCID 0000-0002-6289-1078; РИНЦ SPIN-код: 1255-6600; РИНЦ Author ID: 266200.

✉ ran@magtu.ru.

АННОТАЦИЯ

Представлены результаты анализа и сравнения наиболее распространенных в настоящее время контрейлерных систем, находящихся на стадиях как коммерческого использования, так разработки и тестирования. Сравнение выполнено с целью определения контрейлерной системы, отвечающей требованиям концепции устойчивого развития и обеспечивающей эффективное функционирование цепей поставок.

Авторами впервые предложена методика многокритериальной оценки (MCDM) контрейлерных систем, учитывающая требования основных стейкхолдеров цепи поставок: грузовладельцев, перевозчиков и владельцев инфраструктуры. Анализ сформированной многокритериальной модели оценки контрейлерных систем выполнен с использованием методологического аппарата DEMATEL и MARCOS. Пред-

ставлен расчетный пример ранжирования контрейлерных систем исходя из интересов стейкхолдеров цепей поставок. Выполнена проверка корректности полученных результатов другими MCDM-методами: TOPSIS, EDAS, MABAC и WASPAS. Проведены результаты оценки чувствительности результатов ранжирования контрейлерных систем при различных сценариях. Наивысшие оценки получили контрейлерные системы Flexiwaggon, Megawing и Rolling Road.

Предлагаемая методика рекомендуется для выработки рационально обоснованных управленческих решений, направленных на согласование технических и технологических параметров контрейлерных систем, а также унификацию интермодальных транспортных единиц для формирования устойчивых цепей поставок.

Ключевые слова: транспорт, устойчивое развитие, цепь поставок, мультимодальная перевозка, комбинированная перевозка, интермодальная перевозка, контрейлерная система, MCDM, DEMATEL, MARCOS.

Финансовая поддержка: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-21-00164, <https://rscf.ru/project/23-11-00164/>.

Для цитирования: Осинцев Н. А., Цыганов А. В., Рахмангулов А. Н., Багинова В. В. Мультикритериальное сравнение контрейлерных систем // Мир транспорта. 2023. Т. 21. № 6 (109). С. 119–130. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-6-14>.

**Полный текст статьи на английском языке публикуется во второй части данного выпуска.
The full text of the article in English is published in the second part of the issue.**

ВВЕДЕНИЕ

Создание условий для реализации концепции устойчивого развития и принципов ESG становится все более важной задачей для всех отраслей экономики. Мировым сообществом признается необходимость наличия баланса между экономической эффективностью, интересами социума и защитой окружающей среды. Особо актуальны проблемы устойчивого развития для транспорта, являющегося связующим звеном экономики и одним из основных загрязнителей окружающей среды [1; 2]. Формирование «экологически чистых» транспортных систем в настоящее время идет по пути развития мультимодальных систем доставки грузов, в том числе использующих интермодальные технологии.

Разновидностью интермодальной технологии является контрейлерная технология, основанная на взаимодействии железнодорожного и автомобильного видов транспорта. Конкуренция конструкторских и технологических решений в транспортной отрасли способствовала появлению различных вариантов реализации контрейлерной технологии, имеющих существенные различия в инженерных решениях. В настоящее время эти варианты развиваются как самостоятельные контрейлерные системы.

Разнообразие применяемых технических и технологических решений, отсутствие стандартов, территориальная обособленность конкретных контрейлерных систем в мире, низкая степень их использования в цепях поставок – это те факты, анализ которых позволяет утверждать, что эта интермодальная технология до сих пор находится на этапе формирования [3].

В результате увеличения числа участников и разнообразия технико-технологических параметров контрейлерных систем усложняется конфигурация сетевой структуры цепей поставок. Решая данную задачу, перевозчики, экспедиторы или логисты должны учитывать технические и технологические требования и ограничения разных контрейлерных систем для удовлетворения требований грузовладельцев по своевременной, сохранной и экологичной перевозке грузов.

ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЙ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В работах, исследующих условия внедрения интермодальных технологий в цепях поставок, выделяются следующие основные проблемы: сложность координации и взаимодействия различных участников интермодальных перевозок [4]; отсутствие общих стандартов применительно к параметрам терминалов, интермодальных транспортных единиц (ИТЕ) и информационных систем [5]; многообразие контрейлерных систем и наличие множества параметров и показателей их оценки и выбора [6; 7]; сложность выбора технологий обслуживания ИТЕ на терминалах [8; 9]; отличия в подходах к организации перевозки контрейлеров железнодорожным транспортом, разработки и согласовании расписания [10]; различия в определении рационального расстояния перевозки [11]; отсутствие комплексного подхода к организации взаимодействия железнодорожного и автомобильного видов транспорта [12]; необходимость учета специфики использования ин-

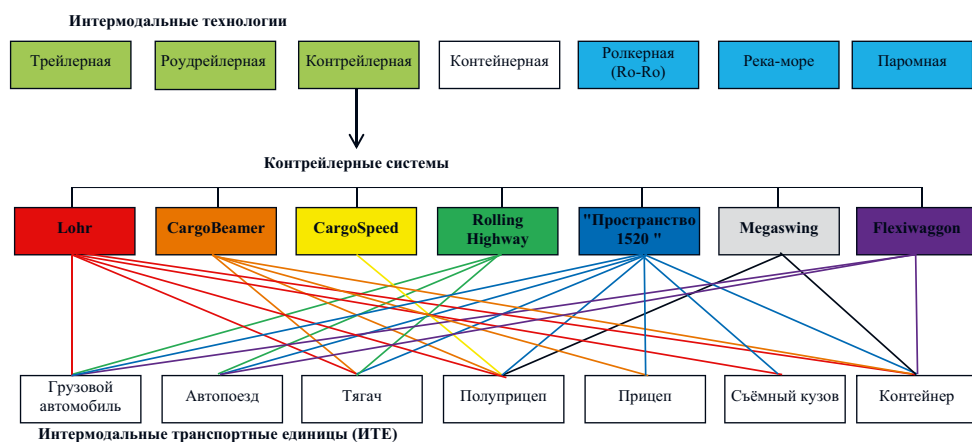


Рис. 1. Совокупность интермодальных технологий, контрейлерных систем и интермодальных транспортных единиц [выполнено авторами; [3]].

Таблица 1

Группировка и краткая характеристика контрейлерных систем
[составлено авторами]

Название системы / происхождение	Группа систем	Конструктивные особенности железнодорожного вагона	Вид вагона и терминала
Lohr Компания Lohr Group (Франция)	1 – Системы, представленные специализированными терминалами, основанными на модульном принципе создания терминальной инфраструктуры, использующие конструктивно сложный специализированный железнодорожный подвижной состав	Вагон с двумя платформами (карманами). Горизонтальная погрузка и выгрузка ИТЕ основана на повороте платформ вагона относительно продольной оси пути. Система допускает вертикальную перегрузку ИТЕ	
CargoBeamer Компания CargoBeamer AG (Германия)		Вагон со съёмным поддоном, выдвигающимся параллельно рельсового пути при горизонтальном методе перегрузки ИТЕ. Вертикальная перегрузка поддона обеспечивается наличием конструктивных захватов в корпусе поддона	
CargoSpeed Международный консорциум в составе BLG Consult GmbH (Германия), University of Newcastle (Великобритания), Newrail (Великобритания), The Warbreck Engineering and Dry Dock Company Ltd (Великобритания)		Вагон имеет съёмный пол (площадку), а также опускающиеся пандусы, обеспечивающие въезд и выезд автопоезда на пол вагона. Горизонтальная погрузка и выгрузка ИТЕ основана на поднятии до уровня земли и повороте площадки вагона относительно продольной оси пути стационарным подъемно-поворотным оборудованием, расположенным по оси рельсового пути	
Rolling Road (Rolling Highway, Rolling Motorway, Rollende Landstrasse) (Швеция)	2 – Системы, располагаемые на железнодорожных станциях с отдельными грузовыми фронтами для операций с контрейлерами. В таких системах используются наименее сложные по конструкции железнодорожные вагоны (контрейлерные платформы)	Вагон представлен платформой с пониженным уровнем пола. Погрузочная высота вагона обеспечивается применением двух тележек с колесными парами малого диаметра. Вагон оборудуется торцевыми переездными площадками, обеспечивающими прохождение автомобилей транспортных средств между сцепленными платформами при выполнении погрузочно-разгрузочных работ	
«Пространство 1520» Находится в стадии разработки при участии компании ОАО «РЖД» (Россия)		Вагон-платформа, с опускающимися переездными площадками для движения автотранспортных средств вдоль состава. Погрузка ИТЕ в вагоны осуществляется путем их въезда со стороны одного из продольных бортов вагона	
Megaswing Компания Kockums Industrier AB (Швеция)	3 – Системы, не требующие создания терминальной инфраструктуры и использующие узкоспециализированные высокотехнологичные железнодорожные вагоны	Вагон с двумя платформами (грузовыми секциями), оснащенный механизмом их самостоятельного перемещения. Горизонтальная погрузка и выгрузка ИТЕ основана на повороте платформ вагона относительно продольной оси пути и их опускании до уровня пола. Направление поворота платформ обеспечивает возможность въезда и выезда автотранспортных средств с обеих сторон пути	
Flexiwaggon Компания Flexiwaggon AB (Швеция)		Вагон, оснащён механизированными пандусами, расположенными с торцовых сторон. Пандусы обеспечивают въезд и выезд автотранспортных средств передним ходом. Вагон имеет автономное электроснабжение аккумуляторными батареями. Зарядка батарей осуществляется валовыми генераторами, вырабатывающими энергию в процессе движения поезда	



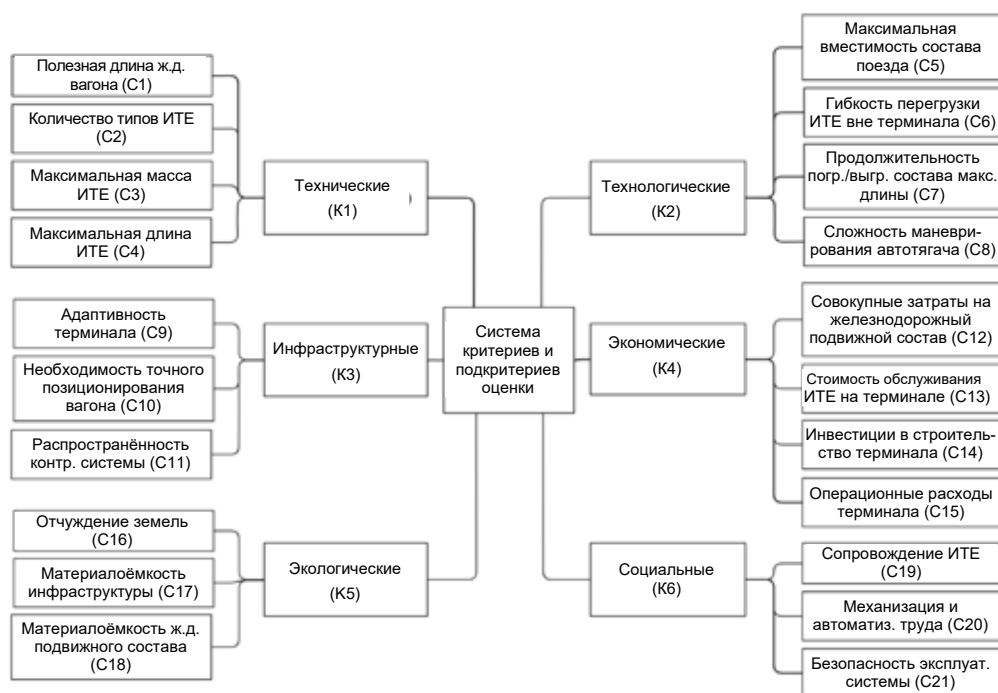


Рис. 2. Критерии и подкритерии устойчивости контроллерной системы [выполнено авторами].

термодальных технологий в континентальном и морском сообщениях [13].

Сложность решения перечисленных проблем ограничивает использование интермодальных технологий в цепях поставок, а также создает потребность в мониторинге и принятии управленческих решений с учетом множества факторов, оказывающих влияние на эффективность их применения. Варианты интермодальных технологий, применяемые на различных видах транспорта, действующие и разрабатываемые контроллерные системы, а также используемые в них интермодальные транспортные единицы представлены на рис. 1 [3].

Для решения перечисленных проблем широко используют различные научные методы, в частности математические модели и методы [14], в том числе многокритериальные методы принятия решений (Multi-Criteria Decision Making – MCDM) [3]. Выбор MCDM-методов обусловлен многообразием характеристик и свойств контроллерных систем, их элементов, а также необходимостью учета множества параметров и показателей их функционирования [15]. Методы данной группы также применяются для количественной оценки компромиссов между экономическими, социальными и экологическими кри-

териями устойчивого развития цепей поставок [16].

Целью настоящего исследования является разработка методики многокритериального выбора контроллерной системы, обеспечивающей формирование и функционирование устойчивых цепей поставок. Методика основана на систематизации параметров всех известных контроллерных систем: Lohr, CargoBeamer, CargoSpeed, Rolling Road, «Пространство 1520», Megaswing и Flexiwagon. Анализ параметров контроллерных систем позволил выделить три группы таких систем (табл. 1), а также сформировать универсальную систему критериев устойчивости контроллерной системы в цепях поставок (рис. 2).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Методика оценки контроллерных систем

На первом этапе разрабатывается многокритериальная модель (MCDM-модель) оценки контроллерных систем. Элементами MCDM-модели являются альтернативы – контроллерные системы, а также атрибуты – критерии и подкритерии оценки контроллерных систем. В данной работе использованы следующие обозначения альтернатив: Lohr (A1), CargoBeamer (A2), CargoSpeed (A3), Rolling

Road (A4), «Пространство 1520» (A5), Megaswing (A6) и Flexiwaggon (A7). В качестве атрибутов в MCDM-модели используется разработанная авторами система критериев и подкритериев устойчивости контрейлерной системы в цепях поставок [17] (см. рис. 2).

На втором этапе реализации методики рассчитывается вес атрибутов MCDM-модели с использованием метода «Лаборатория оценки и испытаний принятия решений» (DEcision MAKing Trial and Evaluation Laboratory), обозначаемый аббревиатурой DEMATEL [18]. Выбор метода DEMATEL [19] обоснован возможностью установления взаимозависимости между критериями и подкритериями контрейлерной системы и разработки карты сетевых отношений, отражающей взаимовлияние критериев и причинно-следственные связи между ними. Итоговым результатом применения метода DEMATEL является определение веса атрибутов контрейлерных систем.

Основными шагами реализации метода DEMATEL являются [3] следующие.

1. Построение начальной матрицы прямых связей атрибутов контрейлерных систем и попарная оценка влияния атрибутов, выполняемая на основе анализа мнений экспертов-стейкхолдеров.

2. Нормализация матрицы прямых связей атрибутов контрейлерных систем.

3. Формирование общей матрицы связей между атрибутами контрейлерных систем.

4. Расчет числа взаимосвязей и сил влияния между атрибутами контрейлерных систем. Выполнение данного шага необходимо для установления причинно-следственных связей в системе критериев и подкритериев контрейлерных систем. Каждый атрибут может быть отнесен либо к группе «Причина» (т. е. влияет на другие атрибуты), либо к группе «Следствие» (т. е. находится под влиянием других атрибутов).

5. Построение причинно-следственной диаграммы (карты сетевых отношений). Она показывает структурную взаимосвязь между рассматриваемыми атрибутами и корреляцию между ними.

6. Расчет веса каждого атрибута контрейлерной системы.

На третьем этапе реализации методики выполняется ранжирование контрейлерных систем методом «Оценка альтернатив и ран-

жирование в соответствии с компромиссным решением» (Measurement of Alternatives and Ranking according to COmpromise Solution, далее MARCOS) [20]. Основу данного метода составляет определение отношения между альтернативами и эталонными значениями («идеальные» и «антиидеальные» альтернативы). Лучшей альтернативой считается та, которая ближе всего к идеалу и одновременно дальше от антиидеальной альтернативы.

Основными шагами метода MARCOS являются [3] следующие.

1. Формирование исходной матрицы оценки альтернатив, состоящей из значений оценки каждой альтернативы по всем атрибутам.

2. Построение расширенной исходной матрицы и определение идеальной и антиидеальной альтернатив.

3. Нормализация исходной матрицы решения.

4. Формирование взвешенной матрицы. Весовые значения атрибутов принимаются на основе результата расчетов методом DEMATEL.

5. Вычисление степени полезности альтернатив и определение функции полезности альтернатив. Значение функции полезности показывает, насколько каждая альтернатива близка к идеальной и далека от антиидеальной альтернативы.

6. Ранжирование альтернатив. Наилучшей альтернативой считается альтернатива с максимальным значением функции полезности.

Общая схема использования комбинированного метода DEMATEL–MARCOS для комплексной характеристики и оценки контрейлерных систем в устойчивых цепях поставок представлена на рис. 3.

Результаты оценки контрейлерных систем

Оценка и ранжирование контрейлерных систем для обеспечения устойчивого развития цепей поставок выполнена с использованием MCDM-модели, представленной семью альтернативами (A1–A7), характеризующимися шестью группами критериев (K1–K6), включающими 21 подкритерий (C1–C21) (рис. 2). Анализ данной модели выполнен следующими группами экспертов: грузовладельцы, провайдеры логистических услуг, владельцы инфраструктуры и академические эксперты [3].





Рис. 3. Этапы методики оценки контроллерных систем комбинированным способом DEMATEL–MARCOS [выполнено авторами].

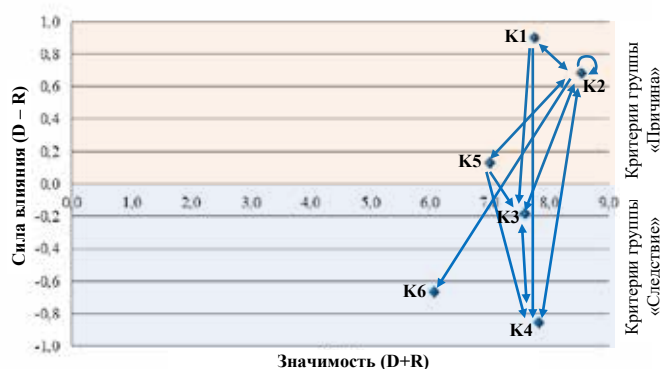


Рис. 4. Карта сетевых отношений критериев контроллерных систем (оценка академическими экспертами).

С использованием метода DEMATEL построены карты сетевых отношений критериев и подкритериев оценки контроллерных систем и рассчитаны их весовые коэффициенты. В качестве примера на рис. 4–7 показана карта сетевых отношений, построенная по результатам оценок академических экспертов. В светлой зоне на карте показаны критерии, составляющие группу «Причина». Наиболее сильное влияние на все критерии оказывают технические критерии (K1). Инфраструктурные критерии (K2) характеризуются наибольшим числом связей, что указывает на их наибольшую значимость в данной системе критериев.

Итоговые весовые коэффициенты критериев и подкритериев оценки контроллерных систем, полученные по результатам оценки различных групп экспертов-стейкхолдеров, представлены в табл. 2 и 3.

Результаты ранжирования критериев свидетельствуют о различиях в оценке их значимости разными группами стейкхолдеров (табл. 2). Наивысшие ранги получили подкритерии инфраструктурных и экологических групп критериев. Среднее значение рангов подкритериев данных групп составило 2,6 и 6,5 соответственно. Вторыми по значимости для экспертов стали критерии технологических, экономических и социальных групп. Усредненное значение рангов подкритериев данных групп составило 12,6. Наименьшую значимость получили подкритерии технической группы (средний ранг 16,2).

Таким образом, эксперты сходятся во мнении, что главным условием включения контроллерной технологии в цепь поставок выступает наличие распространенной сети контроллерных терминалов с возможностью ее адаптации под потребности клиентов.

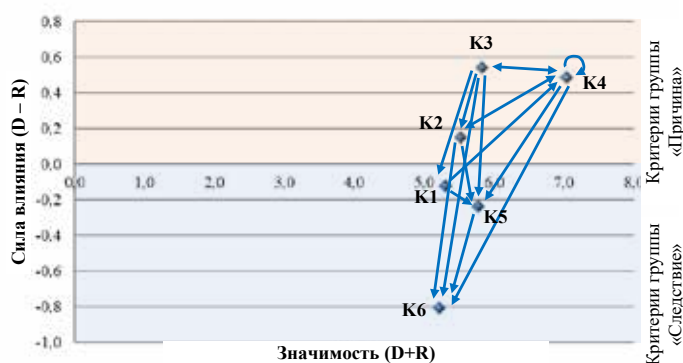


Рис. 5. Карта сетевых отношений критериев контейнерных систем (оценка грузовладельцами).

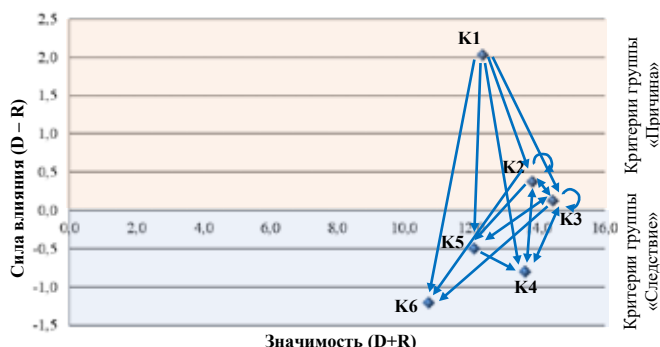


Рис. 6. Карта сетевых отношений критериев контейнерных систем (оценка владельцами инфраструктуры).

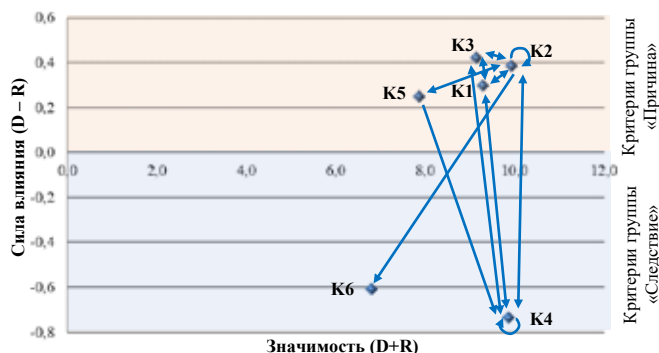


Рис. 7. Карта сетевых отношений критериев контейнерных систем (оценка перевозчиками).

Стейкхолдеры также высоко оценивают позитивное влияние технологии на уменьшение экологического влияния транспорта. Интересным является выставленная низкая оценка влияния критериев, характеризующих контейнерные системы через технические параметры. Это, в определенной степени, противоречит заявленному в начале статьи тезису о наличии проблемы учета требования конкретной системы к параметрам ИТЕ и может быть объяснено использованием поставщиками и провайдерами ограниченного числа типов ИТЕ, а также исключением

схем перевозок, задействующих различные контейнерные системы в разных регионах (странах).

В отношении важности критериев и подкритериев для стейкхолдеров наблюдается следующая тенденция. Грузовладельцев слабо интересуют технико-технологические характеристики контейнерных систем, поскольку они не вовлечены в процесс организации перевозок. При этом для них важными являются величина транспортных затрат на перевозку, а также необходимость сопровождения грузов. Провайдеры логистических



Таблица 2

Значения веса критериев оценки контрейлерных систем методом DEMATEL
[составлено авторами]

Критерии	Академические эксперты	Грузовладельцы	Провайдеры	Владельцы инфраструктуры
Технические (K1)	0,1737	0,1525	0,1754	0,1618
Технологические (K2)	0,1905	0,1587	0,1875	0,1787
Инфраструктурные (K3)	0,1689	0,1684	0,1728	0,1869
Экономические (K4)	0,1752	0,2027	0,1867	0,1764
Экологические (K5)	0,1558	0,1661	0,1487	0,1565
Социальные (K6)	0,1359	0,1517	0,1289	0,1398

Таблица 3

Значения веса подкритериев оценки контрейлерных систем методом DEMATEL
[составлено авторами]

Подкритерии	Академические эксперты	Грузовладельцы	Провайдеры	Владельцы инфраструктуры
Полезная длина вагона (C1)	0,0445	0,0390	0,0470	0,0396
Количество типов ИТЕ (C2)	0,0375	0,0368	0,0352	0,0347
Максимальная масса ИТЕ (C3)	0,0425	0,0384	0,0443	0,0414
Максимальная длина ИТЕ (C4)	0,0491	0,0382	0,0490	0,0460
Максимальная вместимость состава поезда (в полуприцепах) (C5)	0,0477	0,0385	0,0473	0,0472
Гибкость выполнения перегрузки ИТЕ вне терминала (C6)	0,0466	0,0385	0,0438	0,0418
Продолжительность погрузки/выгрузки состава максимальной длины (C7)	0,0502	0,0431	0,0516	0,0487
Сложность маневрирования автотягача (C8)	0,0460	0,0386	0,0448	0,0410
Адаптивность терминала (C9)	0,0619	0,0571	0,0572	0,0635
Необходимость точного позиционирования вагона (C10)	0,0526	0,0526	0,0580	0,0617
Распространенность контрейлерной системы (C11)	0,0544	0,0587	0,0576	0,0617
Совокупные затраты на железнодорожный подвижной состав (C12)	0,0344	0,0465	0,0464	0,0389
Стоимость обслуживания ИТЕ на терминале (C13)	0,0483	0,0538	0,0529	0,0468
Инвестиции в строительство инфраструктуры терминала (C14)	0,0459	0,0477	0,0427	0,0457
Операционные расходы терминала (C15)	0,0466	0,0547	0,0448	0,0449
Отчуждение земель (C16)	0,0521	0,0561	0,0444	0,0546
Материалоемкость инфраструктуры (C17)	0,0543	0,0561	0,0545	0,0578
Материалоемкость железнодорожного подвижного состава (C18)	0,0494	0,0538	0,0498	0,0442
Сопровождение ИТЕ (C19)	0,0398	0,0554	0,0416	0,0395
Механизация и автоматизация труда (C20)	0,0477	0,0466	0,0425	0,0501
Безопасность эксплуатации контрейлерной системы (C21)	0,0485	0,0497	0,0448	0,0502

услуг, выступающие активными организаторами перевозок, наоборот уделяют большее внимание критериям, характеризующим системы с технологической, инфраструктурной и экологической позиций. Это объясня-

ется наличием у них интереса к выбору варианта доставки, обеспечивающему высокое качество перевозки при меньших собственных операционных расходах на перевозку, а также желанием сотрудничать с компания-

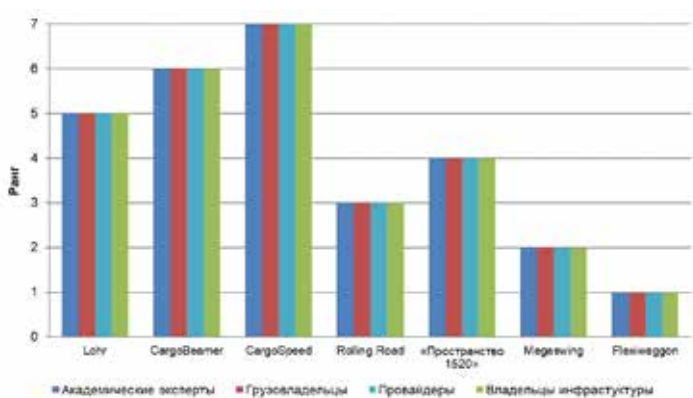


Рис. 8. Ранжирование контейнерных систем методом MARCOS [выполнено авторами].

ми, которые уделяют внимание «зеленым» технологиям. Владельцы транспортной инфраструктуры наибольшее значение уделяют технологическим и инфраструктурным параметрам, поскольку рассматривают контейнерную технологию как бизнес-проект, требующий значительных, но быстро окупаемых инвестиций. Эта группа стейкхолдеров дает низкую оценку значимости совокупных затрат на железнодорожный подвижной состав, предполагая, что эти затраты несут операторы собственных вагонов. Мнение академических экспертов в целом согласуется с мнением провайдеров логистических услуг и владельцев транспортной инфраструктуры.

Ранжирование контейнерных систем выполнено методом MARCOS с использованием полученных значений веса подкритериев и их количественных и качественных значений [3]. Результаты ранжирования представлены на рис. 8.

Несмотря на определенные расхождения мнений экспертов о важности критериев и подкритериев, сравнение контейнерных систем показало согласованность мнений экспертов. Все специалисты на первое место ставят систему Flexiwaggon, на второе – систему Megaswing, а на третье – систему CargoSpeed. Таким образом, по совокупности характеристик, наиболее приоритетными контейнерными системами для обеспечения устойчивого развития цепей поставок являются системы третьей группы (табл. 1), не требующие создания сложной терминальной инфраструктуры, использующие высокотехнологичный железнодорожный подвижной состав, который обеспечивает мобильность погрузки/выгрузки ИТЕ. Системы второй группы: Rolling Road и отечественная «Про-

странство 1520» вызывают менее выраженный интерес к их использованию в цепях поставок. Это доказывается тем, что эти системы получили высокие оценки по подкритериям, которые не являются значимыми («Количество типов ИТЕ» и «Стоимость вагона и затраты на его эксплуатацию»), и, наоборот, низкие оценки по значимым подкритериям («Адаптивность терминала» и «Распространенность контейнерной системы»). Наименьший ранг получили системы первой группы, требующие наибольших капиталовложений в формирование сети интермодальных терминалов и парка специализированного железнодорожного подвижного состава.

Для проверки корректности результатов, полученных методом MARCOS, мультикритериальное сравнение контейнерных систем было выполнено другими MCDM-методами: TOPSIS – Метод расстановки приоритетов по сходству с идеальным решением (Technique for the Order of Preference by Similarity to Ideal Solution) [21], EDAS – Метод оценки отклонения от среднего решения (The Evaluation based on Distance from Average Solution) [22], MABAC – Метод сравнения многокритериальных разграниченных областей (Multi-Attributive Border Approximation Area Comparison) [23] и WASPAS – Метод совокупной взвешенной суммы (Weighted Aggregated Sum Product Assessment) [24]. На рис. 9 приведены результаты сравнения расчетов с использованием различных методов. Первые три ранга сохраняются у систем Flexiwaggon, Megaswing и Rolling Road соответственно. Система «Пространство 1520» преимущественно получает четвертое место. Исключением являются результаты обработки мнений экспертов «Владельцы инфраструктуры»



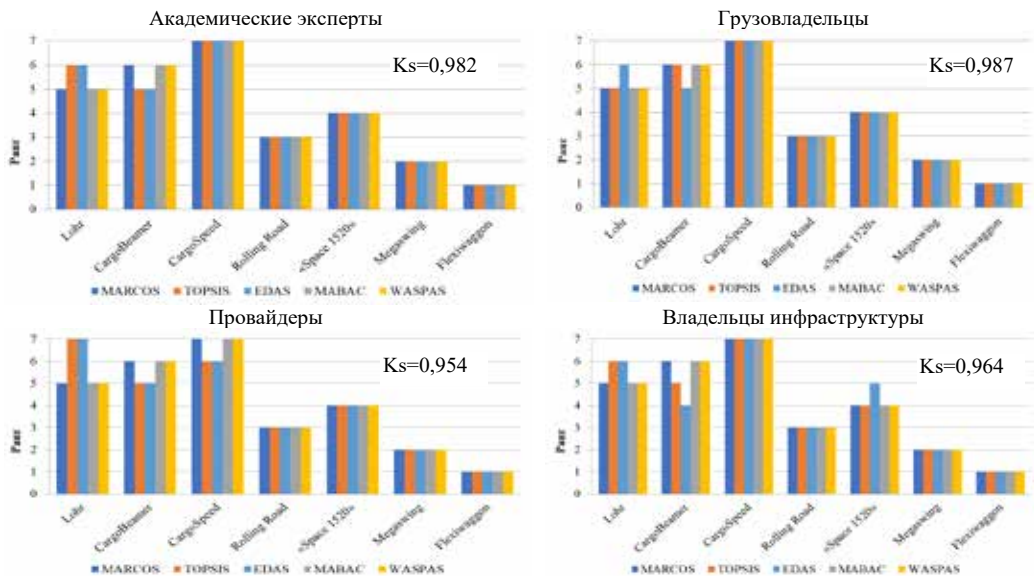


Рис. 9. Ранжирование контроллерных систем методами MCDM [выполнено авторами].

методом EDAS, в соответствии с которыми данная система занимает пятое место.

Применение дополнительных методов MCDM и получение сходимости результатов свидетельствует о высокой корреляции полученных рангов. Использованный для данной оценки коэффициент ранговой корреляции Спирмена составил $K_s=0,954-0,987$ (см. рис. 9).

Выполнена оценка чувствительности результатов ранжирования контроллерных

систем. В основе оценки чувствительности используется анализ влияния изменения веса подкритериев на ранг определенной контроллерной системы. Описание рассмотренных сценариев и результаты устойчивости ранжирования контроллерных систем приведены в табл. 4 и рис. 10.

Результаты оценки чувствительности ранжирования контроллерных систем показывают, что во всех сценариях устойчивость

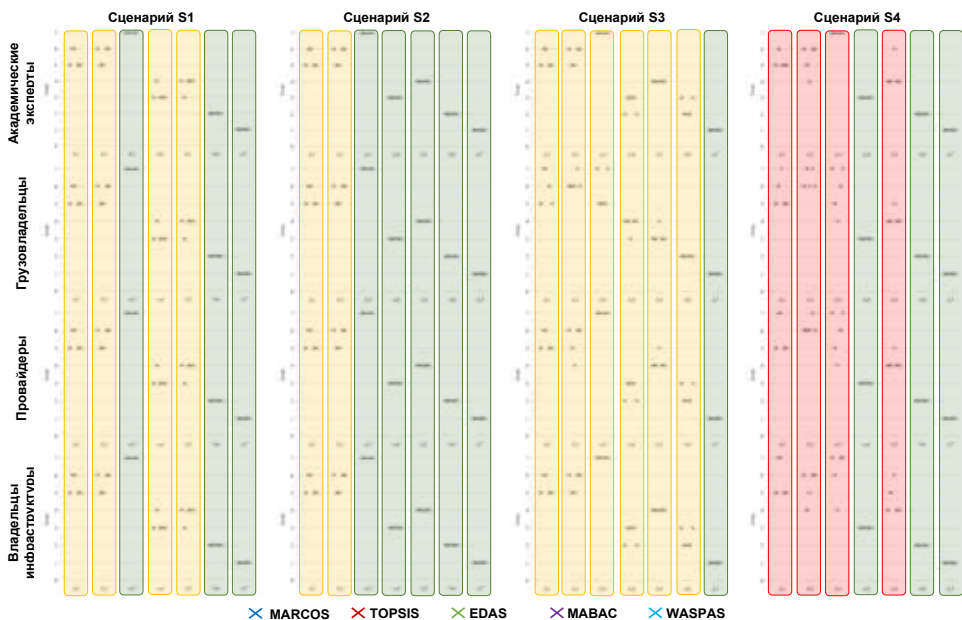


Рис. 10. Результаты оценки устойчивости ранжирования контроллерных систем [рассчитаны авторами].

Описание сценариев оценки устойчивости результатов ранжирования
контрейлерных систем [составлено авторами]

Сценарий	Описание сценария	Результаты ранжирования
S1	Вес всех подкритериев одинаковый и равен среднеарифметическому значению 0,0476	Ранги альтернатив А3, А6 и А7 устойчивы у всех экспертов по всем MCDM методам (зеленая область на рис. 10). Альтернативы А1, А2, А4 и А5 имеют незначительные изменения по 3, 4, 5 и 6 рангам среди MCDM методов (желтая область на рис. 10)
S2	Вес каждого подкритерия принят равным среднеарифметическому значению оценки по всем четырем группам экспертов (например, С1=0,0425)	Ранги альтернатив А3, А4, А5, А6 и А7 устойчивы у всех экспертов по всем MCDM методам. Альтернативы А1 и А2 имеют незначительные изменения по 5 и 6 рангам.
S3	Исключение критерия с наибольшим весом и изменение веса оставшихся подкритериев пропорционально значению данного подкритерия. Для группы академических экспертов был исключен С9=0,0619, для грузовладельцев С11=0,0587, перевозчиков С10=0,058 и владельцев инфраструктуры С9=0,0635	Альтернатива А7 (ранг 1) устойчива у всех экспертов по всем MCDM методам. У альтернативы А3 ранг 7 устойчив у всех экспертов, кроме грузовладельцев. Альтернативы А1, А2, А4, А5 и А6 имеют незначительные изменения, как по рангу, так и по MCDM методам.
S4	Исключение подкритерия с наименьшим весом и изменение веса оставшихся подкритериев пропорционально значению данного подкритерия. Для группы академических экспертов был исключен С12=0,0344, для грузовладельцев С2=0,0368, перевозчиков С2=0,0352 и владельцев инфраструктуры С2=0,0347	Ранги альтернатив А4, А6 и А7 устойчивы у всех экспертов по всем MCDM методам. Альтернативы А1, А2, А3 и А5 имеют незначительные изменения по рангам, так и по MCDM методам (розовая область на рис. 10).

сохраняет альтернатива А7 (ранг № 1), представленная системой Flexiwaggon. Альтернатива А6 (система Megaswing – ранг № 2) является устойчивой в сценариях S1, S2 и S4 для всех групп экспертов. Незначительные изменения устойчивости результатов оценки наблюдаются по остальным альтернативам.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Эффект от использования контрейлерной технологии для обеспечения устойчивого развития цепей поставок не постоянен и зависит от характеристик конкретной контрейлерной системы. Разнообразие технико-технологических решений контрейлерных систем также ограничивает их совместное использование при формировании сетевой структуры глобальных цепей поставок и транспортных коридоров.

Наиболее приоритетными в использовании в цепях поставок являются системы, обладающие высокой мобильностью обслуживания ИТЕ и не требующие существенных капиталовложений в создание терминальной инфраструктуры. В первую очередь это достигается в результате применения высоко-технологичного железнодорожного подвиж-

ного состава, способного обеспечивать горизонтальную погрузку и выгрузку ИТЕ без вспомогательных устройств и механизмов. Данные условия выполняются шведскими контрейлерными системам Flexiwaggon и Megaswing. Вторым приоритетным направлением является использование контрейлерных систем, базирующихся на уже функционирующих инфраструктурных объектах – железнодорожных станциях и терминалах, что обуславливает применение более простых по конструкции вагонов. Это позволяет сократить размер инвестиций в создание сети интермодальных терминалов и формирование парка специализированного железнодорожного подвижного состава. Такими системами являются Rolling Road и «Пространство 1520».

Дальнейшими направлениями данного исследования являются выделение и анализ целей, интересов и стратегий поведения стейкхолдеров контрейлерной технологии для определения системы их взаимодействия, а также разработка концептуальной модели функционирования контрейлерной технологии в цепях поставок, отвечающих целям устойчивого развития.



СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Zhao, Xianbo; Ke, Yongjian; Zuo, Jian; Xiong, Wei; Wu, Peng. Evaluation of sustainable transport research in 2000–2019. *Journal of Cleaner Production*, 2020, Vol. 256, 120404. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.120404.
2. Aloui, A., Hamani, N., Derrouiche, R., Delahoche, L. Systematic literature review on collaborative sustainable transportation: Overview, analysis and perspectives. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 2021, Vol. 9, 100291. DOI: 10.1016/j.trip.2020.100291.
3. Osintsev, N., Tsyganov, A., Rakhmangulov, A., Sladkowski, A. Multi-criteria Assessment of Piggyback Systems in Sustainable Supply Chains. In: Sladkowski, A. (eds) *Modern Trends and Research in Intermodal Transportation. Studies in Systems, Decision and Control*, Vol 400. Springer, Cham, 2022, pp. 451–559. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-87120-8_10 [ограниченный доступ].
4. Lehtinen, J., Bask, A. H. Analysis of business models for potential 3Mode transport corridor. *Journal of Transport Geography*, 2012, Vol. 22, pp. 96–108. DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2011.12.001.
5. Gharehgozli, A., Vries, H. de, Decrauw, S. The role of standardisation in European intermodal transportation. *Maritime Business Review*, 2019, Vol. 4 (2), pp. 151–168. DOI: 10.1108/MABR-09-2018-0038.
6. Tsyganov, A. V., Osintsev, N. A. Systematization of rolling-stock parameters in piggyback systems. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, Vol. 709, 33010. DOI: 10.1088/1757-899X/709/3/033010.
7. Rui Wang, Kai Yang, Lixing Yang, Ziyao Gao. Modeling and optimization of a road–rail intermodal transport system under uncertain information. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2018, Vol. 72, pp. 423–436. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2018.04.022>.
8. Krstić, M., Tadić, S., Elia, V., Massari, S., Farooq, M. U. Intermodal Terminal Subsystem Technology Selection Using Integrated Fuzzy MCDM Model. *Sustainability*, 2023, Vol. 15 (4), 3427. DOI: 10.3390/su15043427.
9. Cong Li, Guang Yang, Xianan Sun. Transshipment Equipments for Road–Rail Intermodal Transport. *Advanced Materials Research*, 2015, Vol. 1065–1069, pp. 3377–3380. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1065-1069.3377.
10. Xinghan Chen, Tianshuai Zuo, Maoxiang Lang, Shiqi Li, Siyu Li. Integrated optimization of transfer station selection and train timetables for road–rail intermodal transport network. *Computers & Industrial Engineering*, 2022, Vol. 165, 107929. DOI: 10.1016/j.cie.2021.107929.
11. El Yaagoubi, A., Ferjani, A., Essaghir, Y., Sheikhamadi, F., Abourraja, M. N., Boukachour, J., Baron, M.-L., Duvallet, C., Khodadad-Saryzadi, A. A logistic model for a french intermodal rail/road freight transportation system. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2022, Vol. 164, 102819. DOI: 10.1016/j.trre.2022.102819.
12. Федорина А. В., Цыганов А. В. Комплексный подход к внедрению контрейлерных перевозок в России // Современные проблемы транспортного комплекса России. – 2015. – Т. 5. – № 1. – С. 21–28. EDN: VPWEDJ.
13. Колик А. В. Комбинированные железнодорожно-автомобильные перевозки в цепях поставок. – М.: Изд-во «Техполиграфцентр», 2018. – 301 с. ISBN 978-5-94385-143-8.
14. Crainic, T. G., Perboli, G., Rosano, M. Simulation of intermodal freight transportation systems. *European Journal of Operational Research*, 2018, Vol. 270 (2), pp. 401–418. DOI: 10.1016/j.ejor.2017.11.061.
15. Koohathongsumrit, N., Meethom, W. An integrated approach of fuzzy risk assessment model and data envelopment analysis for route selection in multimodal transportation networks. *Expert Systems with Applications*, 2020, 114342. DOI: 10.1016/j.eswa.2020.114342.
16. Banasik, A., Bloemhof-Ruwaard, J. M., Kanellopoulos, A., Claassen, G. D. H., Vorst van der, J. G. A. J. Multi-criteria decision making approaches for green supply chains: A review. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 2018, Vol. 30 (3), pp. 366–396. DOI: 10.1007/s10696-016-9263-5.
17. Цыганов А. В., Осинцев Н. А., Рахмангулов А. Н., Зенкин А. А. Критерии устойчивости контрейлерной системы // Мир транспорта. – 2023. – № 5 (108). – С. 126–134. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-5-14>.
18. Gabus, A., Fontela, E. World problems, an invitation to further thought within the framework of DEMATEL. Geneva, Switzerland: Battelle Geneva Research Centre, 1972. pp. 1–8.
19. Sheng-Li, Si; Xiao-Yue, You; Hu-Chen, Liu; Zhang Ping. DEMATEL technique: a systematic review of the state-of-the-art literature on methodologies and applications. *Mathematical Problems in Engineering*, 2018, Vol. 2018, 3696457. DOI: 10.1155/2018/3696457.
20. Stević, Ž., Pamučar, D., Puškar, A., Chatterjee, P. Sustainable supplier selection in healthcare industries using a new MCDM method: Measurement of alternatives and ranking according to Compromise solution (MARCOS). *Computers & Industrial Engineering*, 2020, Vol. 140, 106231. DOI: 10.1016/j.cie.2019.106231.
21. Ching-Lai, Hwang; Kwangsun, Yoon. Multiple Attribute Decision Making. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1981, 270 p.
22. Keshavarz Ghorabae, M., Zavadskas, E. K., Olfat, L., Turskis, Z. Multi-Criteria Inventory Classification Using a New Method of Evaluation Based on Distance from Average Solution (EDAS). *Informatica*, 2015, Vol. 26, Iss. 3, pp. 435–451. DOI: 10.15388/Informatica.2015.57.
23. Pamučar, D., Čirović, G. The selection of transport and handling resources in logistics centers using multi-attributive border approximation area comparison (MABAC). *Expert Systems with Applications*, 2015, Vol. 42, Iss. 6, pp. 3016–3028. DOI: 10.1016/j.eswa.2014.11.057.
24. Zavadskas, E. K., Turskis, Z., Antucheviciene, J. Optimization of Weighted Aggregated Sum Product Assessment. *Electronics and Electrical Engineering*, 2012, Vol. 122, Iss. 6, pp. 3–6. DOI: 10.5755/j01.eee.122.6.1810.

Информация об авторах:

Осинцев Никита Анатольевич – кандидат технических наук, доцент кафедры логистики и управления транспортными системами Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова, Магнитогорск, Россия, osintsev@magtu.ru.

Цыганов Александр Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры логистики и управления транспортными системами Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова, Магнитогорск, Россия, tsyganov.alek@gmail.com.

Рахмангулов Александр Нельевич – доктор технических наук, профессор кафедры логистики и управления транспортными системами Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова, Магнитогорск, Россия rap@magtu.ru.

Багинова Вера Владимировна – доктор технических наук, заведующий кафедрой логистики и управления транспортными системами Российского университета транспорта, Москва, Россия, vvbaginova@gmail.com.

Статья поступила в редакцию 25.09.2023, одобрена после рецензирования 13.12.2023, принята к публикации 17.12.2023.



Обоснование транспортных издержек при перевозке насыпных грузов в контейнерах интегральным методом



Елена КУРЗИНА



Нина КОРНИЕНКО



Ангелина КУРЗИНА

Елена Геннадьевна Курзина¹, Нина Амосовна Корниенко², Ангелина Михайловна Курзина³

^{1, 2, 3} Российский университет транспорта, Москва, Россия.

¹ORCID 0000-0003-1056-3344; РИНЦ SPIN-код: 9587-6660; РИНЦ Author ID: 16562.

²ORCID 0000-0001-89686-0694; РИНЦ SPIN-код: 1068-8596; РИНЦ Author ID: 351358.

³ORCID 0000-0002-1081-3086; РИНЦ SPIN-код: 4248-4152; РИНЦ Author ID: 1078181.

✉ ¹ kurzina_elena@mail.ru.

АННОТАЦИЯ

В настоящее время большой объем экспортных поставок угля и других насыпных и навалочных грузов в Китай осуществляется контейнерным способом, главным преимуществом которого является возможность осуществления мультимодальных перевозок. Этот вопрос также приобретает актуальность и в отношении других стран, транспортные коридоры с которыми предусматривают морские перевозки. Однако, одной из главных проблем контейнерных перевозок угля является меньшая масса нетто груза, перевозимого в двух контейнерах, по сравнению с одним стандартным полувагоном, применяемым при традиционном способе перевозки.

В работе проведен интегральный расчет пяти возможных вариантов загрузки угля в контейнер с образова-

нием «шапки» в виде сферических или эллиптических сегментов. В результате проведенных расчетов выявлены объемный и массовый недогруз контейнеров, который значительно влияет на транспортные расходы. Полиномиальная аппроксимация рассмотренных вариантов размещения груза в контейнерах на железнодорожных платформах в составе поезда показала увеличение эксплуатационных расходов вследствие недогруза, связанных с простоем вагона-платформы и контейнера под грузовыми операциями (погрузка/разгрузка) и тарифами на транспортировку. Сделаны предложения по уменьшению транспортных издержек при контейнерных перевозках угля и других насыпных и навалочных грузов железнодорожным транспортом.

Ключевые слова: железнодорожный транспорт, контейнерные перевозки насыпных и навалочных грузов, интегральный расчет размещения груза в контейнере, издержки вследствие неравномерного размещения.

Благодарность. Авторы выражают признательность И. С. Заикину, студенту Российского университета транспорта, за помощь в сборе информационных материалов при проведении исследования.

Для цитирования: Курзина Е. Г., Корниенко Н. А., Курзина А. М. Обоснование транспортных издержек при перевозке насыпных грузов в контейнерах интегральным методом // Мир транспорта. 2023. Т. 21. № 6 (109). С. 131–136. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-6-15>.

Полный текст статьи на английском языке публикуется во второй части данного выпуска.

The full text of the article in English is published in the second part of the issue.

ВВЕДЕНИЕ

В конце 2020 года экспортные поставки угля, а также других насыпных и навалочных грузов стали осуществляться в контейнерах типа Ореп Тор [1]. В настоящее время регулярная перевозка каменного угля осуществляется из Забайкалья в КНР через погранпереход Забайкальск – Маньчжурия (рис. 1), причем доля таких контейнерных перевозок в Китай занимает в целом 95 %. По мнению РЖД, этот способ позволяет упростить и ускорить процесс отправки угля на экспорт. Контейнер просто переставляется с российской платформы на китайскую¹.

Аналогично можно переставлять контейнер на автомобильный транспорт и морские суда, что особенно актуально в условиях развития международных транспортных коридоров, в том числе «Север–Юг» [2; 3].

Общий объем отечественных контейнерных перевозок из года в год неуклонно растет [4–6]. Данный способ перевозок также активно развивается в последнее время в странах, с которыми нас связывают общие транспортные коридоры [7–9].

К преимуществам контейнерных перевозок насыпных и навалочных грузов следует отнести:

- сокращение времени погранично-таможенных операций с 4 ч до 1,5 ч;
- ускорение оборота грузовых вагонов, задействованных в перевозке;

– сокращение времени перегрузки на другой вид транспорта (морской, автомобильный), т. е. возможность интермультимодальных перевозок;

– решение проблемы смерзшегося угля на пограничных станциях при перегрузке из российского подвижного состава в китайский и др.;

– снижение нагрузки на железнодорожную инфраструктуру;

– увеличение скорости грузопотока;

– минимизация экологического ущерба.

Однако, несмотря на увеличение объемов отправок по сети угля в контейнерах, целый ряд вопросов до сих пор остается актуальным [1; 10; 11]. Одним из главных вопросов является уменьшение массы нетто перевозимого груза в двух контейнерах по сравнению с одним стандартным полувагоном.

Целью исследования является интегральный расчет возможных вариантов загрузки угля в контейнер и разработка предложений по уменьшению транспортных издержек при контейнерных перевозках угля и других насыпных и навалочных грузов железнодорожным транспортом.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Ранее уголь и другие насыпные и навалочные грузы перевозились преимущественно в полувагонах насыпным методом (рис. 2 а). Внутренний объем кузова полувагона составляет 88 м³.

В настоящее время уголь перевозят в двух 20-футовых контейнерах с внутренним объе-



Рис. 1. Контейнерная перевозка каменного угля в Китай.
Фото агентства Синьхуа. [Электронный ресурс]: https://russian.news.cn/2021-04/13/c_139878444.htm. Доступ 30.08.2023.



а)



б)

Рис. 2. Перевозка каменного угля: а) в полувагонах; б) в контейнерах.
Фото Интернет-портала ОАО «РЖД». [Электронный ресурс]: <https://company.rzd.ru/ru/9407/page/68650?id=2148>;
<https://company.rzd.ru/ru/9407/page/68650?id=21273>.

мом каждого 32 м^3 , устанавливаемых на железнодорожную платформу (рис. 2 б).

Следовательно, номинальный объем перевозимого насыпного груза в полувагоне в 1,375 раза больше, чем на платформе с двумя контейнерами.

Статистические данные показывают, что в среднем в одном 20-футовом контейнере перевозится около 34 т угля при максимальной вместимости 39,4 т. Таким образом, недоразгрузка составляет 5,4 т. Потери в объеме перевозимого груза могут быть связаны с неравномерной загрузкой и даже с недогрузкой вагонов.

Актуальным в этой связи является анализ причин недогрузки контейнеров углем и связанных с этими издержками при транспортировке.

Погрузка угля на подъездных путях шахт и карьеров в полувагоны и контейнеры осуществляется роторным экскаватором. В большинстве случаев загрузка происходит с образованием «шапки» без последующего разравнивания и уплотнения. Форма «шапки» зависит от сыпучести угля. В связи с чем рассмотрено пять вариантов загрузки угля в контейнер, представленных на рис. 3:

1. 2/3 высоты контейнера полностью заполнены углем, а сверху шаровой сегмент радиусом $R = 1,161 \text{ м}$ и высотой $c = 0,762 \text{ м}$.

2. 2/3 высоты контейнера полностью заполнены углем, а сверху эллиптический сегмент с полуосями $a = 1,161 \text{ м}$ и $b = 1,6235 \text{ м}$, высотой $c = 0,762 \text{ м}$.

3. 2/3 высоты контейнера полностью заполнены углем, а сверху эллиптический сег-

мент с полуосями $a = 1,161 \text{ м}$ и $b = 2,086 \text{ м}$, высотой $c = 0,762 \text{ м}$.

4. 2/3 высоты контейнера полностью заполнены углем, а сверху эллиптический сегмент с полуосями $a = 1,161 \text{ м}$ и $b = 2,3485 \text{ м}$, высотой $c = 0,762 \text{ м}$.

5. Контейнер полностью заполнен углем.

Объем контейнера составляет $V = A \cdot B \cdot C = 5,902 \cdot 2,330 \cdot 2,352 = 32,34 \text{ м}^3$.

В зависимости от вариантов загрузки объем контейнера составит:

$$1. V_1 = V_{2/3} + V_{\text{шс}}$$

$$2. V_2 = V_{2/3} + V_{\text{эс1}}$$

$$3. V_3 = V_{2/3} + V_{\text{эс2}}$$

$$4. V_4 = V_{2/3} + V_{\text{эс3}}$$

$$5. V_5 = V,$$

где $V_{2/3}$ – 2/3 объема контейнера, равные $V_{2/3} = 32,34 \cdot 2/3 = 21,56 \text{ м}^3$;

$V_{\text{шс}}$ – объем шарового сегмента сферы, который находится интегрированием тела вращения, заданного каноническим уравнением шара радиусом $1,161 \text{ м}$, в пределах интегрирования от 0 до $0,762 \text{ м}$;

$V_{\text{эс1}}$ – объем эллиптического сегмента сферы, который находится интегрированием тела вращения, заданного каноническим уравнением эллипса с полуосями $a = 1,161 \text{ м}$ и $b = 1,6235 \text{ м}$, в пределах интегрирования от 0 до $0,762 \text{ м}$;

$V_{\text{эс2}}$ – объем эллиптического сегмента сферы, который находится интегрированием тела вращения, заданного каноническим уравнением эллипса с полуосями $a = 1,161 \text{ м}$ и $b = 2,086 \text{ м}$, в пределах интегрирования от 0 до $0,762 \text{ м}$;

$V_{\text{эс3}}$ – объем эллиптического сегмента сферы, который находится интегрированием



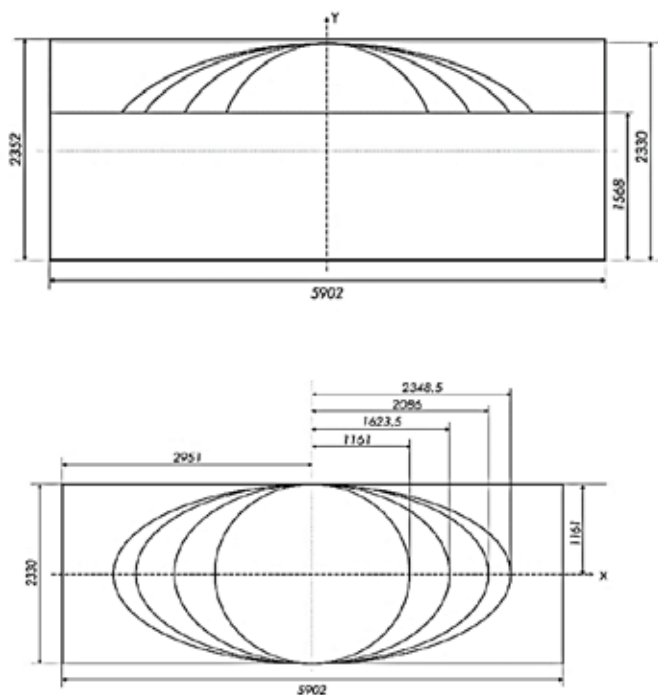


Рис. 3. Графическое представление рассмотренных вариантов загрузки угля в контейнер [выполнено авторами].

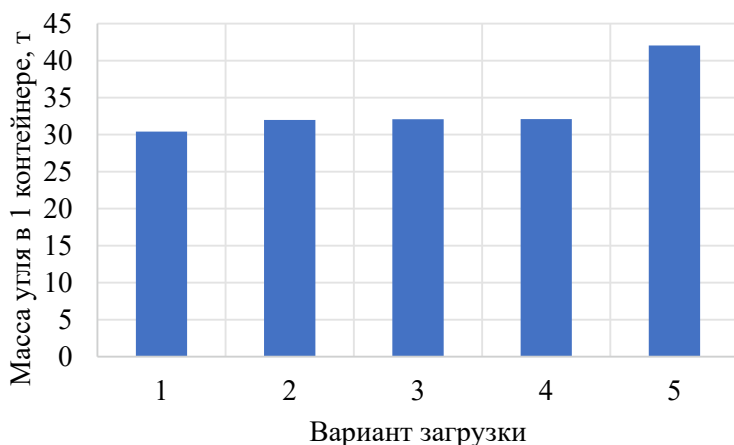


Рис. 4. Диаграмма распределения загрузки контейнера в тоннах по пяти возможным вариантам [выполнено авторами].

тела вращения, заданного каноническим уравнением эллипса с полуосями $a = 1,161$ м и $b = 2,3485$ м, в пределах интегрирования от 0 до 0,762 м.

В общем случае объем тела вращения относительно оси OY определяется по формуле:

$$V_{Oy} = \pi \int_c^d x^2 dy.$$

Для сферического сегмента подынтегральная функция будет $R^2 = x^2 + y^2$, а для эллиптического $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$.

$$V_{ис} = \pi \int_0^{0,762} (R^2 - y^2) dy = \pi \left(R^2 y - \frac{y^3}{3} \right) \Big|_0^{0,762}$$

$$V_{эс1} = \pi \int_0^{0,762} \left(a^2 \left(1 - \frac{y^2}{b^2} \right) \right) dy = \pi \left(a^2 y - \frac{y^3}{3b^2} \right) \Big|_0^{0,762}.$$

Таблица 1

Результаты расчета объема загрузки контейнера по пяти возможным вариантам
[выполнено авторами]

№ варианта загрузки	$V_{2/3}, \text{ м}^3$	$V_{\text{«шапки»}}; V_{\text{шс}} \text{ и } V_{\text{эс}}, \text{ м}^3$	$V, \text{ м}^3$	Объемный недогруз контейнера, м^3
1	21,56	$0,585\pi$	23,40	8,94
2	21,56	$0,971\pi$	24,61	7,73
3	21,56	$0,993\pi$	24,68	7,66
4	21,56	π	24,70	7,64
5	-	-	32,34	-

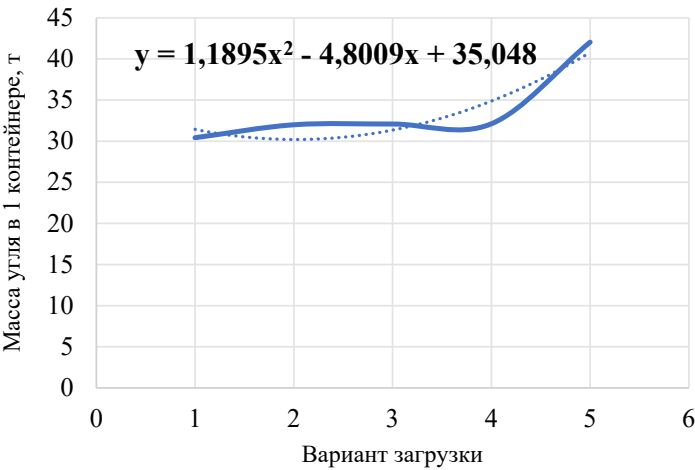


Рис. 5. Графическое представление результатов расчетов возможной загрузки контейнеров углем с аппроксимацией полиномиальной зависимостью [выполнено авторами].

Аналогично рассчитываются $V_{\text{эс}2}$ и $V_{\text{эс}3}$, которые отличаются размерами полуосей b.

Результаты расчетов объема перевозимого груза представлены в табл. 1.

Результаты расчетов показали, что объемный недогруз контейнеров может составлять от 7,64 м^3 до 8,94 м^3 .

Если принять среднюю плотность угля $\rho_y = 1,3 \text{ т/м}^3$, то масса угля в 1 контейнере составит $m_y = \rho_y \cdot V_y$, а недогруз контейнера по массе составит для рассмотренных вариантов $\Delta m_y = m_n - m_{y1}$. Результаты расчета недогруза контейнеров по массе представлены в таблице 2 и на рис. 4.

Следовательно, массовый недогруз угля в одном контейнере по рассмотренным вариантам может составлять от 9,932 т до 11,622 т.

Если массы угля по возможным вариантам загрузки описать полиномиальной зависимостью (рис. 5), то массу угля в пяти контейнерах можно найти как площадь криволинейной трапеции. В этом случае масса угля в пяти контейнерах составит:

$$M_5 = \int_0^5 (1,1895x^2 - 4,8009x + 35,048) dx = \\ = \left(1,1895 \frac{x^3}{3} - 4,8009 \frac{x^2}{2} + 35,048x \right) \Big|_0^5 = 164,79.$$

Таблица 2

Результаты расчета загрузки контейнера в тоннах по пяти возможным вариантам
[выполнено авторами]

Номер варианта загрузки	Масса угля в 1 контейнере $m_y, \text{ т}$	Недогруз контейнера $\Delta m_y, \text{ т}$
1	30,420	11,622
2	31,993	10,049
3	32,084	9,958
4	32,110	9,932
5	42,042	-



Следует отметить, что при полной загрузке пяти контейнеров (5 вариант) перевозимая масса угля составит 210,21 т.

Если, например, необходимо перевезти 1050 т угля, то при максимальной загрузке будет задействовано 25 контейнеров, а при недогрузе – 32 контейнера, что значительно, до 25 %, увеличит расходы, связанные с простым вагона-платформы и контейнера под грузовыми операциями (погрузка/разгрузка), и тарифы на транспортировку.

Таким образом, для уменьшения издержек, связанных с затратами на увеличение количества контейнеров Open Top при транспортировке заданной массы угля при его неравномерном размещении, необходимо ввести операцию выравнивания и уплотнения груза в контейнере. Для полувагонов существуют специальные катки для выравнивания, а для контейнеров необходимо создать такие приспособления.

Следует также отметить, что для увеличения грузоподъемности и скорости движения платформ для перевозки контейнеров в настоящее время проводятся работы по созданию высокоскоростных шестиосных платформ, которые позволят устанавливать большее количество (три единицы) контейнеров Open Top, тем самым доведя сравнимые объемы перевозимого груза до уровня полувагонов, естественно, с учетом их равномерной полной загрузки.

Повышение скоростей движения платформ, а также возможность термоизоляции контейнеров способствуют решению вопросов, связанных со смерзанием угля, в связи с чем внедрение таких разработок является в настоящее время весьма актуальной задачей.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Перевозка угля и других насыпных грузов в контейнерах: новая универсальность или новые сложности // Информационное агентство «РЖД-Партнер.РУ». – 19.03.2021. [Электронный ресурс]: <https://www.rzd-partner.ru/zhd-transport/comments/perevozka-uglya-i-drugikh-nasypanykh-gruzov-v-konteynerakh-novaya-universalnost-ili-novye-slozhnosti/>. Доступ 10.09.2023.

2. Карлов А. В. Методы принятия решений в транспортной политике: многокритериальный подход. Мир транспорта. – 2023. – Т. 21. – № 1. – С. 32–39. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-1-4>.

3. Куренков П. В., Белозеров В. Л., Малышева О. В., Элларян А. С., Ахтонов В. И. Мультимодальная доставка грузов из России в Иран и Индию по транспортному коридору «Север-Юг» // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. – 2020. – № 3. – С. 15–23. EDN: WFESMB.

4. Хатыанов А. А. Задача стратегического значения // Железнодорожный транспорт. – 2020. – № 5. – С. 20–25. EDN: DVQLAQ.

5. Аствацатурова К. В., Казакова Н. А. Прогноз влияния рынка железнодорожных контейнерных перевозок на ВВП Российской Федерации // Финансы: теория и практика. – 2022. – Т. 26. – № 6. – С. 6–16. EDN: CBADYJ.

6. Федотов А. Н., Мальцев К. С. Организация коммерческой работы в сфере контейнерных перевозок на железнодорожном транспорте // В сб.: Активизация интеллектуального и ресурсного потенциала регионов. Материалы IV Всероссийской научно-практической конференции: в 2-х частях. Под научной редакцией Н. Н. Даниленко, О. Н. Басовой. – Иркутск: Байкальский государственный университет, 2018. – С. 100–103. EDN: YKUIYN.

7. Куанышбаев Ж. М., Рахметова Р. Уровень контейнеризации в Казахстане и в мире // В сб.: Актуальные проблемы транспорта и энергетики: пути их инновационного решения. Материалы X Международной научно-практ. конференции. Сост. Г. Т. Мерзудинова, Т. Б. Сулейменов, Т. Т. Султанов. Нур-Султан. – Астана: Евразийский национальный университет им. Л. Н. Гумилева, 2022. – С. 42–44. EDN: EIAYLG.

8. Намжилова В. О. Значение пограничных пунктов пропуска товаров внутренней Монголии для развития трансграничных связей КНР // Российско-китайские исследования. – 2021. – Т. 5. – № 3. – С. 179–184. EDN: DENHVT.

9. Расулов М. Х., Исмагуллаев А. Ф. О перспективах развития ускоренных контейнерных перевозок в Узбекистане // Инновационный транспорт. – 2021. – № 1 (39). – С. 50–54. EDN: XRYWY.

10. Чернышова А. В., Рустамова И. Т. Актуальные проблемы и развитие контейнерных перевозок на современном этапе // Инновационная экономика и современный менеджмент. – 2023. – № 1 (43). – С. 46–48. EDN: DGNHVM.

11. Федорова Н. Б., Подвербных А. А. Проблемы и перспективы контейнерных перевозок // В сб.: Управление эксплуатационной работой на транспорте (УЭРТ-2022). Сб. трудов Международной научно-практ. конференции. под редакцией А. Ю. Панычева, Т. С. Титовой, О. Д. Покровской; отв. за выпуск А. В. Суторовский, Г. И. Никифорова, Т. Г. Сергеева, М. А. Марченко. – СПб.: ПГУПС, 2022. – С. 145–148. EDN: NIULWU.

Информация об авторах:

Курзина Елена Геннадьевна – кандидат технических наук, доцент кафедры высшей математики Российского университета транспорта, Москва, Россия, kurzina_elena@mail.ru.

Корниенко Нина Амосовна – кандидат технических наук, доцент кафедры высшей математики Российского университета транспорта, Москва, Россия, kornienkonina67@yandex.ru.

Курзина Ангелина Михайловна – кандидат технических наук, доцент кафедры высшей математики Российского университета транспорта, Москва, Россия, aekfm@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 15.05.2023, одобрена после рецензирования 13.09.2023, принята к публикации 17.09.2023.



**ТРАНСПОРТНОЕ
ОБРАЗОВАНИЕ**

138

Выпускники МИИТ из Казахстана: годы учебы, научные и трудовые свершения. История сотрудничества, устремленная в будущее.



**ГАЛЕРЕЯ ИМЁН:
С. Ю. ВИТТЕ**

146

140 лет назад увидел свет труд С. Ю. Витте, посвящённый железнодорожным тарифам. Эта дата – повод вновь проанализировать его историческое наследие как с теоретической, так и с практической точки зрения. Заключительная часть статьи.

КОЛЕСО ИСТОРИИ





НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 001:378(574)

DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-6-16>

Вспоминая научную Alma mater



Бакытжан КУАНЫШЕВ

Бакытжан Муханбетович Куанышев

ТОО «Инжиниринговый центр КазАТК», Астана, Республика Казахстан.

✉ Kazprofrans@gmail.com.

АННОТАЦИЯ

Статья выпускника МИИТ, носящего сейчас имя Российского университета транспорта – РУТ (МИИТ), посвящена многим поколениям казахстанцев, получившим свое образо-

вание в университете, их трудовым свершениям, современным формам сотрудничества, способствующим развитию новых поколений транспортников России и Казахстана.

Ключевые слова: МИИТ, история транспорта, транспортное образование, Российский университет транспорта.

Для цитирования: Куанышев Б. М. Вспоминая научную Alma mater // Мир транспорта. 2023. Т. 21. № 6 (109). С. 138–145.
DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-6-16>.

Полный текст статьи на английском языке публикуется во второй части данного выпуска.
The full text of the article in English is published in the second part of the issue.

30 июня 2023 года ушёл из жизни президент Российского университета транспорта, доктор технических наук, профессор Лёвин Борис Алексеевич. Рассказывая коллегам о поездке в Москву и участии в траурных мероприятиях прощания с Борисом Алексеевичем, я понял, что несмотря на скорбность события, в душах выпускников МИИТ сохраняются самые светлые воспоминания о днях, проведённых в институте. Короткая, но ёмкая для всех выпускников института аббревиатура МИИТ знакома и заставляет учащённо биться сердца многих тысяч его питомцев в более чем 70 странах мира. За эти годы название института неоднократно менялось, но для нас, выпускников, он навсегда останется известным под именем МИИТ!

Борис Алексеевич, выпускник МИИТ 1973 года, прошёл путь от студента до ректора своей Alma mater, здесь же состоялось его научное становление – от аспиранта до доктора наук, профессора. До последних дней своей жизни, будучи президентом Российского университета транспорта (нынешнее название вуза), он продолжал заниматься развитием университета, позволившем учебному заведению занять лидерские позиции в транспортном образовании и науке не только в России, но и на международном уровне.

На примере выпускников МИИТ из Казахстана хотелось бы в этой статье рассказать, как в рамках подготовки инженерных кадров для союзных республик в советский период шла подготовка национальных научных специалистов. Аспирантура и докторантура МИИТ, в последующем преобразованная, при непосредственном участии профессора Б. А. Лёвина, в Отраслевой центр подготовки научно-педагогических кадров, обеспечивала целевую подготовку научных кадров высшей квалификации для всех вузов и научно-исследовательских институтов железнодорожного транспорта Советского Союза и стран социалистической ориентации. Эта работа была продолжена и в постсоветский период.

Университет став активным участником федеральных приоритетных проектов в области образования и науки, продолжает оставаться координатором научной, образовательной и методической деятельности транспортных вузов и научных организаций СНГ.

В МИИТ в советский период в разные годы обучались несколько тысяч студентов из Казахстана, которые затем составили костяк инженерно-технических и экономических служб Туркестано-Сибирской, Карагандинской, Казахской, а в последующем Алма-Атинской, Западно-Казахстанской и Целин-



Фотография 1 [предоставлена автором].

ной железных дорог. Только в 1965 году в МИИТ на разных факультетах и курсах обучались более сотни студентов из Казахстана, часть групповой виньетки этих студентов из 55 человек представлена на фотографии 1. За каждой личностью на этом фото видны умные, целеустремленные, красивые 20–25-летние парни и девушки, которым только предстоит целая жизнь, полная проб и ошибок, успехов и неудач... Но в глазах каждого светится ум и желание принести пользу обществу! Среди них – будущие инженеры, директора заводов, начальники станций, депо, дистанций пути, начальники отделений дорог, начальники различных служб железной дороги, научные сотрудники, доценты и профессора институтов. Надеюсь, что эта групповая фотография найдёт своё место и достойное описание в музеях МИИТ и Казахстанской железной дороги.

После распада Советского Союза правопреемник трёх железных дорог Казахстана – национальная железнодорожная компания АО «Қазақстан темір жолы» продолжила подготовку инженерных и научных кадров в МИИТ.

Выпускники МИИТ, работники различных хозяйств железных дорог, будь это локомотивщики, вагонники, путейцы, движенцы, грузовики, энергетики, связисты, мостовики, СЦБисты, инженеры-экономисты, всегда отличались от остальных выпускников транспортных вузов глубокими теоретическими и инженерными знаниями в увязке с практическими эксплуатационными и техническими навыками, приобретенными ещё в студенчестве в период учебных и производственных практик. Среди выпускников МИИТ 1930–1960 годов – такие руководители как:

Радоман Иосиф Антонович (1934 год – здесь и далее в скобках указан год окончания института), начальник службы пути Туркестано-Сибирской железной дороги в 1945–1949 годах;

Манасов Толеген Мустафеевич (1936 год), заместитель начальника Туркестано-Сибирской железной дороги в 1938–1943 годах;

Бостанов Абдулкерим Сулейманович (1938 год), начальник службы вагонного хозяйства Казахской железной дороги в 1969–1976 гг.;

Мороз Владимир Иванович (1940 год), начальник службы материально-технического

снабжения Казахской железной дороги в 1958–1969 гг.;

Тимофеев Петр Тимофеевич (1946 год), начальник Уральского отделения Оренбургской железной дороги в 1946–1955 гг.;

Бикбулатова Нурезиган Миргалиевна (1946 год), заместитель начальника планово-экономического отдела Казахской железной дороги в 1963–1977 гг.;

Пушков Трофим Тимофеевич (год окончания института неизвестен), начальник Карагандинского отделения железной дороги в 1951–1957 гг.;

Шамшина (Кобжасарова) Фаина Васильевна (1948 год), директор Актюбинского филиала АЛИИТа в 1977–1980 гг.;

Чарыков Владимир Тимофеевич (1949 год), начальник отдела труда, заработной платы и техники безопасности Казахской железной дороги в 1963–1975 гг.;

Рубинштейн Бертран Иосифович в 1940 году поступил в МИИТ, в 1941 году, прервав учебу, ушёл на фронт, после войны в 1950 году закончил институт, с 1960 по 1993 год работал начальником Кустанайского отделения железной дороги;

Куленова Фатима Куленовна (год окончания института неизвестен), начальник пассажирской службы Казахской железной дороги в 1958–1971 гг.;

Бектасов Шахман Абдрахманович (1950 год), директор Алма-Атинского завода низковольтной аппаратуры в 1966–1988 гг.;

Степанов Сергей Дмитриевич (год окончания института неизвестен), начальник Павлодарского отделения железной дороги в 1954–1958 гг.;

Родионов Роберт Алексеевич (1951 год), заместитель начальника локомотивной службы Казахской железной дороги в 1958–1965 гг.;

Мухамедгалиев Лукпан Мухамедгалиевич (1953 год), заместитель начальника службы движения Казахской железной дороги в 1971–1975 гг.;

Прманов Байзак Прманович (1953 год), начальник Курорт-Боровского (1948–1950 гг.) и Атбасарского (1953–1958 гг.) отделений железной дороги;

Хасенов Сатыбай Хасенович (1953 год), начальник Жана-Аркинского отделения железной дороги в 1948–1958 гг.;

Жакишев Темиргали Жакишевич (1954 год), начальник грузовой службы Целинной железной дороги в 1977–1992 гг.;



Фотография 2 [предоставлена автором].

Долгополов Константин Константинович (1955 год), начальник Целиноградской службы заказчика в 1966–1972 гг.;

Искаков Гафут Нурлыханович (1955 год), начальник отдела труда, заработной платы и техники безопасности Целиной железной дороги в 1977–1987 гг.;

Ширяев Анатолий Иванович (1961 год), заместитель начальника Алма-Атинской железной дороги в 1987–1992 гг.;

Джумабаев Серик Шагирович (1962 год), главный инженер службы электрификации и энергетики Алма-Атинской железной дороги в 1971–1977 гг.

Это далеко неполный список выпускников казахстанцев, обучавшихся в МИИТ в 30–60 годы прошлого века. Через строки этой статьи обращаемся к детям и внукам выпускников МИИТ с просьбой сообщить автору или в адрес редакции сведения о своих отцах и дедах, об их трудовой и научной деятельности.

О каждом из этих железнодорожников можно написать отдельную статью или даже книгу о самоотверженном труде, заложившем становление и развитие железнодорожной отрасли в Казахстане. В первую очередь в основе инженерных навыков этих людей

стоят знания, приобретенные в МИИТ, организаторские способности, заложенные в период прохождения производственных практик, работы в комсомольских организациях, студенческих строительных отрядах и, конечно, благодаря спаянной студенческой дружбе в эти полуголодные времена!

Как пример можно привести историю студенческой дружбы, заложенной в МИИТ в послевоенные годы, между Бектасовым Шахманом Абдрахмановичем, бывшим директором Алма-Атинского завода низковольтной аппаратуры, и доктором технических наук, профессором МИИТ Пупыниным Владимиром Николаевичем, бывшим заведующим кафедрой «Энергоснабжение железных дорог». Они учились в одной группе в МЭИИТ с 1945 по 1950 год, разъехались по распределению на разные станции, но всегда поддерживали связь друг с другом, консультировались по новшествам электроэнергетики. Свидетельством таких отношений, заложенных в прекрасное студенческое время, служит снимок (фотография 2), выполненный на Первомайской демонстрации 1947 года около Красной площади (друзья стоят рядом друг с другом). Более полувека они поддерживали тесные



отношения. Более того, при выборе профессии родным племянником, Шахман-ага настоял, чтобы тот выбрал специальность электровозника. Речь идет о родном племяннике Бектасова – Шманове Марате Шариповиче, который поступил в МИИТ на факультет «Электрификация железных дорог» в 1961 году, закончил его с отличием в 1966 году и был одним из первых инженеров-механиков электровозного хозяйства в Казахстане. Марат Шманов является одним из тех скромных инженеров, не отмеченных государственными наградами, но стоявших у истоков электрификации железных дорог Казахстана. Сотни таких примеров студенческой дружбы и последующего профессионального общения могут привести выпускники нашего института.

В последующие годы динамичного развития железных дорог Казахстана свою инженерную лепту в её развитие внесли выпускники МИИТ 1960–1990 годов: Шманов Марат Шарипович, Айдаркулов Каражан Ембергенович, Шуданов Орман Калымжанович, Молдасалиев Болатбек Асимович, Аяпов Умбет, Калмурзаев Мынуар, Коруспаев Камбар, Базилов Куаныш Рахимович, Дюсемалиев Болатбек Бекеуович, Примбетов Мукан, Калмурзаев Минуар Турсынбекович, Бекжанов Кабдолда, Джумабаев Марат Рахимберлович, Кангереев Тойкен Мусаевич, Досаев Бекболат, Кудербеков Малик Мырзагалиевич, Алтаев Нурлан Искендерович, Альмусин Дюсенбай Токимович, Жарилкаганов Мурат Утепбергенович, Узенбаев Мейрамалы Нускенович, Сагатов Ануарбек Сарсеневич, Байдаулетов Нуржан Талипович, Шоканова Николаевич, Ахметов Каипбек, Габдсаттаров Сагындык Габдель-Нагимович, Аманбаев Дуйсенбек Абдрамбаевич, Габдсаттаров Тилек Габдель-Нагимович, Закарин Алижан Токбанович, Уйкасбаев Алмасбек Есеналиевич, Сейтанов Сансызбай, Налибаев Кожамет, Габдсаттарова Уакиля Габдель-Нагимовна, Омаров Халжан Ташполатович, Байтаев Серик Измуханович, Котырев Батыр Куанышевич, Жакишев Ержан Темиргалиевич, Хон Александр, Аспаева Зубайда Абдралиовна, Аманчина Сания, Габдсаттарова Мадина Габдель-Нагимовна, Айдаркулов Кабак Каражанович, Ибраимбаев Жанат Сейфулович, Калмурзаев Тюльбас Минуарович, Артыкбаев Турарбек Куришбекович, Сабетов

Мухамбет Ануарбекович, Дарибаев Шынгыс Маратович, Утенов Асанхан и многие-многие другие инженеры.

Все эти выпускники с полным правом называли МИИТ своей Alma mater, давшей им путевку в профессию. При встречах выпускников они с трепетом и гордостью вспоминали ректоров института Кочнева Фёдора Петровича, Белова Ивана Васильевича, Иноземцева Владимира Григорьевича, Лёвина Бориса Алексеевича, запомнившихся особенно требовательных преподавателей, ведущих кафедр МИИТ.

Отдельно хочу отметить еще некоторых выпускников МИИТ.

Жакишев Темиргали Жакишевич в 1954 году закончил факультет «Эксплуатация железных дорог», работал на Целинной железной дороге начальником грузовой службы, сын Жакишев Ержан в 1994 году закончил этот же факультет, принял эстафету от отца на Целинной железной дороге, а затем в национальной компании Қазақстан темір жолы. Сын Ержана Жакишева, Мерас, сейчас студент пятого курса института управления и цифровых технологий, находится на эксплуатационной практике и в 2024 году планирует продолжить трудовую династию Жакишевых на железной дороге. Внук Темиргали-ага по дочери Кадыров Айдар закончил МИИТ в 2018 году, сейчас работает в Москве в АО «Объединенная транспортно-логистическая компания – Евразийский железнодорожный альянс» (ОТЛК ЕРА).

Айдаркулов Каражан Ембергенович, выпускник инженерно-экономического факультета МИИТ 1966 года, долгое время работал в локомотивных депо ст. Эмба, ст. Челкар, в управлении Западно-Казахстанской железной дороги, его сын Айдаркулов Кабак Каражанович закончил МИИТ в 1991 году по редкой для Казахстана специальности «Локомотивостроение», сейчас тоже работает на железной дороге.

Калмурзаев Минуар Турсынбекович, выпускник эксплуатационного факультета МИИТ 1966 года, долгое время работал на управленческих должностях на Казахской, Алма-Атинской железных дорогах, в последние годы – первым заместителем начальника Алма-Атинского отделения дороги. Его сын Калмурзаев Тюльбас закончил МИИТ в 1991 году, работал в системе АО «НК «Қазақстан темір жолы», его сын

Калмурзаев Самир и невестка Калмурзаева Диана закончили МИИТ в 2015 году, второй сын Минуар – в 2020 году, племянники Калмурзаев Бекнур и Калмурзаев Рустем – соответственно в 2019 и 2020 годах.

Байдаулетов Нуржан Талипович, выпускник МИИТ 1986 года, трудовую деятельность начал 1986 году составителем поездов, дежурным по станции Экибастуз Целинной железной дороги. В разные годы занимал должности начальника Павлодарского отделения дороги, начальника Акмолинской железной дороги, директора департамента железнодорожного транспорта Министерства транспорта и коммуникаций Республики Казахстан, вице-министра транспорта и коммуникаций Республики, председателя Совета директоров АО «НК «Қазақстан темір жолы». С супругой, Шоқановой Карлыгаш Садыковной, тоже выпускницей МИИТ, они познакомились и создали семью именно в годы совместной учебы в институте.

Только из одной семьи директора железнодорожной школы Габдсаттарова Габдель-Нагима и учительницы Габдсаттаровой Турсын с далекой от Москвы станции Шубар-Кудук Актюбинской области в разные годы поступили и закончили МИИТ по трем инженерным специальностям четверо их детей: Габдсаттаров Сагындык (1987 год), Габдсаттаров Тилек (1989 год), Габдсаттарова Уакиля (1992 год) и Габдсаттарова Мадина (1994 год).

После 2000 годов в ряды выпускников МИИТ влились Куанышева Айнур, Бакаева Айжан, Казимбетов Бауыржан, Ахметов Олжас, Казимбетов Ардак, Абдикеримова Гулбану, Акпан Бекет, Куанышева Нургуль, Бакаева Гаухар, Калмурзаев Самир, Калмурзаева Дина, Кадыров Айдар, Кадырова Салима, Чернай Алексей, Саликов Айтпай, Мукаев Биржан, Мукаев Ербол, Игембаев Рауан, Неходцев Илья, Аюпов Ерлан, Глеуханов Алмас, Мануилов Дмитрий, Малдынов Нурлан, Жуманов Жылкайдар, Бектас Нурсултан, Байджанов Мейрбек, Хамитов Дамир, Смагулов Адиль, Калмурзаев Бекнур, Кудиярова Жумагуль, Тургумбаев Арсен, Калмурзаев Рустем, Гусейнов Руслан, Жунисбек Олжас и многие другие.

Новая ветвь инженеров железнодорожников из МИИТ продолжает дело и традиции старшего поколения в развитии транспортно-логистического потенциала и становлении транспортного машиностроения независи-

мого государства. Многие из них успешно работают в совместных казахстанских организациях с участием таких крупных иностранных компаний, как General Electric, Alstom, Siemens, Wabtec, Talgo, China Cosco Chipping, ОТЛК ЕРА и др.

Среди профессиональных учёных считается, что Alma mater – это не только институт, в котором они обучались, но и тот, где они начинали и развивали свою научную деятельность. МИИТ был и является по сей день кузницей научно-педагогических кадров, поэтому своей Alma mater считают институт и научные специалисты, закончившие аспирантуру и докторантуру, защитившие в научных советах кандидатские и докторские диссертации. Многие выпускники института после получения инженерных дипломов, проработав на производстве, затем поступали в аспирантуру МИИТ для развития своей научной квалификации.

В советский период на казахстанских железных дорогах вся научно-исследовательская, проектно-изыскательская деятельность осуществлялась под кураторством или с участием всесоюзных НИИ. На трёх казахстанских железных дорогах инженерные и исследовательские работы велись сотрудниками дорожных проектных институтов и проектно-конструкторских бюро. Более значимые проекты, например, организация эксплуатации тяжеловесных поездов на участке Экибастуз – Целиноград в 1985–87 годах осуществлялась под руководством учёных из Москвы. Систему управления, тяги, процессов торможения в этих поездах разрабатывала и участвовала в первой поездке супертяжеловесного поезда весом 43 тысяч тонн (длиной 6,5 км) 19 февраля 1986 года со ст. Экибастуз группа учёных ВНИИЖТ и МИИТ под руководством ректора МИИТ д. т. н., профессора В. Г. Иноземцева. Эти научные эксперименты и общение учёных в процессе испытаний подстегивали местные инженерные кадры на развитие собственного научного потенциала. Первым подал такой пример бывший начальник Целинной железной дороги Исингарин Нигматжан Кабатаевич, подготовивший и защитивший диссертацию на соискание кандидата экономических наук под руководством профессоров МИИТ Дмитриева В. А. и Шишкова А. Д.

Острая необходимость в широкой и качественной подготовке научных кадров



высшей квалификации возросла с открытием в 1976 году Алма-Атинского института инженеров железнодорожного транспорта (АЛИИТ). Возрастающие грузовые и пассажирские перевозки на трёх казахстанских дорогах, координация взаимодействия на стыках с соседними дорогами требовали соответствующих научных исследований и рекомендаций. Обучением студентов в институте должны были заниматься подготовленные научно-педагогические специалисты с соответствующими учёными степенями, которых катастрофически не хватало в Казахстане.

Поэтому в рамках целевой программы подготовки кадров и договоров между МИИТ и АЛИИТ в 1970–1980 годы от Республики были направлены, прошли обучение и защитили кандидатские диссертации: Нурумов Алданыш, Шилина Галина, Сабетов Ануарбек, Оспанов Болат, Мауленов Онласын, Бурамбаева Айгуль, Нургалиев Рамазан, Кукеев Мурат, Кленов Владислав, Малгаждаров Амангельды, Хасенов Серик, Сокаев Владимир, Игин Валерий, Сарбаев Сугирали, Кобжасаров Болат, Бекжанова Сауле, Исмагулова Саракуль, Кабакбаев Сатпай, Христовская Елена, Жардемов Болат, Шуданов Сержан, Аскаров Жаксылык, Куразов Анархан и автор этих строк.

Примечательно, что только от Актюбинского филиала АЛИИТ в аспирантуре МИИТ в период с 1982 по 1992 год учились более 12 человек и это благодаря усилиям директора филиала, выпускника аспирантуры МИИТ 1980 года Сабетова Ануарбека Сабетовича.

В период с 1995–2000 годы в МИИТ после обучения в очной докторантуре в различных диссертационных советах казахстанцами были защищены четыре докторские диссертации (Куанышев Б. М., Жардемов Б. Б., Омарбеков А. К., Игин В. Н.). В диссертациях рассматривались различные актуальные научные проблемы железнодорожной отрасли Казахстана, начиная от исследований моделирования процесса отказов и восстановления оборудования подвижного состава в реальных условиях эксплуатации, факторного планирования для определения норм и границ регулирования расхода топлива на базе стохастической оптимизации номинального расхода топлива на тягу поездов до анализа состояния железнодорожных станций и узлов на устойчивость процессов

самоорганизации и управления в структуре развивающихся железнодорожных станций и узлов.

Отдельно необходимо рассказать о выпускниках, закончивших МИИТ, поработавших на железной дороге, затем вернувшихся в Alma mater для получения научной квалификации. Речь идет о д. э. н., профессоре Нурумове Алданыш Арыстангалиевиче, выпускнике инженерно-экономического факультета (1965 год), аспирантуры (1973 год), к. т. н., доценте Шуданове Сержане Ормановиче, выпускнике строительного факультета (1994 год), аспирантуры (1997 год). Отец Сержана – Орман Калымжанович тоже закончил МИИТ в 1969 году, прошёл путь в путешествии от бригадира, мастера до начальника дистанции пути ст. Челкар Западно-Казахстанской железной дороги и проработал начальником ПЧ 28 лет до выхода на заслуженный отдых. За свой труд на магистрали был награждён орденами Трудового Красного Знамени, Знак Почёта, рядом медалей, знаком «Почётный железнодорожник». Очень примечательно, что сын продолжил плеяду МИИТовцев на новом уровне.

Такая замечательная аура была в МИИТ, что здесь молодые люди встречались, дружили, влюблялись и создавали семьи. Так приехавшие в аспирантуру из Актюбинска Сокаев Владимир Тембулатович и Джумок Лариса Михайловна из Иркутска поженились, защитились и поехали по распределению в Актюбинский филиал АЛИИТ.

Мне, проходившему научную стажировку, обучавшемуся в очной аспирантуре и докторантуре, работавшему в МИИТ в период с 1986 по 1998 годы, тоже вспоминаются имена моих наставников, которые дали мне путёвку в науку и определили направление научной деятельности. Это д. т. н., профессор Исаев Игорь Петрович, зав. кафедрой «Электрическая тяга», д. т. н., профессор этой же кафедры Горский Анатолий Владимирович, его ученик, д. т. н., профессор Воробьев Александр Алексеевич. Докторскую диссертацию я защищал в новом, организованном в 1998 году диссертационном совете 08.00.28 «Организация производства (технические науки)» под председательством Лёвина Борис Алексеевича. Со стороны учёного сообщества МИИТ мне было оказано большое доверие представлять первым научную работу на этом совете.

Мои дочери, естественно, тоже учились в МИИТ: Куанышева Айнур закончила эксплуатационный факультет, Куанышева Айгуль закончила школу-гимназию МИИТ и поступила на инженерно-экономический факультет. Моя супруга, Куанышева Жаныл, в период моего обучения и работы в МИИТ работала в отделе кадров профессорско-преподавательского состава института.

Трое молодых людей из Казахстана (Куанышева Айгуль, Куанышева Нургуль, Акпан Бекет) в 2008 году поступили в организованную в 2003 году школу-гимназию МИИТ (директор Логинова Галина Ивановна), по итогам выпускных экзаменов в гимназии поступили в МИИТ. В последующем двое из них с отличием закончили институт и работают в железнодорожной отрасли.

Отдельно хочется написать о сотрудничестве в постсоветский период между МИИТ и Казахской академией транспорта и коммуникаций (КазАТК) в подготовке научно-педагогических кадров. В соответствии с договором о научном сотрудничестве между двумя учебными заведениями в период 2006–2019 годов в МИИТ в очной аспирантуре и магистратуре обучались более 50 человек. Только в 2006–2010 годах в МИИТ в очную аспирантуру были направлены от КазАТК 17 человек, из них 14 аспирантов успешно защитились в установленные сроки. Кропотливая работа по обучению, выполнению научных работ с завершением диссертационных исследований состоялась благодаря контролю и неустанной поддержке казахских аспирантов лично со стороны ректора МИИТ профессора Б. А. Лёвина и заведующих специализированными кафедрами.

Темы диссертационных исследований затрагивали вопросы состояния анализа надёжности, безопасности движения поездов, оптимальной эксплуатации пути и подвижного состава, устройств автоматики, СЦБ, сигнализации и связи с учётом цифровизации отрасли и многие другие научные вопросы на

примере технических устройств и хозяйств железнодорожных предприятий Казахстана.

С целью расширения сотрудничества в 2015 году, в рамках международной академической мобильности, между двумя вузами был подписан договор о двухдипломной подготовке магистрантов. Студенты старших курсов КазАТК, обучавшиеся по взаимно согласованным учебным планам в Алматы, проучившись один семестр в Москве и защитив магистерские диссертации на соответствующих специализированных кафедрах, получали дипломы МИИТ. К сожалению, тесные связи между двумя вузами были несколько сокращены в связи с приватизацией КазАТК. Надеюсь, что необходимость для отрасли в квалифицированных кадрах требует продолжения этого сотрудничества.

В Казахстане есть большая категория людей, которые получив профессиональные научно-технические знания и воспитание в МИИТ, стали грамотными инженерами и учёными, продолжают трудиться на благо отрасли. Эти базовые знания позволили многим из них достичь профессионального и карьерного роста. Высокое звание выпускника МИИТ накладывает на всех огромную ответственность при выполнении профессиональных обязанностей и наделяет гордостью при достижении результатов. В душе каждого из них теплится огонек, зажженный в Alma mater, который бережно хранится в памяти и передаётся следующему поколению казахстанцев-железнодорожников.

От имени выпускников-казахстанцев – миитовцев всех поколений хочу выразить глубокую благодарность здравствующим нашим наставникам из МИИТ, помянуть ушедших из этой жизни учителей. Светлая память о них живет в сердцах и в памяти десятка тысяч их учеников из Казахстана.

Нынешнему поколению руководителей, профессорско-преподавательскому составу, сотрудникам, студентам нашей Alma mater хотелось бы пожелать успехов и процветания в воспитании нового поколения МИИТовцев! ●

Информация об авторе:

Куанышев Бакытжан Муханбетович – доктор технических наук, профессор, научный руководитель проекта ТОО «Инжиниринговый центр КазАТК», Астана, Республика Казахстан, Kazproftrans@gmail.com.

Статья поступила в редакцию 06.09.2023, одобрена после рецензирования 23.10.2023, принята к публикации 27.10.2023.





ОБЗОРНАЯ СТАТЬЯ

УДК (09):656.23:656.25

DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-6-17>

С. Ю. Витте – создатель теории железнодорожных тарифов. Часть 2.

*Дмитрий Юрьевич Левин*

АО «НИИАС», Москва, Россия.

✉ levindu@yandex.ru.

ДМИТРИЙ ЛЕВИН

АННОТАЦИЯ

Ровно 140 лет назад вышла первая публикация самой известной, на наш взгляд, работы Сергея Витте «Принципы железнодорожных тарифов по перевозке грузов». Переоценить значение этой книги сложно. Наш постоянный автор, известный ученый, доктор технических наук, академик Российской Академии Естествознания Дмитрий Левин решил поделиться своими мыслями после нового прочтения этой работы, которая до сих пор не утратила своей актуальности. Энциклопедические взгляды С. Ю. Витте могут представлять интерес, как для экономистов, так и для социологов, философов, науковедов, специалистов по теории государственного управления. Многие суждения С. Ю. Витте не утратили своего научно-теоретического и практического значения до сего дня и в этом смысле оказались пророческими. Они относятся и к конкуренции железнодорожного транспорта с водным и наземным (тогда – гужевым, но сейчас легко подставить на его место автомобильный), к необходимости четкого соотношения любых экономических моделей с национальными интересами, требованиями кон-

кретного исторического этапа, пагубности слепого использования заимствованных извне схем без учета социально-политического и экономического контекста.

Собственно методология построения цен на перевозку грузов, изложенная С. Ю. Витте, представляет не только исторический интерес (особенно вкупе с рецензиями и дискуссиями, сопровождавшими появление его книги), но сохраняет свое значение и для современного решения вновь вставших вопросов совершенствования тарифной системы в условиях перехода к рынку. Не в последнюю очередь она связана с кардинальным вопросом, вставшим уже тогда: должны ли быть железные дороги естественной монополией или коммерческой структурой, – споры о чем продолжаются и сегодня.

В этом номере публикуется вторая, завершающая часть статьи, в которой приводятся и собственные заключения и предложения автора по поводу возможной трансформации идей С. Ю. Витте к решению современных транспортно-тарифных проблем.

Ключевые слова: С. Ю. Витте, железная дорога, грузовые перевозки, железнодорожные тарифы.

Для цитирования: Левин Д. Ю. С. Ю. Витте – создатель теории железнодорожных тарифов. Часть 2 // Мир транспорта. 2023. Т. 21. № 6 (109). С. 146–158. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-6-17>.

Полный текст статьи на английском языке публикуется во второй части данного выпуска.
The full text of the article in English is published in the second part of the issue.

Действующие тарифные системы С. Ю. Витте подразделял на две категории. Одну он назвал «исторической», предусматривающей различную провозную плату в зависимости от расстояния и веса (или объема) для различных наименований товаров, т. е. менее ценным товарам соответствует меньшая провозная плата. Другую систему назвал «натуральной», не зависящей от наименования товаров, в которой провозная плата определяется в зависимости от расстояния и плотности товара.

О глубоком знании предмета свидетельствует замечание С. Ю. Витте: «Система «натуральных» тарифов оказалась не только непрактичной, но еще создала род спекуляции. Так как упомянутая система определяет провозную цену поштучно (со 100 кг), по полувагонно (с 5000 кг) и повагонно (с 10000 кг), безразлично, какой бы товар ни грузился, и так как провозная цена для поштучных отправок выше, нежели для полувагонных, а для полувагонных выше, нежели для вагонных, то в результате дело отправки массы товаров перешло в руки комиссионеров и экспедиторов. Комиссионеры собирают от производителей и владельцев грузов их отправки, формируют из этих отправок партии товаров и затем отправляют собранные товары по полувагонным и по вагонным тарифам».

Повагонные тарифы «исторической» системы, неумело установленные, также дают некоторое поле для спекуляции комиссионеров, но поле это несравненно уже, так как в этих тарифах допускается повагонная отправка товара только одного рода, точно обозначенного в самом тарифе, вследствие чего комиссионеры уже лишены возможности делать смеси всевозможных предметов.

Рассматривая влияние эксплуатационных расходов на провозную плату, Витте отмечает, что оно довольно значительно. Часто собственный интерес железной дороги вызывает желание уменьшать провозные цены. Вообще производство не может продавать свои товары дешевле себестоимости, но, тем не менее, на практике можно видеть исключения из этого правила. На это идут, когда убыток от понижения против стоимости производства окупается или, несомненно, окупится в ближайшем будущем доходом по другой статье перевозки. Такие примеры с мылом, свеклой, вином и углем были приведены ранее. Такие действия железной дороги могут принести пользу торговле и промышленности без какого-либо вреда для ее интересов.

Сергей Витте выражал несогласие, что провозная плата должна соответствовать эксплуа-

тационным расходам, и настаивал, что она должна регулироваться по спросу и предложению, но не должна быть ниже расходов производства. Тем более, что эксплуатационные расходы, вызываемые перевозкой товара по данному тарифу, не известны.

Витте как выразитель идей реалистической экономии четко выделил три господствующие в то время школы: классическую политическую экономию, школу реалистической экономии и социалистической экономии, отдав явное предпочтение реалистической, или национальной, экономии. Одновременно он подверг критике односторонность или ошибочность других направлений.

Выделяя преимущества реалистической школы, С. Ю. Витте высказывает четыре связанных между собой и дополняющих друг друга соображения.

Первое. Он считает классическую школу «космополитической», поскольку она напрямую связывает человечество и отдельного индивида и придает своим законам физический или надобщиственный характер. При этом «она упускает из виду, что между отдельным человеком и человечеством существует еще особая экономическая единица – нация. Эта единица представляет собою нечто органически целое, связанное верою, отдельностью территории, кровью, языком, литературою и народным творчеством, нравами и обычаями, государственными началами и учреждениями, инстинктом самосохранения, стремлением к независимости и прогрессу и проч. Единицы эти не выдуманы людскою фантазией или капризом, а сложены исторически, самою природой и законами общежития. Они составляют необходимое условие общечеловеческого развития».

Второе. В соответствии с данным тезисом реалистическая экономия иначе, чем классическая школа, трактует открытые ею законы, в том числе закон спроса и предложения. «Реалисты не возводят закона спроса и предложения в закон физический, а оставляют за ним то значение, которое он имеет в действительности, то есть значение экономическое. Они указывают на то, что закон этот не есть следствие мироздания, а существующей организации человеческих обществ. Поэтому реалисты признают возможность видоизменений в проявлениях закона спроса и предложения сообразно различным особенностям общественной организации».

Третье. При такой трактовке экономических законов реалистической школой «характеристическая научная ее черта заключается в признании ею относительности организации народного хозяйства, которая должна сообразоваться со временем, местом и всеми социальными



условиями данного общества». В других работах Витте уточняет наименования отдельных исторических стадий, но четко фиксирует их последовательную связь. В развитии хозяйства современных культурных народов «замечается та закономерность, что все эти народы, начав со ступени звероловов, постепенно пережили следующие стадии развития; быт пастушеский; так прекрасно изображенный в Библии; быт земледельческий, всегда связанный с развитием ремесел; и быт промышленно-торговый, характеризующийся развитием мануфактур, фабрик, заводов и сильным расширением внутренней и внешней торговли».

Четвертое. Как итог, в отличие от теории ценности (стоимости), которая классической школой рассматривается как основание всех ее доктрин, реалистическая, или национальная, экономия выставляет на первый план теорию производительных сил. В соответствии с этим расходы на образование, правосудие и оборону рассматриваются здесь как производительные, ибо, по мнению Фридриха Листа, «уничтожение ценностей производится на пользу усиления производительных сил».

Рассмотренные положения дают надежный ключ к объяснению действий и решений, принимавшихся Витте, позволяют проследить их связь с основами его экономических воззрений. К этому необходимо добавить еще одну отличительную черту его взглядов – осознание особенностей и методов государственного регулирования экономики вообще и в России в особенности. Такое понимание во многом связано с присущей ему приверженностью к просвещенной монархии и механизму осуществления стоящих перед ней задач.

Сергей Витте как сторонник государственного регулирования экономики, выступая против установок классической школы на полное невмешательство государства в экономическую жизнь граждан, одновременно высказывается и против проповедуемого школой государственного социализма порабощения людей во имя защиты их прав на известное материальное благосостояние.

Применительно к России Сергей Юльевич придерживается достаточно строгой логики, связанной с его предшествующими рассуждениями об этапах экономического развития народов. То, что хорошо в одних условиях, может оказаться опасным и вредным в других. «История указывает, – подчеркивает он, – что последовательный переход наций до последней из указанных стадий их развития совершается лучше всего посредством свободной торговли с нациями более культурными, но установление в стране более или менее совершенной ману-

фактурной промышленности, создание значительного национального флота и развитие всемирной торговли нигде не достигалось и не может быть достигнуто иначе, как посредством государственного содействия. Это содействие и выражается установлением протекционистской системы, заключающейся в таможенных пошлинах, различных премиях и т. п. Без протекционистской системы еще ни одна страна не переходила из земледельческого состояния в состояние значительного развития мануфактурной промышленности, национального флота и всемирной торговли».

Здесь реализуется описанный выше принцип (применительно к закону спроса и предложения), в соответствии с которым экономические законы действуют не в общей, абстрактной, форме, а с учетом конкретно-исторических условий, особенностей этапа развития страны. Свои рассуждения С. Ю. Витте подкрепляет ссылками на опыт других стран и анализом особенностей России, которая в силу масштабов ее территории, многонационального и разнородного состава населения, преимущественно земледельческого этапа развития требует четкого государственного регулирования экономики.

Витте считал невозможным основывать железнодорожные тарифы иначе, как на законе спроса и предложения, управляющем всеми экономическими отношениями. Для подтверждения этого тезиса он проанализировал учения существующих тогда научных экономических школ, как он объяснил, «чтобы избежать всяких недоразумений и возможно определеннее и всеобщее обрисовать нашу общую точку зрения на тарифный вопрос».

Далее он высказывает мысль, которая и сегодня актуальна: «Начала, уясненные классической школой, должны получать в каждой национальности видоизменения, соответствующие ее национальным особенностям. Вот почему в Германии политическая экономия называется национальной экономией, которая и служит предметом преподавания в высших учебных заведениях. До тех пор, покуда русская жизнь не выработает своей национальной экономики, основанной на индивидуальных особенностях русского грунта, до тех пор мы будем находиться в процессе шатания между модными учениями, увлекаясь поочередно то одним, то другим; до тех пор мы будем слышать из одних и тех же уст и читать на столбцах одних и тех же органов логически несовместимые экономические суждения и проекты; до тех пор, что создано вчера, будет считаться дурным завтра, и будет создаваться сегодня то, что уничтожено вчера; и понятно, что до тех пор мы не будем

жить правильною экономическою жизнью, а будем идти на буксире заграничных веяний и всяких спекуляций за счёт народного благосостояния».

Подчиняя железнодорожные тарифы действию закона, С. Ю. Витте не исключал, как проявление свободы, так и государственный контроль. Государственный контроль необходим для наблюдения за точным исполнением тарифных законоположений, предупреждения злоупотреблением и устранения тарифов, которые не соответствуют «общему благу».

Свобода железнодорожных тарифов должна контролироваться путем гласности, которая обеспечивает наибольшие гарантии против возможных злоупотреблений. Для осуществления контроля необходимо, чтобы тарифы были легко доступны. Тарифы русских дорог в то время были разбросаны в массе отдельных изданий, которые вместе составили бы десятки томов.

Витте предлагал печатать тарифы до их введения в действие, а те из них, которые повышают провозную плату, – по возможности заблаговременно, не позже как за месяц до введения их в действие. Тарифы должны публиковаться в определенных изданиях; о том, где и какие именно тарифы публикуются, должно быть объявлено публиче.

Для того, чтобы определить направление развития железнодорожных тарифов «в интересах общего блага при эксплуатации русских железных дорог казною», С. Ю. Витте сначала выясняет вопрос: полезна ли казенная эксплуатация железных дорог в России? Прежде рассматривается зарубежный опыт эксплуатации железных дорог.

В Америке и Англии все дороги находятся в частных руках. Во Франции делались попытки казенной эксплуатации, но в последние годы, после всестороннего обсуждения вопроса в парламентах и прессе, остановились на status quo, т. е. частной эксплуатации, за некоторыми, и вероятно временными, исключениями. В Италии существовала и существует частная и казенная эксплуатация. Одно время решились было на общий выкуп железных дорог, но так как эта решимость вызвала протесты в обществе и парламентской комиссии, то дело также остается в прежнем положении. В Германии в последние годы почти все дороги выкуплены и эксплуатируются казною. Операция эта была сделана преимущественно из-за политических целей объединения юной Империи в то время, когда благодаря французской контрибуции государство располагало значительными финансовыми ресурсами. Время для выкупа было выбрано весьма удобное, когда, вследствие временного торгового кризиса, последовавшего за Франко-

Прусской войной, доходность частных дорог значительно упала и когда деньги значительно подешевели, сравнительно с тем временем, когда строились дороги. Многие казенной эксплуатацией недовольны, но многие находят в ней некоторые выгоды. Недовольным является преимущественно торговое сословие, сторонниками же её – преимущественно землевладельцы и чиновники. На мнении последних основываться довольно трудно: «Все, начиная от низших агентов и кончая министром Майбахом, убеждены в невыгодности для страны казенной эксплуатации, но будут говорить и проповедовать то, чего желает Бисмарк». Другие железнодорожные германские специалисты благоприятно отзывались о казенной эксплуатации.

В Австрии в те годы некоторые частные дороги были выкуплены. Но многие дороги все-таки эксплуатируются частными обществами. Публика мало верит в успешность эксплуатации казной. Большинство железнодорожных специалистов уверено, что правительственная эксплуатация у них не может иметь будущности. В Бельгии железные дороги эксплуатируются казной и дают удовлетворительные результаты. В других странах железные дороги эксплуатируются преимущественно частными обществами. Но иногда делают опыты казенной эксплуатации. В этом отношении курьезен опыт Румынии. Она выкупила часть железных дорог, но так как там чуть ли не ежемесячно меняются министры, ведающие железными дорогами, а с ними вместе и часть высшего железнодорожного персонала, и так как казенная администрация находится под сильной ферулой австрийских банкиров, то из всей казенной эксплуатации выходит нечто вроде кукольной комедии.

Бисмарку принадлежит идея выкупа железных дорог в Германии, а мотивировка его идеи – это дело государственных канцелярий, специальность которых заключается именно в умении подбирать из складов аргументов те, которые говорят в пользу того, что доказывать приказано. «Это дало повод эту меру князя Бисмарка причислить к мерам социалистическим. Но едва ли не будет правильно причислять ее к практическим актам государственной политики великого человека, сообразованным с действительностью и наличными обстоятельствами страны, им управляемой».

«С точки зрения русской действительности, вопрос о казенной или частной эксплуатации в то время в печати всесторонне не обсуждался, если не считать некоторых газетных статей, написанных по этому предмету, значительная часть которых действует ораторскими сопоставлениями и приемами больше на чувство, нежели на разум.



Впрочем, следует иметь в виду, что рассматривать обстоятельно такой обширный вопрос в газетных статьях невозможно. Это скорее дело специальных журналов и отдельных изданий».

«В произведениях авторитетов классической политической экономии очень мало говорится о железных дорогах, тем более о том, кем они должны эксплуатироваться».

«Социалисты всех оттенков не допускают эксплуатации железных дорог частными обществами». «Реалистическая школа учит, что принятие тех или других мер в области народного хозяйства должно зависеть от места, времени и совокупности всех обстоятельств дела».

«Не подлежит никакому сомнению, что казенная эксплуатация русских железных дорог принципиально желательна, ибо русское государство в принципе в эксплуатации железных дорог не может преследовать никаких других целей, кроме целей русского общего блага». «Но при существующих условиях русского общегосударственного управления железными дорогами казенной едва ли может совершаться успешнее, нежели частными обществами, под деятельным контролем правительства. При наличии этих условий в особенности нельзя признать полезным, за некоторыми исключениями, немедленное водворение казенной эксплуатации, связанное с финансовыми жертвами».

Проблему железнодорожных тарифов Сергей Витте рассматривал на широком фоне экономических процессов и социально-экономических явлений, происходивших в стране, а саму теоретическую разработку тарифных вопросов – как взаимодействие элементов экономической, политической и даже умственной жизни народа». Тарифы, утверждает Витте, должны регулироваться на основании провозных цен, складывающихся под воздействием закона спроса и предложения. При этом он исходит из широко признанного в экономической науке того времени положения, что цена всякого предмета и всякой услуги (в данном случае железнодорожного тарифа) определяется этим законом товарного производства, действующим на рынке в сфере товарного обмена. Спрос – представленная на рынке потребность в товарах, и предложение – «продукт, который находится на рынке или может быть доставлен на него» – две основные категории рынка, категории обмена, выступающие регуляторами рыночных цен; на железнодорожном транспорте функцию цены выполняют тарифы («платежи за услуги»), которые в свою очередь выступают как один из элементов рыночной ценности товара и должны находиться «в рациональном отношении к совокупности всех прочих элементов».

С. Ю. Витте выступил в печати тогда, когда возможности железнодорожного транспорта еще только формировались, поскольку недалеко еще было время, когда железных дорог в России вообще не существовало. Однако он уже тогда понимал, что «монополия видоизменяет, но не уничтожает действия закона спроса и предложения», что этот закон оказывает регулирующее воздействие и в условиях монополии. С другой стороны, не исключая образования монополии железных дорог, Витте подчеркивал, что она «не безгранична, не абсолютна, не представляет собой полную монополию» поскольку сохраняют свои преимущества, а в отдельных случаях и незаменимость, гужевые перевозки и особенно водные и морские пути сообщения, так что конкуренция между различными видами передвижения сохраняется. Иными словами, монополии может быть положен известный предел, поскольку гужевые и водные пути могут при известных обстоятельствах конкурировать с железными дорогами. В частности, гужевой извоз выступал тогда ограничителем роста железнодорожных тарифов на малых расстояниях, особенно вокруг крупных центров (к примеру, между Петербургом и близлежащими городками и селениями гужевой транспорт «прощетал»); «громадную конкуренцию» представляли водные пути сообщения («при сплаве судоходстве» вследствие его дешевизны железнодорожное сообщение не выдерживает конкуренции) и особенно «морское сообщение» по отношению к такой категории товаров, как «общие грузы как для железных дорог, так и для водных путей». Отсюда необходимо «изучать все условия передвижения товаров по конкурирующим путям». Однако, подчеркивает Витте, даже на первоначальной стадии становления естественной монополии железных дорог существует ограниченность воздействия конкуренции в этой сфере в отличие от «свободной промышленности», «подверженной, безусловно, полному влиянию конкуренции производителей».

Сложная структура транспортной системы, построенная на взаимной конкуренции, нуждалась в общем регулировании со стороны государства, в первую очередь необходимо было выработать экономическую политику в отношении железнодорожного транспорта как новой, исключительно перспективной транспортной структуры. Вопросами эксплуатации железных дорог в России стали заниматься лишь с первой половины 70-х годов XIX века. Поэтому такое значение имела «первая попытка систематического изложения на русском языке главнейших начал, лежащих в основе железнодорожного тарифного дела», теоретическая разработка

тарифных вопросов. Это исследование Витте надлежит, очевидно, рассматривать в общем русле освоения категорий рыночного хозяйства и применения их для анализа экономических процессов, происходивших в конце XIX века в России, и выработки соответствующей экономической политики, поэтому естественно, что в своей книге он высказал ряд идей, получивших впоследствии развитие и практическое применение в государственной деятельности. Отсюда понятно, почему, казалось бы, узкий и специальный вопрос С. Ю. Витте трактуется как «в высшей степени интересный предмет для изучения и мыслителя, и экономиста».

В книге рассмотрены различные экономические категории, в которых выражаются услуги железных дорог («железнодорожной промышленности»), которые не производят предметов (товаров), а лишь устраняют «преграды расстояния», служат для «перемещения товаров из одного места в другое» – чистый доход (разность между валовым доходом и расходами эксплуатации); возможная цена товара – цена, приближающаяся к предельной, которую могут заплатить потребители, не только не сокращая, а, напротив, развивая потребление; расходы эксплуатации как низшая предельная величина тарифа; инерция спроса и ее воздействие на величину тарифа, и др. Особое значение для регулирования тарифов С. Ю. Витте придавал разности между ценами на товары в местах, откуда они отправляются, и существующими или возможными в тех местах, куда эти товары следуют. Именно этим разностям, создающим саму экономическую возможность передвижения товаров, и должны соответствовать тарифы. В книге анализируются различные аспекты воздействия изменения тарифов на хозяйственные процессы, в связи с чем подчеркивается важность исследования «для всякого рода товара способности увеличения размера его движения в зависимости от изменения провозных цен, способность распространения потребления товаров», включая анализ хозяйственного развития прилегающих территорий, поскольку «интерес железной дороги заключается в развитии местных производств, имеющих будущее, ибо от развития этих производств зависит увеличение доходности железной дороги».

Касаясь, вопроса, широко обсуждавшегося в тот период в России, – в чьем ведении, в чей собственности должны находиться железные дороги, С. Ю. Витте настаивал на необходимости государственного вмешательства, полагая, что оно должно расширяться и в перспективе привести к полной передаче железных дорог государству. Но, в тот конкретный период от

этого шага его удерживало «бюрократическое начало как ослабляющий фактор государственного управления по сравнению с частными интересами», бюрократическая традиция», чреватая опасностью «неудачного опыта правительственной эксплуатации», ибо «бюрократическая машина волеет все железнодорожное хозяйство в те формы, которые ей покуда преимущественно известны, совсем независимо от того, насколько эти формы соответствуют железнодорожному хозяйству». В связи с этим он поднимает вопрос о «пределах казенного хозяйства», приводя исключительной важности слова Д. И. Менделеева, что «правильный ход дела» состоит в том, чтобы «возбуждать частную инициативу и уметь в интересах казны и для пользы всей страны пользоваться плодами частной деятельности». Особенно подчеркивал С. Ю. Витте колоссальную опасность «фатальной веры в бюрократизм», царящий в обществе.

Поставив вопрос о пределах казенного хозяйства и широком вмешательстве государства в экономическую жизнь, признавая, что государственное вмешательство способно лишь ограничить сферу действия экономических законов, Витте вслед за Д. И. Менделеевым считает, что «вопрос заключается в том, где и когда эта помощь может переходить в казенное хозяйство». Для него ясно, что пока «не выработаны условия не только успешного, но хотя бы сносного казенного хозяйства, нельзя и помышлять о его расширении». В этих целях он предлагал различные пути, в том числе проведение «сравнения казенной и частной эксплуатации», тесную увязку интересов казны с выгодами участия в деятельности частных предприятий, развитие смешанных форм (арендных предприятий, остающихся впоследствии за казной) и даже устройство артелей для заведования предприятиями (в этом предложении сказались увлечения самобытными началами российской хозяйственной жизни). Развитию «промежуточных форм» он отводил значительную роль.

В результате Сергей Витте приходит к выводу, что все зависит от степени эффективности, что «вопрос заключается не в том, кто будет эксплуатировать железные дороги, а как будут их эксплуатировать». Он решительно против такой политики, когда «ради действий или слов одних корифеев западной науки или государственного управления мы отдаем народное хозяйство в руки частных лиц часто без надлежащих гарантий, затем, ради слов или действий других мы готовы отдать это хозяйство в казенное управление...».

Витте и в этой своей первой крупной работе постоянно подчеркивал приоритетную роль развития производительных сил. Будучи сторон-



ником протекционизма, он, тем не менее, утверждал, что «полезнее развитие, чем покровительство». «Существенно расходясь» со сторонниками свободы торговли, он полагал, соглашаясь с мнением Д. И. Менделеева, что «государство не может равнодушно смотреть на гибель народных промыслов, на ввоз массы ненужностей из-за границы, или на истощение производительных сил страны ростовщическими проделками». Ставя задачу вывести народное хозяйство на «путь естественного роста» и совершенствования органической его части – финансового оздоровления, он особо обращал внимание на невозможность «рассчитывать на улучшение наших финансов одними финансовыми мероприятиями» и этот принцип он неукоснительно проводил в жизнь в дальнейшем, находясь на посту министра финансов.

«Пути сообщения, кровеносные артерии организма страны» предполагают рассмотрение проблем железных дорог на широком фоне народнохозяйственного развития страны. И в этом вопросе С. Ю. Витте решительно выступал за то, «чтобы каждая национальность сохраняла всю свою независимость и всю свою силу...». Он справедливо полагал, что нельзя осуществлять хозяйственное развитие «без соображения с условиями почвы», т. е. российской действительности, и «простая ссылка на факты заграничной жизни не может иметь для нас значение аргумента». Витте подчеркивал, что «для придания нашему отечеству надлежащего экономического роста необходимо достичь возможности наиболее легкого распространения естественных богатств по всему обширному протяжению Империи, для чего необходимо расширить рынки сбыта, осуществлять повсеместное развитие производств, а существовавшие крайне низкие тарифы на дальние расстояния «непременно должны выйти из установившихся европейских норм».

Не приемля идеи развития страны по пути бездумного копирования западной модели, по мнению приверженцев которой русская жизнь не содержит никаких особых условий, а мыслить иначе – значит отрицать, утверждали они, западную науку и цивилизацию, Витте старается убедить в необходимости учитывать конкретные условия конкретной страны, ибо «история учит, что каждая нация развивалась своеобразно, согласно своим почвенным условиям и историческим предначертаниям». В этой позиции С. Ю. Витте нашли отражение его глубоко продуманные взгляды о «неразумном подражании» и ошибочности «непрятия во внимание всех различных условий быта и характера общественного и государственного строя, в частности, оценки исторических традиций и особенностей хозяйственной и социальной структуры

России, что, однако, не означало отрицания воздействия на социальную и экономическую жизнь страны происходящих перемен в мире. Но он решительно выступал против метаний российской экономической политики, когда «ради одних западных учений мы становимся на путь свободного обмена, убивая некоторые отрасли промышленности, затем ради других учений мы силимся возродить эти промышленности путем усиленного покровительства; ради одних западных примеров мы убиваем мелкое винокурение и монополизуем его в руках капиталистов, затем, ради других западных примеров, мы подрезаем монополистов для водворения мелкого винокурения; ради одних западных теорий тратим почти все наше золото на поддержание вехсельного курса» и т. д.

Витте раскрывает опасность «экономических шатаний в таком крупном хозяйстве, как русское народное хозяйство», которые могут подорвать его и довести «до степени рабской зависимости». Программа, избранная под влиянием «заграничных веяний и спекуляций», не может вывести «наше народное хозяйство на путь независимого процветания, – на путь естественного роста». Одну из причин сложившегося положения он связывал с «инертной силой подражания, охватывающей до сего времени русскую мысль». Намечая в качестве выхода из сложившегося положения общие линии, по которым должна развиваться экономическая политика, С. Ю. Витте в самых общих чертах формулирует такие меры, которые можно отнести к социальной рыночной политике, демократизации мирового сообщества. Он характеризует современный ему экономический мир как сочетание «борьбы против привилегий капиталов, свободы спекуляции, необеспеченности труда и паразитической жизни одних государств за счет производительных сил других». И особая роль в этих процессах отводится им государству. То, что классическая политическая экономия выступала за невмешательство в экономическую жизнь, естественно, никак не влияет на его позицию, хотя произведения этих экономистов он считал гениальными.

Взгляды классиков политэкономии он связывал с тем временем, когда основатели экономической науки писали свои выдающиеся произведения, поскольку тогда стояли иные задачи – задачи борьбы против феодальных привилегий и устоев, цеховых ограничений. Если бы великие основатели классической политической экономии жили в настоящее время, то, несомненно, писал С. Ю. Витте, в их произведениях по вопросу о сфере государственной деятельности были бы высказаны несколько иные соображения.

Что касается железных дорог, то они, с точки зрения Витте, по своей природе являются несомненно достоянием государства, что связано с «несоответствующими общему благу началами, присущими частной эксплуатации», поскольку «в принципе казенная эксплуатация может лучше осуществить общее благо, нежели частная». Но в настоящий период они переданы во временную эксплуатацию частными обществами на концессионных началах и их немедленная передача казне преждевременна.

Среди целей государственного регулирования Сергей Витте выделяет целый спектр задач – обеспечение государственных потребностей, защиту интересов слабых, принцип сохранения при конкуренции хозяйственных сил страны, в частности, уменьшение соперничества и возвышение доходности железных дорог и др. Причём, прибыль государства должна идти «на общее благо», под которым понимается в числе прочего покровительство торговле и промышленности, а также мероприятия, проводимые по отношению к неимущим. Например, понижение железнодорожных тарифов на определенные грузы предполагается распространить на предметы первой необходимости для массы населения.

Сравнивая казенное и частное хозяйство, С. Ю. Витте отмечает наряду с положительными их сторонами «неуклюжесть» первого (употребив термин Д. И. Менделеева), а для «частного крупного хозяйства», «направляемого без системы», опасность оторваться от насущных задач хозяйственного развития («в смысле необходимости придерживаться существующей почвы», понимая под «почвой» связь с реальной действительностью. Следует также отметить появление у С. Ю. Витте понятия системы, которое в современной литературе уже обрело формулу «система Витте»).

Репринтное издание «Принципов железнодорожных тарифов по перевозке грузов», принятое Петербургским университетом путей сообщений (профессором которого состоял С. Ю. Витте), содержит высокую оценку специалистами этого труда («фундаментальный», «оригинальный научный труд»). В частности, находит подтверждение трактовка С. Ю. Витте характера железнодорожного транспорта как естественного монополиста. В послесловии в книге С. Ю. Витте отмечается, что «техико-экономические расчеты показывают, что перевозка дешевых грузов (щебень, руда, уголь и др.) на большие расстояния – это сфера деятельности только федерального железнодорожного транспорта. Наличие и состояние шоссейных дорог, начертание водных путей в России и другие факторы говорят о том, что при перевозке мас-

совых грузов на большие расстояния железные дороги выступают как естественный монополист. При перевозке же дорогих грузов на небольшие и средние расстояния железные дороги выступают как коммерческая структура. Такой двуединый статус железнодорожного транспорта необходимо отразить в тарифной политике».

Стоящая ныне перед наукой и практикой железнодорожного дела задача совершенствования системы тарифов и выработки научно обоснованной тарифной политики предполагает возрождение всего ценного, что было накоплено как в дореволюционный – и здесь наряду с признанными авторитетами достойное место занимает С. Ю. Витте, – так и в послереволюционный периоды.

Однако значение книги Витте «Принципы железнодорожных тарифов по перевозке грузов» существенно шире узкоспециального. В ней затронуты многие аспекты экономической политики и собственно историко-экономической науки, высказаны мысли о принципах построения концепции хозяйственного развития, подчеркнута необходимость поиска решений в этой сфере, опирающихся на глубокое проникновение в существо хозяйственных и социальных процессов. Эта книга не только о железнодорожном транспорте как феномене экономической истории, но и исследование о том, какими путями следует строить экономическую политику в такой стране, как Россия. Это – книга не только специалиста, теоретика и практика железнодорожного дела. В ней осязательно ощущается государственный подход ко многим вопросам хозяйственного развития страны, видны контуры будущей государственной деятельности С. Ю. Витте.

Большой интерес, с точки зрения влияния тарифов на развитие экономики и конкуренции в России, представляет история введения и отмены так называемого Челябинского тарифного перелома.

Как известно, в конце XIX и начале XX веков в России осуществлялось большое железнодорожное строительство. Так, в 1896 году был сдан в постоянную эксплуатацию участок Челябинск–Омск–Новосибирск, в 1898 году – Новосибирск–Красноярск, в 1900 году – Красноярск–Иркутск.

Первоначально, когда эти линии, как правило до сдачи их в постоянную эксплуатацию, находились во временной эксплуатации провозная плата за перевозку сибирской продукции на Запад и Восток взималась отдельно за протяжение новостройки и отдельно за перевозку по действующим железнодорожным линиям. Учитывая, что на новостройках тарифы выше





общесетевых, применяемых на действующих линиях, сибирская продукция, особенно хлебные грузы, при ее вывозе не могла конкурировать с продукцией, производимой в центре страны и на мировом рынке. С введением этих сибирских железнодорожных линий в постоянную эксплуатацию, когда появилась возможность взимания платы по общему тарифу за все расстояние перевозки «без перелома» тарифа, создавались наиболее благоприятные условия для вывоза сибирской продукции, и в первую очередь излишков сибирского хлеба, на внутренний и международный рынок. В этом случае цена сибирского хлеба в Центре России с учетом транспортировки по железной дороге становилась дешевле, чем стоимость хлеба, произведенного в центрально-черноземной полосе (ЦЧП). В связи с этим землевладельцы ЦЧП обратились в Правительство с просьбой ограничить тарифными мерами вывоз хлеба из Сибири на Запад через Челябинск, а направить сибирский хлеб за границу другим путем.

В 1896 году после обсуждения на Тарифных Съездах в Тарифном Комитете просьбы землевладельцев центрально-черноземной полосы решением Тарифного Комитета был введен Челябинский тарифный перелом, при помощи которого стоимость перевозки возрастала по сравнению с нормальным тарифом примерно на 16 %, что конечно ограничивало конкурентные возможности сибирского хлеба на внутреннем (Центральной России) и международном рынках.

Его суть (Челябинского перелома) состояла в том, что провозная плата стала взиматься не за общее непрерывное расстояние из Сибири через Челябинск до станции назначения (внутри России или до границы), а за два отдельных расстояния из Сибири до Челябинска и от Челябинска до станции назначения. В этом случае стоимость перевозки возрастала, как уже указывалось ранее, на 16 % за счет дополнительной платы за начальную-конечную операцию. Это связано с тем, что

при определении платы за одно непрерывное расстояние в провозную плату включена стоимость только одной начально-конечной операции; при определении платы с «переломом тарифа» т. е. за два отдельных расстояния или за две перевозки в провозную плату включены две ставки за начально-конечные операции.

Одновременно с этим (Челябинским тарифным переломом) был введен пониженный тариф на перевозку сибирского хлеба в направлении Котлас и далее по Северной Двине в Архангельск. Цель этого тарифа – дать выход за границу сибирскому хлебу, чтобы он не снижал цены на внутреннем центральном рынке, ставшем монополией землевладельцев центральной черноземной полосы. Однако эти надежды не оправдались, поскольку перевозка сибирского хлеба в этом направлении, даже при наличии пониженного тарифа с учетом двух перевалок, оказалось очень дорогой.

Длительное применение этого тарифного режима ограничило поставку сибирского хлеба в западном направлении. Все это привело к тому, что в Сибири образовались громадные залежи зерна. В результате сложилась такая обстановка, при которой требовалось отменить применение Челябинского тарифного перелома. Общий Тарифный Съезд представителей русских железных дорог, состоявшийся в декабре 1910 года, высказался за отмену этого перелома. Он был отменен постепенно в период с марта 1911 года по 1 августа 1913 года. Начиная с этого времени тариф за перевозку хлеба из Сибири стал определяться за непрерывное расстояние от пункта отправления до пункта назначения по территории России. Таким образом, путь сибирскому хлебу на Запад, на внутренний и международный рынок с наибольшим благоприятствием был открыт.

Проблеме цены и установления тарифов на железных дорогах уделялось большое внимание с момента пуска первых дорог.

В дореволюционной России этой проблемой занимались такие видные ученые и практики железнодорожного транспорта, как А. И. Чупров, Д. И. Журавский, Н. Н. Петров, Ю. В. Ломоносов и другие. Трактат по тарифам был написан всемирно известным ученым Д. И. Менделеевым. Большое влияние на систему ценообразования на транспорте оказали взгляды С. Ю. Витте. Изучение основных положений его фундаментального труда поможет по-новому взглянуть на тарифы и современную тарифную политику.

В основу ценообразования на транспорте, как и в промышленности, положен закон стоимости. Согласно этому закону цена производимой транспортом продукции (услуги), т. е. изменения местоположения грузов, устанавливается в соответствии с количеством затраченного на это общественно необходимого труда. Однако ценообразование на транспорте в силу особенностей транспортной продукции имеет свою специфику, заключающуюся, прежде всего, в том, что цены имеют дифференциацию по родам грузов, по видам отправок, по расстояниям перевозки. При этом важно подчеркнуть, что наличие или отсутствие дифференциации тарифов находится в зависимости от характера транспортных предприятий и отношений между собственниками транспортных средств и собственниками перевозимых грузов.

В условиях централизованного управления экономикой тарифы являются монопольными ценами. Они устанавливаются государственным органом в виде строго фиксированной величины. Однако это не означает, что закон стоимости перестает действовать. Средний уровень тарифа не может безгранично повышаться, он, в конечном счете, ограничен действием закона стоимости. Формирование тарифов осуществляется по схеме «себестоимость перевозок плюс прибыль». Проблема заключается в том, какая себестоимость, и какая прибыль имеют место. Это зависит от методологического подхода определения общественно необходимых затрат труда (ОНЗТ) на транспорте.

В научной литературе рассматривались три концепции формирования ОНЗТ:

- 1) как средние в рамках всей транспортной системы;
- 2) как среднеотраслевые внутри каждого вида транспорта;
- 3) внутри каждого вида транспорта как дифференцированные затраты по отдельным регионам и отрезкам транспортной сети.

Поскольку для транспортной продукции нет общенационального рынка сбыта, и продукция различных видов транспорта неоднородна и, следовательно, экономически невязанная,

меняемая, то первая точка зрения на ОНЗТ несостоятельна.

Вторая точка зрения на ОНЗТ в свое время получила признание у целого ряда экономистов. Она реализуется на железнодорожном транспорте. Однако она вступает в противоречие с рыночными условиями хозяйствования.

Факторный анализ себестоимости перевозок грузов и других ценообразующих параметров позволяет сделать вывод, что более обоснована третья точка зрения. В связи с этим необходима территориальная дифференциация тарифов, а также дифференциация тарифов по другим признакам.

Для успешного функционирования и развития железных дорог, в том числе, необходимо возродить все полезное, что было накоплено в дореволюционный и послереволюционный периоды в деле формирования и регулирования тарифов, и на этой основе создать научно обоснованную тарифную политику.

В XIX веке важную роль в становлении и централизации тарифного дела сыграли Тарифные съезды, к практике которых можно вернуться ввиду того, что на них возможен деловой разговор работников железнодорожного транспорта с потребителями транспортной продукции и представителями других заинтересованных структур.

С мая 1998 года в разных городах России были проведены Тарифные съезды-конференции потребителей услуг, работников железнодорожного транспорта и представителей других структур.

Тарифные съезды провозгласили баланс интересов железной дороги, грузовладельцев и существовавшей в тот период Федеральной службы по регулированию естественных монополий на транспорте (ФСЕМТ). В связи с этим основные принципы формирования тарифов, изложенные С. Ю. Витте, вновь приобретают важное теоретическое и практическое значение. Эти принципы применимы в рыночной экономике, когда железнодорожный транспорт функционирует как сегмент рынка с развитой конкуренцией. Одновременно железнодорожный транспорт рассматривается как естественный монополист. Эффективность общих тарифных съездов могла быть значительно большей, если бы был создан постоянно действующий институт таких тарифных съездов, а в промежутке между съездами действовало Бюро правления тарифных съездов, как это было во времена С. Ю. Витте.

Для железнодорожного транспорта как монополиста установлены регулируемые государственными органами тарифы, построенные на следующих принципах:





- в основу тарифной системы кладется двух-ставочная модель тарифных схем по начально-конечной и движущейся операциям;

- базовый (прейскурантный) уровень тарифов рассчитывается на основе себестоимости и необходимой прибыли;

- тарифы дифференцируются по следующим транспортным признакам: типу вагона, его принадлежности, виду отправок (повагонная, мелкая, малотоннажная, контейнерная), степени использования грузоподъемности вагона, особым условиям перевозок (скоропортящиеся, опасные, негабаритные грузы), скорости и расстоянию перевозок; в базовом уровне тарифа не учитываются затраты, связанные с выполнением отдельных работ и услуг (подача вагонов под грузовые операции, хранение грузов и др.), оплачиваемых по дополнительным сборам.

Государственное регулирование транспортных тарифов осуществляется путем прямого воздействия на их уровень, систему и динамику, обеспечивающих безубыточную работу железнодорожного транспорта, а также возмещение потерь доходов при установлении тарифов на уровне, не компенсирующем экономически обоснованных текущих и капитальных затрат железных дорог. При росте цен на материалы, потребляемые железнодорожным транспортом, периодически производится индексация базового уровня тарифа.

В перспективе для создания научно обоснованной тарифной системы следует принять совершенно другую методологию построения тарифов. На этот счёт в литературе имеется ряд предложений. Как вариант предлагаются следующие основные принципы и методология построения тарифной системы для железнодорожного транспорта, действующего в статусе естественного монополиста.

Транспортный тариф как превращенная форма экономически целесообразных затрат ресурсов, необходимых для осуществления перевозочного процесса, прежде всего зависит от того, в какой мере общество способно выделить ресурсы из общественного производства в область транспорта. Это означает, что в структуре основного капитала национальной экономики прошлый труд, задействованный в сфере транспорта, может составлять вполне определенную долю. Использование ресурсов в области транспорта для обеспечения перевозок пассажиров и грузов проявляется, в конечном счете, в той доле валового национального продукта, который создается транспортом. Таким образом, величина тарифа в той или иной мере должна быть связана с транспортной долей в валовом национальном продукте. Скажем, если эта доля представляет собой 3–5 % в валовом национальном продукте, то совокупная средняя провозная плата находится в этих пределах и может рассматриваться в качестве отправной точки для установления величины тарифа на последующий период.

Величина тарифа должна обеспечивать определенную рентабельность транспортных предприятий. В противном случае число закрывающихся (разоряющихся, ликвидирующихся, обанкротившихся) транспортных предприятий возрастет и, как следствие, сократится, и предложение транспортных услуг и уменьшится доля их в валовом национальном продукте. Поэтому суммарный транспортный тариф не может быть меньше, чем сумма затраченных на перевозки ресурсов плюс определенная прибыль. Средняя норма рентабельности не должна превышать 35 % себестоимости транспортных услуг, что должно учитываться в определении пределов величины транспортных тарифов на предстоя-

ший период. В противном случае произойдет нарушение хозяйственных связей внутри комплекса путей сообщения и потребуются срочное вмешательство с целью их восстановления.

Немаловажным тарифообразующим фактором является доля транспортных затрат в цене перевозимой продукции. В этом показателе проявляется сформировавшаяся структура размещения производственных звеньев и экономически сложившаяся система хозяйственных связей в национальной экономике. Если названный показатель колеблется в пределах 7–10 %, то это показывает, что он значительно выше, нежели доля транспортной составляющей в валовом национальном продукте. Очевидно, что этот параметр следует учитывать в процессе тарифообразования на будущее, ибо в противном случае можно нарушить хозяйственные связи между отправителями, которые весьма сложно будет восстановить. Поэтому вначале надо принять решение, какие из хозяйственных связей считать экономически нецелесообразными в национальной экономике, а затем устанавливать величину транспортного тарифа, заведомо предполагая остановку части производственных звеньев.

В иной форме рассмотренный фактор влияет на величину тарифа в виде отношения суммарной провозной платы к суммарной цене перевозимого груза. Если этот коэффициент колеблется, скажем, в пределах 15–20 %, то это означает, что повышение цен на перевозимую продукцию не может оставить неизменной величину тарифа. Ибо если сумма цен перевозимых грузов выросла на 20 %, а тарифы только на 10 %, то волеизъявлением следует констатировать, что перерабатывающие отрасли оттягивают на себя большую прибыли, чем транспортная система. В конечном итоге при сохранении этой тенденции нарушится воспроизводственный процесс комплекса путей сообщения и возникнут затруднения с перевозочным процессом. Поэтому величина тарифа должна испытывать влияние названного соотношения и ее следует корректировать.

Кроме факторов, непосредственно влияющих на величину тарифа как результата свободного его установления, имеют место и факторы, косвенно воздействующие на его величину посредством государственного воздействия или регулирующего влияния государства. Последнее может рассматривать систему транспортных хозяйств как «естественную монополию» и ввести фиксированный рентный платеж. Если величина этого платежа в действительности отражает реальную степень монополизма данного транспортного подразделения, то такого рода регулирование создает конкурентоспособный рынок транспортных услуг. Если же эта величина будет больше реального положения дел, то такое государственное введение

приведет к свертыванию данной разновидности транспортных услуг, ибо последует перелив капитала. Незначительная же величина рентного платежа не затронет «естественной монополии» хозяйствующего субъекта и будет восприниматься как раздражающий элемент в функционировании транспортной системы.

Влияние государства на тарифообразование может быть ощущено через кредитную и налоговую политику. В зависимости от того, под какой процент даются кредиты транспортным предприятиям, можно точно предсказать, какие произойдут изменения в величине тарифов. Еще более ощутимые подвижки в тарифообразовании будут чувствоваться при той или иной налоговой политике. Таким образом, в общем, величина тарифа находится в зависимости от непосредственных и косвенных факторов и изменение удельного веса их влияния, будет приближать или отдалять тарифообразование от свободных тарифов. Это означает, что свободных тарифов «в чистом виде» можно достичь только при установлении равных условий для всех хозяйствующих звеньев и с быстрым сроком окупаемости основного капитала. Очевидно, что ожидать экономического чуда при таких установках вряд ли обоснованно. Включение же косвенных факторов в тарифообразование или дифференцированный подход к налогообложению и кредитованию означает в той или иной степени регулирование этого процесса.

Удельный вес каждого из отмеченных факторов, влияющих на величину транспортных тарифов, должен измениться под действием изменяющихся условий в национальной экономике. При этом на каждом этапе развития последней определяющим может быть тот или иной фактор, но доминирующим он стать не должен. Ибо в этом случае победит соответствующая концепция в тарифообразовании, которая определенное время будет отвечать требованиям национальной экономики, а затем превратится в ее тормоз. Только взвешенное сочетание влияния каждого из факторов при учете тенденций в национальной экономике позволит вести целенаправленную тарифную политику, основанную на учете силы воздействия того или иного фактора на величину тарифа, отвечающего данной ступени развития национальной экономики.

Важной проблемой является управление эксплуатационными расходами. Для ее решения необходимо вспомнить хорошо забытое старое и вернуться к нормированию эксплуатационных расходов. Без нормы, норматива нельзя создать систему управления эксплуатационными расходами.

Уровень эксплуатационных расходов не имеет непосредственного влияния на величину



тарифа. Однако снижение себестоимости перевозок создает благоприятные экономические условия для уменьшения тарифа. Это убедительно доказал С. Ю. Витте.

Он отмечал, что капитальные вложения на постройку железной дороги не связаны с величиной тарифа. Это действительно так, но затраты на обновление технических средств необходимо включать в тарифы, иначе железная дорога не может обеспечивать удовлетворение фактически складывающегося платежеспособного спроса в рамках имеющегося предложения – одного из основных постулатов рыночной экономики.

В тарифную политику необходимо включить условие индексации регулируемых тарифов.

Тарифы в местном сообщении целесообразно более либерализовать. Одновременно для регулирования тарифов в местном сообщении следует приглашать региональных представителей Федеральной антимонопольной службы с тем, чтобы полнее соблюдать баланс интересов между различными видами транспорта и отправителями грузов, а также учитывать развитие экономики в данном регионе.

Заслуживает самого серьезного внимания вопрос о скидках. Необходимо определенно указать, на каких условиях и на какой период времени предоставляются скидки с тарифов. В ценовой политике скидки рассматриваются как мощный рычаг управления экономикой перевозочного процесса. Если условия предоставления скидок не выполняются, то последнее оборачивается для железной дороги прямой потерей доходов.

В тарифной политике России еще не было системы, связанной с территориальной дифференциацией тарифов (ТДТ). В условиях рынка особенно остро встает проблема более точного и объективного отражения действительной стоимости перевозок по территории страны в цене перевозок (тарифе). Между тем характерным для ОАО «РЖД» являются значительные различия себестоимости по дорогам сети и по направлениям.

Более того, введение ТДТ создает условия к тому, чтобы более реально отражать затраты живого труда на производство транспортной продукции по территории страны. Указанные затраты можно было бы отражать, как новую добавленную стоимость, создаваемую работ-

никами ОАО «РЖД», в виде определенной доли от стоимости полного тарифа.

Введение ТДТ и отчисление затрат живого труда в доле от полного тарифа в определенной степени усложнит систему тарифов и взаиморасчетов, но создаст условия к тому, чтобы произведенная и добытая в Сибири и на Дальнем Востоке продукция по более низкой цене была доставлена в пункты потребления.

Расчеты показывали, что себестоимость перевозок, являющаяся основой построения грузовых тарифов, оказывается в Азиатской части России более чем на 1/3 ниже, чем в Европейской части России. Это объясняется тем, что в Азиатской части страны, более 80 % грузооборота осваивается электротягой, а в Европейской части – только 63 %. В этих условиях единый по России железнодорожный грузовой тариф приводит к удорожанию продукции, вывозимой из районов Сибири и Дальнего Востока.

В заключение хотелось бы еще раз подчеркнуть непреходящее значение трудов С. Ю. Витте для развития железнодорожного транспорта, транспортной системы, в таких взаимосвязанных областях, как тарифная политика, взаимовлияние проводимой государством таможенной политики и торговли, сбалансированность темпов развития транспорта, промышленности и сельского хозяйства.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Витте Сергей Юльевич. Принципы железнодорожных тарифов по перевозке грузов. – Киев: Тип. И. Н. Кушнерева и К^о, 1883. – 294 с.
2. Витте С. Ю. Воспоминания. – М.: Издательство социально-экономической литературы, 1960. – Т. 1–3.
3. Витте С. Ю. Конспект лекций о народном и государственном хозяйстве, читанных его Императорскому высочеству великому князю Михаилу Александровичу в 1900–1902 гг. – СПб.: Тип. АО Брокгауз-Ефрон, 1912. – XV, 568 с.
4. Витте С. Ю. По поводу мнения Leon Say о железнодорожных тарифах // Инженер. – Киев. – 1883. – № 1–12. – С. 9–13.
5. Русские порты и железнодорожные тарифы: Прил. Речь кн. Бисмарка по поводу либавского порта, сказанная им в 49 заседании Рейхстага, 14 февраля 1885 года. – Киев: Тип. С. В. Кульженко, ценз. 1886. – 20, III с.; 28.
6. Витте С. Ю. Собрание сочинений и документальных материалов: В 5 т. / Редкол.: Л. И. Абалкин (пред.) и др. – М.: Наука, 2002–2007. ISBN 5-02-008394-1. ●

Информация об авторе:

Левин Дмитрий Юрьевич – доктор технических наук, главный эксперт АО «НИИАС», Москва, Россия, levindu@yandex.ru.

Статья поступила в редакцию 19.04.2023, одобрена после рецензирования 02.06.2023, принята к публикации 05.06.2023.



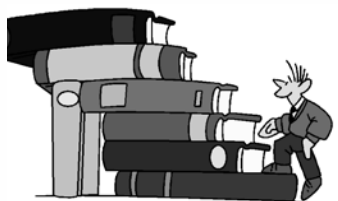
РЕЦЕНЗИЯ

160

Функциональная безопасность систем управления на железнодорожном транспорте. Подходы, решения, перспективы.



КНИЖНАЯ ЛОЦИЯ



АВТОРЕФЕРАТЫ ДИССЕРТАЦИЙ

163

- Управление работоспособностью автобусного парка в Республике Бурунди.
- Упрочнение изоляции электрооборудования тягового подвижного состава тепловым излучением.
- Обеспечение авиационной доступности регионов Восточной Арктики Российской Федерации.
- Организация грузопотоков в условиях реформирования железнодорожного транспорта Республики Узбекистан.

НОВЫЕ КНИГИ

168

Новые книги о транспорте и для транспортников, вышедшие в российских издательствах и университетах.





Безопасные железные дороги

(рецензия на монографию «Функциональная безопасность систем управления на железнодорожном транспорте»)



Дмитрий ЕФАНОВ

Дмитрий Викторович Ефанов

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ Петра Великого), Санкт-Петербург, Россия.

Научно-исследовательский и проектный институт транспортной и строительной безопасности, Санкт-Петербург, Россия.

Российский университет транспорта, Москва, Россия.

Ташкентский государственный транспортный университет, Ташкент, Узбекистан.

✉ TrES-4b@yandex.ru.

АННОТАЦИЯ

Шубинский И. Б., Розенберг Е. Н. Функциональная безопасность систем управления на железнодорожном транспорте: Монография. – М.: Вологда: Инфра-Инженерия, 2023. – 360 с. ISBN 978-5-9729-1553-8.

Обеспечение безопасности – одно из главных условий существования человечества. Поэтому понятие «безопасности» находится в фокусе внимания различных сфер деятельности, начиная от сельского хозяйства, медицины и заканчивая космосом. При этом трактовка понятия «безопасности» до настоящего времени неоднозначна. Теория и практика «функциональной безопасности» наибольшее развитие получила в настоящее время в атомной промышленности и на железнодорожном транспорте. На железнодорожном транспорте в области функциональной безопасности создана серия европейских (CEN), международных (IEC), межгосударственных (ГОСТ), национальных (ГОСТ Р) стандартов. В них основное внимание уделяется аппаратно-программным системам управления.

В монографии Игоря Шубинского и Ефима Розенберга «Функциональная безопасность систем управления на железнодорожном транспорте» представлен широкий спектр вопросов функциональной безопасности – от научных основ (понятий, постулатов, принципов) до методов и способов обеспечения безопасности технических средств и программного обеспечения систем управления на железнодорожном транспорте, включая прогрессивные методы обеспечения безопасности с помощью виртуальных каналов и цифровых двойников.

Монография представляет интерес для научных работников, специалистов железнодорожной отрасли, связанных с процессами управления, профессорско-преподавательского состава, аспирантов и студентов вузов железнодорожного транспорта. Может быть полезна учёным и специалистам других областей промышленности и транспорта, связанным с проблемами функциональной безопасности и надёжности систем и объектов управления.

Ключевые слова: железнодорожный транспорт, функциональная безопасность систем управления, методы обеспечения безопасности, виртуальные каналы, цифровые двойники, искусственный интеллект.

Для цитирования: Ефанов Д. В. Безопасные железные дороги // Мир транспорта. 2023. Т. 21. № 6 (109). С. 160–162. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-6-18>.

Полный текст статьи-рецензии на английском языке публикуется во второй части данного выпуска.
The full text of the review article in English is published in the second part of the issue.

Вопросы функциональной безопасности систем управления в промышленности и на транспорте первостепенны. С развитием интеллектуальных технологий управления и появлением новейших средств автоматизации они приобретают более сложную форму, а ответы и последующие решения становятся основой безопасности разрабатываемых систем критического применения. Анализ научных публикаций в сфере транспорта подчеркивает актуальность исследования методов реализации функционально безопасных систем управления, в том числе, в сегменте железнодорожного транспорта.

Если принципы реализации функционально безопасных систем управления на релейной элементной базе просты и понятны и основаны на использовании неконтролируемых реле (в простонародье – реле первого класса надежности) в ответственных цепях и кабельных сетях для управления распределенными объектами, то с применением устройств и систем, реализованных с использованием микроэлектронных средств, на программируемой элементной базе, имеющих и аппаратные, и программные компоненты, наделяемых искусственным интеллектом и использующих беспроводные тракты передачи управляющей и диагностической информации, увязываемых с периферийными системами мониторинга в комплексные системы управления движением возникают колоссальные проблемы в обеспечении высоких показателей надёжности и безопасности их функционирования.

Представленная читателю монография под названием «Функциональная безопасность систем управления на железнодорожном транспорте» [1], написанная весьма известными в отрасли учёными, докторами технических наук, профессорами Игорем Борисовичем Шубинским и Ефимом Наумовичем Розенбергом является по истине фундаментальной работой, обобщающей ключевые исследования, как соавторов книги, так и других известных исследователей и учёных в сфере реализации надежных и безопасных систем управления на железнодорожном транспорте. Данная монография – это, вообще, именно та книга, которая должна встать в один ряд на книжной полке с трудами таких мэтров теории синтеза надежных и безопасных систем управления на железнодорожном транспорте, как докторов технических наук, профессоров Валерия Владимировича Сапожникова, Владимира Владимировича Сапожникова и Виктора Михайловича Лисенкова. Выделим четыре отдельные их монографии [2–5], два учебных пособия [6; 7] и фундаментальный обзор [8]. Надо сказать, что, судя по всему, сегодня мы имеем три основных ответвления и, соответственно тому, три ключевые научные школы в направлении надёжности и функциональной

безопасности систем управления на железнодорожном транспорте – профессоров Сапожниковых (исследования в их научной школе в большей мере были сосредоточены на развитии методов обеспечения аппаратной надёжности и безопасности и синтезе контролепригодных, самопроверяемых и отказоустойчивых устройств), профессора Лисенкова (исследования в его научной школе касались вопросов статистической теории безопасности движения поездов и теоретических основ построения безопасных микроэлектронных систем управления) и профессоров Шубинского и Розенберга (в их работах представлена теория функциональной безопасности систем управления, методы и способы обеспечения надёжности и безопасности аппаратно-программных средств, в том числе, затрагиваются более современные вопросы применения технического зрения, виртуальных каналов обработки информации, цифровых двойников и искусственного интеллекта).

Обратим внимание на суть рецензируемой монографии, включающей в себя семь основных разделов, посвящённых таким вопросам:

1. Основные понятия, постулаты и принципы функциональной безопасности на железнодорожном транспорте.

2. Графовые методы определения показателей функциональной безопасности и надёжности систем управления на железнодорожном транспорте.

3. Модели функциональной безопасности систем управления на железнодорожном транспорте.

4. Принципы построения функционально безопасных устройств.

5. Обеспечение функциональной безопасности программных средств.

6. Методы и технологии создания функционально безопасных систем.

7. Подтверждение соответствия требованиям безопасности систем управления.

Особый интерес у читателей, знакомых с предметной областью монографии, вызовут материалы, посвящённые строгому и приближенному графовому полумарковскому методу моментов, графовому полумарковскому методу определения показателей функциональной безопасности на основе операторных преобразований, алгоритмам расчёта показателей надёжности и безопасности систем графовыми методами, моделям функциональной безопасности резервированных систем, методам обеспечения функциональной безопасности программных компонентов, а также вопросам практического характера применения разработанных авторами принципов для описания функционально безопасных систем с применением технического зрения, виртуальных каналов обработки данных, цифровых двойников и искусственного интеллекта.



Авторами книги не только систематизированы и обогащены знания в области разработки, сертификации и эксплуатации надёжных и функционально безопасных систем управления на железнодорожном транспорте, но и созданы строгие и приближенные методы расчета и прогнозирования показателей функциональной безопасности, с помощью которых им удалось исследовать модели сложных систем управления на железнодорожном транспорте.

Следует отметить, что в представленной монографии авторы сосредоточили свое внимание на анализе функциональной безопасности отдельных систем, например управления движением локомотива с помощью виртуального канала обработки информации, систем с цифровым двойником, систем беспилотного управления и т. п. Однако в настоящее время активно развиваются и комплексные системы управления, в которых каждая из рассмотренных авторами систем является подсистемой. Данные об их работе дополняются внешними системами периодического и стационарного мониторинга, а информационные потоки также направляются на уровень организации, планирования и управления перевозками для оптимизации всех протекающих процессов. В качестве примера таких разрабатываемых систем можно обратить внимание на автоматизированную комплексную систему управления движением поездов в метрополитенах [9]. Кроме того, в настоящее время назрела необходимость разработки функционально безопасных и тесно интегрируемых с системами обеспечения безопасного движения поездов систем стационарного мониторинга объектов железнодорожной инфраструктуры, от работы которых также зависит безопасность перевозочного процесса [10; 11]. Вопросы надёжности и функциональной безопасности таких комплексных систем управления также крайне интересны читателю, а их изучение, по всей видимости, дело уже ближайшего будущего в предметной области рассматриваемой монографии.

Книга «Функциональная безопасность систем управления на железнодорожном транспорте», безусловно, должна быть рекомендована к прочтению любым специалистом в сфере систем управления движением поездов, будь то зарождающийся инженер путей сообщения, разработ-

чик, исследователь или специалист «со стажем». Материалы же книги являются базовыми для специалиста в сфере систем безопасного управления движением поездов и должны рассматриваться в современных лекционных и практических курсах университетов для студентов, аспирантов и инженеров, повышающих свою квалификацию.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Шубинский И. Б., Розенберг Е. Н. Функциональная безопасность систем управления на железнодорожном транспорте. – М.: Вологда: Инфра-Инженерия, 2023. – 360 с. ISBN 978-5-9729-1553-8.
2. Лисенков В. М. Статистическая теория безопасности движения поездов. – М.: ВИНТИ РАН, 1999. – 331 с. ISBN 5-900242-29-3.
3. Сапожников В. В., Сапожников Вл. В., Христов Х. А., Гавзов Д. В. Методы построения безопасных микроэлектронных систем железнодорожной автоматики. – Под ред. Вл. В. Сапожникова. – М.: Транспорт, 1995. – 272 с. ISBN 5-277-01690-2.
4. Сапожников В. В., Сапожников Вл. В., Талалаев В. И. [и др.]. Сертификация и доказательство безопасности систем железнодорожной автоматики: Под редакцией Вл. В. Сапожникова. – М.: Транспорт, 1997. – 288 с. ISBN 5-277-02000-4.
5. Сапожников Вл. В. Синтез систем управления движением поездов на железнодорожных станциях с исключением опасных отказов. – М.: Наука, 2021. – 229 с. ISBN 978-5-02-040877-7.
6. Сапожников В. В., Шаманов В. И., Сапожников Вл. В. Надёжность систем железнодорожной автоматики, телемеханики и связи. – М.: Маршрут, 2003. – 261 с. ISBN 5-89035-119-2.
7. Сапожников В. В., Сапожников Вл. В. Основы технической диагностики. – М.: Маршрут, 2004. – 318 с. ISBN 5-89035-123-0.
8. Гавзов Д. В., Сапожников В. В., Сапожников Вл. В. Методы обеспечения безопасности дискретных систем // Автоматика и телемеханика. – 1994. – № 8. – С. 3–50. EDN: YZNRGT.
9. Аверченко Е. О., Баранов Л. А., Шевченко М. А. Функциональная структура комплекса систем управления движением поездов метрополитена // Автоматика на транспорте. – 2021. – Т. 7. – № 3. – С. 343–361. DOI: 10.20295/2412-9186-2021-7-3-343-361.
10. Ефанов Д. В., Хорошев В. В., Осадчий Г. В. Концептуальные основы синтеза безопасных систем управления движением поездов // Мир транспорта. – 2022. – Т. 20. – № 3 (100). – С. 50–57. DOI: 10.30932/1992-3252-2022-20-3-6.
11. Ефанов Д. В., Михайлюта Е. М. Управление надёжностью и безопасностью перевозочного процесса с применением систем непрерывного мониторинга объектов железнодорожной инфраструктуры // Мир транспорта. 2023. – Т. 21. – № 2 (105). – С. 84–94. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-2-10>. ●

Информация об авторе:

Ефанов Дмитрий Викторович – доктор технических наук, профессор, действительный член Международной Академии транспорта, член Института инженеров электротехники и электроники; профессор Высшей школы транспорта Института машиностроения, материалов и транспорта Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (СПбПУ Петра Великого); заместитель генерального директора по научно-исследовательской работе «Научно-исследовательский и проектный институт «Транспортной и строительной безопасности» (ООО «НИПИ «ТрансСтройБезопасность»), Санкт-Петербург, Россия; профессор кафедры автоматики, телемеханики и связи на железнодорожном транспорте Российского университета транспорта, Москва, Россия; профессор кафедры автоматики и телемеханики Ташкентского государственного транспортного университета, Ташкент, Узбекистан, TrES-4b@yandex.ru.

Статья поступила в редакцию 30.11.2023, принята к публикации 23.12.2023.

АВТОРЕФЕРАТЫ ДИССЕРТАЦИЙ

*Авторефераты диссертаций, представленных
к защите в российских транспортных
университетах*

*Текст на английском языке публикуется
во второй части данного выпуска.*

*The text in English is published
in the second part of the issue.*

DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-6-19>

Бигиримана Жувенал. Обоснование системы управления работоспособностью автобусного парка в условиях Республики Бурунди / Автореф. дис... канд. техн. наук. – М.: МАДИ, 2023. – 19 с.

При отсутствии железнодорожной инфраструктуры и доступа к морю в Бурунди доминирует автомобильный транспорт. Поэтому его надежность имеет решающее значение для всей экономики страны. Поддержание автотранспортных средств в работоспособном состоянии за счёт сбалансированного развития и эффективной работы предприятий по техническому обслуживанию и ремонту (ТО и Р) транспорта, а также уровня организации и их оснащения позволит повысить уровень развития, организации и бесперебойного обеспечения автотранспортными услугами. Ведущую роль в технологическом процессе обеспечения работоспособности автотранспорта играет диагностирование его технического состояния, результаты которого позволяют оперативно получать информацию о его изменении, а применение современных научных методов предоставляет возможность прогнозировать работоспособность транспортных средств.

Целью диссертационной работы является обоснование необходимости создания эффективной системы технического обслуживания и ремонта автобусов в условиях Республики Бурунди на основании использования методов эксплуатационного резервирования.

Научная новизна работы заключается в разработке модели прогнозирования потенциала работоспособности силового агрегата и методики обоснования системы организации ТО и Р автобусов класса М3 в условиях тропического климата и горной местности с использованием методов ремонтного резервирования с применением ремонтных комплектов.

Выявлены основные причины сокращения срока эксплуатации автобусов, который зависит от наличия асфальтобетонного покрытия, природно-климатических условий, совершенства системы поставки запасных частей и отсутствия действующей системы ТО и ремонта.

Доказано, что внедрение принципов резервирования, основанных на использовании комплектной замены вместо «подетальной» обеспечивает эффективное использование средств на организацию складских запасов и снижают сроки нахождения этих деталей на складах, а автобусов в ожидании ремонтных действий.

На основании использования разработанной математической модели прогнозной оценки наработки силового агрегата автобуса до капитального ремонта удалось решить проблему не только оптимизации складских запасов запасных частей, но и эффективного повышения уровня работоспособности автобусов в процессе ремонта.

На основании собранной статистической информации о состоянии ремонтной базы в стране и использовании полученных результатов данной работы разработана методика по организации системы ТО и ремонта автобусов для условий Республики Бурунди.

2.9.5 – Эксплуатация автомобильного транспорта.

Работа выполнена и защищена в Московском автомобильно-дорожном государственном техническом университете (МАДИ).

Дульский Е. Ю. Научные основы теории упрочнения изоляции электрооборудования тягового подвижного состава тепловым излучением / Автореф. дис... докт. техн. наук. – СПб.: ПГУПС, 2023. – 32 с.

Целью исследования является создание теоретических основ сушки и упрочнения изоляционных конструкций ТПС с использованием ИК-излучения путем разработки новых методов, способов, технических и технологических решений, повышающих надежность изоляции электрооборудования ТПС и снижающих затраты на ее ремонт.

В диссертационной работе изложены новые научно обоснованные технические, технологические решения по повышению надежности изоляционных конструкций электрооборудования ТПС. Разработанные математические модели, методы, способы, технические решения и технологические процессы внедрены в практику линейных и ремонтных предприятий, заводов-изготовителей. Проведенные исследования позволили сформулировать основные результаты и выводы.



Выполнен системный подход к анализу надежности электрооборудования ТПС с учетом распределения зональных особенностей Восточного полигона обращения, который позволил выявить существенные отличия интенсивности отказа изоляции электрооборудования по разным зонам эксплуатации ТПС. Влияние зональных особенностей, таких как климат, грузонапряженность, рельеф отчетливо проглядывается при анализе надежности оборудования ТПС. При этом отказы изоляционных конструкций электрооборудования составляют порядка 40 % от общего числа.

Проведено исследование факторов, влияющих на надежность электрооборудования ТПС, на основании чего предложена соответствующая классификация применительно к Восточному полигону обращения.

Предложена методика выбора энергоэффективных источников ИК-излучения для их дальнейшего использования в промышленных установках при упрочнении полимерной изоляции на основе теоретической и экспериментальной сравнительной оценки основных энергетических параметров. На основании данной методики среди электрических излучателей, представленных сегодня на рынке, наибольшую эффективность по таким параметрам, как лучевой КПД (83,5 %), температура излучающей поверхности (860° С), удельная поверхностная энергия излучения (4,12 Вт/см²), потребляемая электрическая мощность (600 Вт), показали высокотемпературные керамические излучатели типа SHTS.

Разработана методика выбора эффективных отражателей ИК-излучения на основании составления конечно-разностных моделей, учитывающих распределение значений угловых коэффициентов излучения. На основании данной методики наилучшие результаты по параметрам направленной концентрации теплового излучения (плотности распределения теплового поля под отражателем), максимальной температуры нагрева облучаемой поверхности (279° С), минимальной температуры нагрева отражателя (542° С), показали рефлекторы, имеющие трапецевидную форму с внутренним углом 150° С.

Предложен комплекс математических моделей для расчета эффективных режимов ИК-энергоподвода в процессах упрочнения элементов изоляционных конструкций электрооборудования ТПС. Математические модели позволяют описывать процессы, происходящие при нагреве многослойных изоляционных конструкций с использованием ИК-излучения с учетом опти-

ческих свойств пропиточных материалов и спектральных характеристик современных излучателей. Предлагаемый комплекс математических моделей позволяет оперативно определять типы структурных элементов системы, выбирать оптимальные параметры их работы с учетом геометрических особенностей обмоток, типа изоляционного и пропиточного материалов, времени работы и других внешних факторов.

Выполнен количественный и качественный анализ влияния технологических режимов процесса нагрева изоляционных конструкций электрооборудования ТПС ИК-излучением на их работоспособность в эксплуатации, в результате чего установлены новые зависимости параметров структурных элементов системы друг от друга и на процесс упрочнения в целом. В ходе экспериментальной оценки установлены оптимальные режимы ИК-энергоподвода в осциллирующем режиме, позволяющие повысить электрическую прочность изоляции в среднем на 45 %, в сравнении со штатным способом (ИК-сушка в среднем – 4,3 кВ, конвективная сушка в среднем – 2,4 кВ). Выявлено, что твердость и эластичность полимерной изоляции изменяется незначительно при изменении режимов нагрева.

Анализ проведенных исследований с позиций химического состава, структуры пропиточных материалов и режимов термообработки указывает на определяющее значение химических свойств полимера по оптимизации прочности и пластичности при формировании капсулы на поверхности возможной зоны повреждения изоляции. Таким образом, содержание растворимой части связующего после обработки полимерной изоляции тепловым излучением в восемь раз ниже (2,4 к 22,0), а степень отверждения – на 30 % выше (97,6 к 78,0), по сравнению с конвективным методом.

Предложена методика экспериментальной оценки и согласования спектральных характеристик ИК-излучателей с оптическими свойствами изоляционных материалов, позволяющая подбирать ИК-излучатели для любых изоляционных материалов с целью повышения энергоэффективности процесса упрочнения по таким параметрам, как коэффициент поглощения, пропускания и отражения. Среда «серого газа» при упрочнении изоляционных конструкций, пропитанных в лаке, снижает интенсивность потока ИК-излучения в начальный момент времени (10 %), что обусловлено интенсивным удалением паров растворителя, которые и поглощают излучение.

Разработаны способы и технические средства упрочнения изоляционных конструкций электрооборудования ТПС на основе применения ИК-излучения, повышающие надежность изоляции на 40 %, позволяющие снизить затраты электроэнергии в шесть раз, повысив производительность ремонта в четыре раза (14 патентов на изобретения и полезные модели, три свидетельства на регистрацию ЭВМ).

Внедрены в производство технические решения по использованию теплового излучения при ремонте изоляционных конструкций электрооборудования ТПС на «Улан-Удэнском локомотивовогоноремонтном заводе» (УУЛВРЗ) – филиале АО «Желдорреммаш» (г. Улан-Удэ), в ООО «Ангарск Монтажэнергоремонт» (г. Ангарск), в моторвагонном депо Иркутск-Сортировочный – филиале Восточно-Сибирской дирекции моторвагонного подвижного состава – структурного подразделения Центральной дирекции моторвагонного подвижного состава – филиала ОАО «РЖД». Выполнены технико-экономические исследования повышения надёжности изоляции электрооборудования ТПС и экономичности предлагаемых технических решений по упрочнению изоляции, позволяющие получить суммарный ориентировочный годовой экономический эффект от внедрения предложенных разработок в производство составляет порядка трёх млн руб. только при замене одной печи.

В качестве перспектив для дальнейшего развития тематики диссертации предлагаются исследования, связанные с оптимизацией режимов сушки и упрочнения изоляции электрооборудования ТПС с использованием ИК-излучения в части определения времени окончания процесса полимеризации при ИК-нагреве и времени сушки соответственно.

2.9.3. – Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Работа выполнена и защищена в Петербургском государственном университете путей сообщения Императора Александра I.

Полешкина И. О. Методология обеспечения авиационной доступности регионов Восточной Арктики Российской Федерации / Автореф. дис... докт. техн. наук. – М.: МГТУ ГА, 2023. – 43 с.

Целью диссертационного исследования является решение научной проблемы обеспечения авиационной доступности малонаселенных арктических территорий, обладающих потенциалом

развития экономики регионов Восточной Арктики Российской Федерации.

Выявлены закономерности развития транспортной системы регионов Восточной Арктики России, основные из которых заключаются в следующем: отсутствии железнодорожного транспорта и автомобильных дорог круглогодичного использования; преобладании водного транспорта (до 78 % от общего объема перевозимых грузов) в сложных мультимодальных схемах завоза грузов, осуществляемых в несколько этапов в среднем в течение 350 дней в году в связи с природно-климатическими ограничениями; безальтернативности использования воздушного транспорта для выполнения круглогодичных пассажирских перевозок (98 %).

Определено, что эффективное использование воздушного транспорта осложнено низкой плотностью населения и его дисперсионным расселением на большой территории, что не позволяет выполнять рейсы с достаточной частотой и загрузкой по требуемому количеству маршрутов. Выявлено, что 99 % авиационных перевозок на местном уровне выполняется крайне дорогими в эксплуатации в арктических условиях вертолетами МИ-8 вместимостью 22–24 места, что приводит к сокращению количества рейсов.

Разработаны и научно обоснованы теоретические положения концепции обеспечения авиационной доступности регионов Восточной Арктики, в рамках которой конкретизировано понятие «авиационная доступность региона», структурированы функции и виды услуг, безальтернативно выполняемые воздушным транспортом, позволяющие спрогнозировать потребность развития элементов системы воздушного транспорта на основе оценки совокупного спроса и скрытых социально-экономических эффектов, получаемых от них.

Получена зависимость между внутрирегиональной авиационной подвижностью населения арктических районов, стоимостью перелета и временем его ожидания в связи с несогласованностью расписания стыковочных рейсов и их задержкой из-за погодных условий. Разработана новая комплексная методика оценки транспортной доступности арктического региона на районном и местном уровнях, включающая оценки доступности пассажирских перевозок, доступности перевозок социально значимых скоропортящихся грузов, доступности оказания услуг санитарной авиации и МЧС, учитывающая сезонные ограничения. На примере Республики Саха (Якутия) выявлено, что



уровень доступности пассажирских перевозок в 12 раз ниже норматива по времени и в 35 раз ниже по стоимости, уровень доступности перевозок социально значимых скоропортящихся грузов сильно варьирует в течение года, уровень доступности услуг санитарной авиации и МЧС в наиболее отдаленных населенных пунктах ниже предельно допустимого в 1,7 раза.

Усовершенствован и экспериментально подтвержден метод оценки сезонного распределения пассажиропотоков местных авиаперевозок малочисленных населенных пунктов, позволяющий разделить их на кластеры, для которых применяется индивидуальная стратегия обеспечения авиационной доступности. Отличие данного метода от существующих заключается в формировании кластеров с учетом одновременно большого количества критериев, определяющих размер спроса на авиаперевозки и его сезонное распределение. Для Республики Саха (Якутия) получено пять кластеров. В первом авиаперевозки необходимо выполнять восемь месяцев в году вертолетами и легкими многоцелевыми самолетами (ЛМС), во втором – круглогодично вертолетами и ЛМС, в третьем – три месяца в году вертолетами, в четвертом – круглогодично ЛМС, в пятом авиаперевозки не требуются из-за наличия альтернативных видов сообщения. Данный метод позволяет обосновывать потребность развития сети посадочных площадок и вертодромов в арктических населенных пунктах.

Разработан метод двухуровневого прогнозирования спроса на внутрирегиональные пассажирские авиаперевозки действующих маршрутов, отличающийся от известных последовательным решением двух задач: прогнозом спроса на перевозки между населенными пунктами и центром арктического района и на его основе прогнозом спроса на межрайонные перевозки из районного центра в столицу региона. Данный метод позволяет планировать объем пассажиропотоков действующих внутрирегиональных авиалиний при изменении разных параметров.

Разработана и научно обоснована методика расчета пассажиропотоков на вновь открываемых прямых авиационных маршрутах между центрами соседних арктических районов, учитывающая инфраструктуру районных центров, численность проживающего населения и его потребности в совершении перелетов. Установлено, что открытие прямых маршрутов позволит втрое увеличить межрайонную авиационную подвижность населения с 0,98 до 2,98 поездок в год. Данная методика позволяет прогнозировать пас-

сажиропотоки по вновь открываемым маршрутам и изменять конфигурацию маршрутной сети авиакомпаний.

Усовершенствована методика оценки потребного парка воздушных судов для организации местных авиаперевозок, позволяющая находить рациональные комбинации используемых видов авиационной техники с учетом заданной частоты совершаемых рейсов и условия минимизации затрат на их выполнение. Результаты применения данной методики показали, что при замене вертолетов МИ-8 самолетами типа АН-2 / АН-3 / «Байкал» на ряде маршрутов возможно добиться снижения затрат на перевозку одного пассажира на 28 % за счет снижения расхода топлива и увеличения коэффициента загрузки воздушного судна при одновременном увеличении количества выполняемых рейсов. Установлено, что увеличение количества выполняемых рейсов приведет к росту авиационной подвижности населения на местном уровне до 0,65. Данная методика позволяет авиакомпаниям и региональным властям планировать состав парка воздушных судов для организации заданной частоты полетов. Экономически обоснована целесообразность строительства посадочных площадок в населенных пунктах, в которых спрос на пассажирские авиаперевозки предъявляется более пяти месяцев в году.

Разработанные в диссертации концепция и комплекс методов и методик обеспечения авиационной доступности регионов Восточной Арктики соответствует Национальным целям развития Российской Федерации; Основам государственной политики РФ в Арктике, Стратегии развития Арктической зоны РФ и обеспечению национальной безопасности; Транспортной стратегии РФ; Комплексному плану модернизации и расширения магистральной инфраструктуры и Доктрине продовольственной безопасности РФ.

По результатам исследования для обеспечения авиационной доступности арктических регионов рекомендуется: внесение поправок в нормативно-правовое регулирование в части упрощения требований к аэропортам, посадочным площадкам и вертодромам с малой интенсивностью полетов; введение в Воздушный кодекс понятия малой авиации, упрощение требований к коммерческим авиакомпаниям, эксплуатирующим ЛМС; развитие сети посадочных площадок; организация отечественного производства многоцелевых ВС вместимостью 9–12 и 2–4 кресла с увеличенной дальностью полетов для выполнения авиаперевозок в малочисленные населенные пункты.

Перспективным направлением исследования по теме диссертации является исследование вопросов применения искусственного интеллекта и цифровых двойников сложных объектов и подсистем для управления воздушным транспортом Восточной Арктики. Детальной научно-методологической проработки требуют вопросы организации и управления системой завоза грузов беспилотными летательными аппаратами и создания надежной инфраструктуры для их обслуживания в арктических регионах.

2.9.1. – Транспортные и транспортно-технологические системы страны, ее регионов и городов, организация производства на транспорте (технические науки).

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете гражданской авиации» (МГТУ ГА), защищена в объединённом диссертационном совете Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ) и МГТУ ГА.

Сабуров М. Б. Метод и модели организации грузопотоков в условиях реформирования железнодорожного транспорта Республики Узбекистан / Автореф. дис... канд. техн. наук. – СПб.: ПГУПС, 2023. – 16 с.

В настоящее время в Республике Узбекистан проводятся обширные экономические реформы. В этом процессе «Новый Узбекистан» стремится формировать тесные и взаимовыгодные экономические отношения с соседними центрально-азиатскими странами, в том числе странами-лидерами во внешнеторговом обороте – Китаем и Россией. Стремление Республики Узбекистан войти в Евразийский Экономический Союз, Всемирную торговую организацию приведет к увеличению внешнего товарооборота. Однако в последнее время во внешнеторговом обороте наблюдается значительное превосходство импорта над экспортом товаров. Например, для тройки лидеров по внешнеэкономическим связям Республики Узбекистан импорт товаров в 2,5–3 раза больше, чем экспорт. В Республике Узбекистан производится ежегодно более 20 млн т плодоовощной продукции, из этого числа 1 млн экспортируется в разные страны. Республика Узбекистан является четвертым по объему экспортёром хлопка в мире. При больших и стабильных объемах перевозки грузов роль железнодорожного транспорта трудно переоценить. В частности, речь идёт о тарно-штучных грузах. В отличие от Российских и Китайских железных дорог, где частные опера-

торы занимают более 95 % рынка, на Узбекских железных дорогах основной парк составляют инвентарные вагоны с истекающим сроком службы, а рефрижераторный подвижной состав из-за истечения срока службы эксплуатируется только внутри Республики Узбекистан. Это обуславливает поиск новых подходов к организации перевозок, в частности переход к контейнерным перевозкам вышеприведенных грузов, что упрощает цепи поставок для экспортных перевозок, снижает транспортные издержки.

Целью исследования является повышение эффективности обеспечения грузопотоками тарно-штучных грузов поездов «Агроэкспресс» в условиях новой модели рынка грузовых перевозок в Республике Узбекистан посредством разработки метода и математических моделей их организации.

Основные выводы, теоретические и практически значимые результаты работы, заключаются в следующем.

Выполнен анализ объемов перевозок тарно-штучных грузов и выявлены основные причины, негативно влияющие на эти перевозки железнодорожным транспортом, такие как недостаток парка грузовых вагонов, высокая стоимость доставки грузов относительно автомобильного транспорта. Доказана актуальность разработки комплексной методики организации грузопотоков агропромышленного и текстильного комплексов в условиях обновления парка подвижного состава инновационными вагонами и контейнерами в Республике Узбекистан.

Осуществлена оценка объема погрузки грузов агропромышленного и текстильного комплексов и на её основе определены годовая потребность в железнодорожном подвижном составе, дефицит в грузовых вагонах. Общий дефицит грузовых вагонов составит 4590 единиц, из них в экспортном сообщении 1458 единиц на Узбекской железной дороге.

Разработана математическая модель оптимального обеспечения грузами поезда «Агроэкспресс», обеспечивающая разработку эффективных логистических решений по формированию и распределению грузопотоков агро- и текстильной продукции, позволяющих освоить увеличение грузовой базы для стран Азии.

Предложен метод обеспечения грузами поезда «Агроэкспресс», учитывающий вариантность структур и этапов подвоза грузов с минимальными затратами в Республике Узбекистан.

Разработано алгоритмическое обеспечение решения задачи оптимального снабжения грузами поезда «Агроэкспресс», позволяющее осущест-



влять сквозной мониторинг и управление логистическими цепями поставок агро- и текстильной продукции, с учётом следующих критериев: затраты на доставку, разница времени при подвозе грузов, экологический вред и сохранность грузов в процессе доставки.

Разработана имитационная модель подвоза груза к поездам «Агроэкспресс», учитывающая интеграцию грузопотоков, координацию работы элементов транспортно-логистического комплекса и согласование интересов участников перевозочного процесса, для проектирования логистических схем доставки агро- и текстильной продукции и тиражирования их для разных условий.

НОВЫЕ КНИГИ О ТРАНСПОРТЕ

Список на английском языке публикуется во второй части данного выпуска.

The list of titles in English is published in the second part of the issue.

Аврамчикова Н. Т., Рожнов И. П., Прохоров В. В., Ерыгина Л. В. Глобализация и ее влияние на развитие инфраструктурных отраслей региона: Монография. – М.: ИНФРА-М, 2023. – 237 с. ISBN 978-5-16-018409-8.

Аполлонский С. М. Энергосберегающие технологии в энергетике в России: Монография. – М.: Ruscience, 2023. – 440 с. ISBN 978-5-46603815-6.

Беловицкий К. Б. Экономическая безопасность организации: Монография. – М.: Дашков К°, 2023. – 182 с. ISBN 978-5-394-05210-1.

Бессонова Н. В., Коваленко Н. А. Управление эксплуатационной работой. Нормирование маневровой работы на железнодорожных станциях. – М.: РУТ (МИИТ), 2023. – 114 с. ISBN 978-5-907776-89-0.

Воробьев В. И., Злобин С. Н., Измеров О. В. [и др.] Техническая инновационика. Применение физико-технических эффектов при конструировании транспортных машин: Монография. – Орёл: ОГУ имени И. С. Тургенева, 2023. – 207 с. ISBN 978-5-9929-1423-8.

Горбунов В. П. Самолет и холод: климатические испытания и эксплуатация воздушных судов в условиях экстремально низких температур Арктики, Сибири и Крайнего Севера: Монография. – СПб.: Научное издание, 2023. – 711 с. ISBN 978-5-907618-46-6.

Дядик А. Н., Сурин С. Н., Балакин А. В., Малых Н. П. Энергетика морских подводных объектов: Монография. – СПб.: СПбГМТУ, 2023. – 383 с. ISBN 978-5-88303-650-6.

Козин В. М., Земляк В. Л., Куркин А. А., Беляков В. В. Избранные задачи ледотехники. Средства и методы решения: Монография. – Нижний Новгород [и др.]: Нижегородский гос. технический ун-т, 2023. – 771 с. ISBN 978-5-502-01733-6.

Козин Е. С., Базанов А. В. Беспилотные технологии на автомобильном транспорте: Монография. – Тюмень: ТИУ, 2023. – 178 с. ISBN 978-5-9961-2066-6.

Кравцевич С. В. Воспроизводство рабочей силы на отечественном рынке труда в условиях несовершенной

Результаты исследований одобрены, внедрены и используются в работе регионального железнодорожного узла Карши АО «Узбекистон темир йуллари» для повышения эффективности формирования поездов «Агроэкспресс» для перевозки тарно-штучных грузов в условиях реформирования грузовых перевозок в Республике Узбекистан. Также результаты использованы в учебном процессе в Ташкентском государственном транспортном университете.

2.9.4 – Управление процессами перевозок.

Работа выполнена и защищена в Петербургском государственном университете путей сообщения Императора Александра I.

конкуренции в социально-трудовых отношениях: Монография. – М.: Русайнс, 2023. – 117 с. ISBN 978-5-466-02493-7.

Кулев А. В., Кулев М. В., Ломакин Д. О. Теоретические и практические аспекты оптимизации и принятия решений в области транспортных систем с использованием методов имитационного моделирования: Монография. – Орёл: ОГУ имени И. С. Тургенева, 2023. – 241 с. ISBN 978-5-9929-1413-9.

Маженов С. А. Безопасность и экономика труда: актуальные проблемы и решения: Монография. – М.: Юстицинформ, 2023. – 279 с. ISBN 978-5-7205-1895-0.

Милгром П., Робертс Д. Экономика, организация и менеджмент / перевод с англ. И. В. Розманьского [и др.]. – М.: Альпина ПРО, 2023 (Чехов, Московская область). – 1112 с. ISBN 978-5-206-00022-1.

Нечаев Г. И., Слободянюк М. Э. Инфраструктура транспортных систем: Монография. – М.: Горячая линия-Телеком, 2023. – 203 с. ISBN 978-5-9912-1074-4.

Перевозицков С. И. Нефти газонасыщенные. Физические свойства. Трубопроводный транспорт: Монография. – Тюмень: ТИУ, 2023. – 179 с. ISBN 978-5-9961-3080-1.

Соболев В. М., Изюмский А. А., Котенкова И. Н., Мотренко Я. А. Повышение эффективности контрольно-надзорной деятельности на транспорте: Монография. – Краснодар: Издательский Дом-Юг, 2023. – 199 с. ISBN 978-5-91718-748-8.

Сороко В. И., Сороко А. В., Фотькина Ж. В. Автоматика, телемеханика, связь на железных дорогах России: Энциклопедия в трех томах / под общей редакцией канд. экон. наук В. И. Сороко, докт. экон. наук А. В. Сороко. – 2-е изд., доп. и перераб. – М.: Планета, 2023. Т. 2. – 2023. – 606 с. ISBN 978-5-901307-36-6.

Тлявлилина Г. В. Научное обоснование нормативной базы по проектированию защиты транспортных сооружений от гидродинамических воздействий естественной водной среды. – М.: ООО «Изд-во «Экон-Информ», 2023. – 173 с. ISBN 978-5-907681-28-6.

Федоров О. В. Инженерная деятельность и ресурсная направленность в инновационной сфере: Монография. – М.: Русайнс, 2023. – 128 с. ISBN 978-5-466-00865-4.

Штанг А. А., Бирюков В. В. Повышение эффективности электротранспортных систем с использованием накопителей энергии: Монография. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2023. – 258 с. ISBN 978-5-7782-5056-7.

Составила Н. ОЛЕЙНИК ●

Содержание номеров журнала «Мир транспорта», вышедших в 2023 году в томе 21

ВОПРОСЫ ТЕОРИИ

Бубнова Г. В., Покусеев О. Н., Акимов А. В.

Качество общественного транспорта мегаполиса в мультимодальных перевозках маятниковой миграции населения

№ 6 (109) С. 22–32

Гишиани А. Д., Розенберг И. Н., Соловьёв А. А.

Геофизические процессы в Арктике и системный анализ их воздействия на функционирование и развитие транспортной инфраструктуры

№ 3 (106) С. 6–34

Горбунов Р. Н., Горбунова З. В., Колчин В. С.

Перспективные направления исследований для выработки единых подходов к оценке качества, надежности и эффективности организации дорожного движения

№ 5 (108) С. 16–22

Карлов А. В., Евсеев О. В.

О подходах к методологическому обоснованию формирования Единой опорной транспортной сети и приоритизации проектов развития транспортной инфраструктуры

№ 6 (109) С. 14–21

Розенберг И. Н., Соколов С. С., Дубчак И. А.

Методы формирования цифрового двойника акватории для навигации беспилотных судов

№ 6 (109) С. 6–13

Тарасенко Е. А., Тяпунин А. П.

Матричный подход к проектированию принципов управления транспортными предприятиями

№ 5 (108) С. 6–15

НАУКА И ТЕХНИКА

Ададунов А. С., Федорин В. Н., Бехер С. А., Гуляев М. А.

Возможности мониторинга динамического воздействия подвижного состава на верхнее строение пути с использованием тензометрии и виброметрии

№ 4 (107) С. 12–20

Батурин А. П., Осипов А. П.

Современные системы интервального регулирования движения поездов железных дорог мира

№ 2 (105) С. 18–26

Ватаев А. С., Ватулин Я. С., Кавказский В. Н.

Моделирование динамического воздействия высокоскоростного подвижного состава на заглубленные сооружения тоннельного типа

№ 6 (109) С. 72–84

Гребенников Н. В., Зарифьян А. А.

Концепция повышения энергоэффективности автономных локомотивов

№ 1 (104) С. 6–13

Демидов И. М., Поляков В. Ю.

Оптимизация конструкции подводного плавающего транспортного сооружения

№ 5 (108) С. 34–45

Дорошенко К. А., Ашпиз Е. С., Коростелев В. А.

Лабораторные исследования материала подбалластного защитного слоя с применением вяжущих материалов

№ 6 (109) С. 34–39

Дятлов В. Н., Орлов С. В., Попов В. А.

Совместное влияние циклических нагрузок и коррозии на техническое состояние металлоконструкций эскалаторов метрополитена

№ 4 (107) С. 21–28

Евсеев Д. Г., Шинкарук А. С., Куликов Ю. М.

Цифровизация элементной базы пассажирского вагона на примере ремонта колесной пары

№ 6 (109) С. 65–71





Закиров А. Х., Назаров Ф. Х.

Численный метод расчета плоских течений вязкого газа в цилиндре

№ 4 (107) С. 6–11

Збрыський М. Т.

Оценка влияния строительства армогрунтовых подпорных стен на фундаменты устоев раздельного типа

№ 5 (108) С. 46–52

Зуев А. С., Глущенко М. Д.

Исследование асинхронного тягового электродвигателя с наклонными пазами ротора

№ 6 (109) С. 60–64

Космодамианский А. С., Воробьев В. И., Измеров О. В., Расин Д. Ю., Шевченко Д. Н.

Вопросы создания равнопрочных двухслойных сферических резинометаллических шарниров

№ 1 (104) С. 22–30

Кудров М. А., Бухаров К. Д., Махоткин Д. Р.

Постановка задачи управления автономным надводным судном для внутренних водных путей

№ 3 (106) С. 36–41

Ляшенко А. Ю.

Разгрузочно-сегрегационная установка песчаникового бута с энергонезависимым приводом комплектующего оборудования

№ 3 (106) С. 59–64

Незевак В. Л., Дмитриев А. Д., Самолинов С. С.

Моделирование кратковременных режимов работы тяговых накопителей электроэнергии

№ 2 (105) С. 6–17

Попов Д. А., Епифанов В. С., Зябров В. А.

О взаимосвязи крутильных колебаний и опрокидывающего момента судовых дизелей

№ 5 (108) С. 53–58

Тлявлин Р. М.

Оценка технического состояния набросных бун

№ 3 (106) С. 42–49

Тлявлиня Г. В., Тлявлин Р. М., Ярославцев Н. А.

Защита транспортных сооружений от волнового воздействия путём создания песчаного волногасящего пляжа

№ 5 (108) С. 24–33

Фазилова З. Т.

Влияние анизотропных свойств верхнего строения железнодорожного пути на параметры динамической осадки предмостовых участков

№ 3 (106) С. 50–58

Шантаренко С. Г., Савинкин С. В.

Повышение динамических качеств локомотива за счет изменения положения концевых витков пружин кузовного рессорного подвешивания

№ 6 (109) С. 40–47

Шепитько Т. В., Артюшенко И. А.

Оценка влияния сезонно-действующих охлаждающих устройств на теплофизические процессы грунтов основания железнодорожной насыпи

№ 1 (104) С. 14–21

Ярославцев М. В.

Унификация бортовых тяговых накопителей энергии для подвижного состава железных дорог

№ 6 (109) С. 48–59

УПРАВЛЕНИЕ И ЭКОНОМИКА

Андреев С. А.

Разработка метода оценки качества транспортного обслуживания населения в системах планирования городских транспортных систем

№ 5 (108) С. 84–92

Бандурин А. В., Матюха С. В.

Модель взаимодействия участников рынка региональных авиаперевозок в условиях ограниченной конкуренции

№ 6 (109) С. 86–95

Бояршинов М. Г., Вавилин А. С.

Продолжительность движения автомобилей в потоке как индикатор транспортного затора

№ 5 (108) С. 93–105

<i>Вакуленко С. П., Роменский Д. Ю., Калинин К. А.</i> Типизация проектов развития высокоскоростных железнодорожных магистралей	№ 3 (106) С. 85–94
<i>Гогричиани Г. В., Корниенко Н. В.</i> Повышение пропускной способности локомотивного депо путем определения приоритета организационно-технических мероприятий	№ 6 (109) С. 96–102
<i>Епихин А. И., Кондратьев С. И., Хекерт Е. В.</i> Диагностика судовых двигателей на основе вейвлетнейронной сети и сканирования изображений с помощью программируемой логической схемы	№ 6 (109) С. 110–118
<i>Жуков В. Е.</i> Имитационная модель управления сбойной ситуацией в аэропорту	№ 1 (104) С. 67–74
<i>Землин А. И.</i> Проблемы обеспечения безопасной эксплуатации высокоавтоматизированных транспортных средств с использованием потенциала публичного и частного права	№ 2 (105) С. 54–60
<i>Землин А. И., Шинкарук А. С., Вишнякова Е. П.</i> Правовые и технологические аспекты внедрения контракта жизненного цикла в пассажирском комплексе дальнего следования	№ 1 (104) С. 87–90
<i>Каргина Л. А., Ионова Т. В.</i> Нефинансовые риски внедрения информационных систем в деятельность транспортно-логистических компаний	№ 2 (105) С. 47–53
<i>Карлов А. В.</i> Методы принятия решений в транспортной политике: многокритериальный подход	№ 1 (104) С. 32–39
<i>Колесников М. В., Богачев В. А., Задорожный В. М., Бакалов М. В.</i> Анализ конкурентоспособности малых портов Азово-Черноморского бассейна в мультимодальных перевозках: технологические аспекты, оптимизационная задача транспортного типа	№ 3 (106) С. 74–84
<i>Копылов М. А.</i> Разработка унифицированного программного алгоритма подготовок к перевозке крупногабаритных грузов	№ 1 (104) С. 91–100
<i>Курзина Е. Г., Корниенко Н. А., Курзина А. М.</i> Обоснование транспортных издержек при перевозке насыпных грузов в контейнерах интегральным методом	№ 6 (109) С. 131–136
<i>Мартыненко А. В., Сайфутдинов Д. Ж.</i> Адекватность гравитационной модели для железнодорожных пассажиропотоков	№ 1 (104) С. 75–86
<i>Масленников В. А., Заика М. В., Маркелов А. В.</i> Методология проектирования объектов дорожного сервиса автомобилей	№ 2 (105) С. 61–67
<i>Москвичев О. В., Леонова С. А., Васильев Д. В.</i> Использование нейронной сети для учёта и анализа показателей работы транспортного предприятия	№ 2 (105) С. 39–46
<i>Нестеров Е. А., Цветков В. Я.</i> Транспортная кибербезопасность	№ 6 (109) С. 103–109
<i>Оденбах И. А., Орехов С. А., Таурит Е. Б.</i> Альтернативность в архитектурном проектировании мостов и путепроводов	№ 2 (105) С. 76–82
<i>Осинцев Н. А., Цыганов А. В., Рахмангулов А. Н., Багинова В. В.</i> Мультикритериальное сравнение контейнерных систем	№ 6 (109) С. 119–130
<i>Панова О. Н., Вакуленко С. П., Егоров П. А.</i> Унификация составов пассажирских поездов при организации нерегулярных железнодорожных перевозок	№ 5 (108) С. 79–83





Полешкина И. О., Воробьев В. В.

Развитие сети посадочных площадок и вертодромов: обеспечение авиационной доступности населённых пунктов арктических регионов

№ 2 (105) С. 28–38

Рахаев В. А., Кузина Е. Л., Василенко М. А.

Разработка предложений по повышению эффективности использования отечественного подвижного состава повышенной вместимости на юге России

№ 5 (108) С. 70–78

Рогоулин Р. С.

Оптимизация лесопромышленных цепочек поставок: математическая модель и анализ региональных источников на примере Приморского края

№ 5 (108) С. 60–69

Розенберг Е. Н., Озеров А. В., Кузнецов В. И., Тихонов С. С.

Сравнительная оценка параметров движения поездов для различных вариантов виртуальной сцепки

№ 4 (107) С. 30–39

Рубцов Е. А., Кудряков С. А., Далингер Я. М.

Методика оценки сокращённых критических зон радиомаяков системы посадки ILS на примере аэродрома Горно-Алтайск

№ 4 (107) С. 40–52

Сухов Ф. И., Зверкова В. М.

Оценка аспектов устойчивого развития в деятельности транспортных компаний

№ 1 (104) С. 49–54

Тлявлинина Г. В.

Физическое моделирование в развитие нормативной базы в транспортном строительстве

№ 2 (105) С. 68–75

Тяпухин А. П.

Структура методов управления организацией в цепи создания ценности

№ 1 (104) С. 55–66

Урюпин И. В.

Определение стандарта транспортной доступности для внутренних пассажирских авиаперевозок

№ 3 (106) С. 66–73

Филиппова Н. А., Абакаров А. А., Амиров А. Т., Игитов Ш. М.

Применение цифровой инфраструктуры и телематических систем с целью повышения безопасности перевозок и дорожного движения при эксплуатации транспорта в горных условиях

№ 4 (107) С. 62–71

Холиков И. В.

Правовое регулирование военно-транспортной обязанности в Российской Федерации

№ 4 (107) С. 72–78

Цыганов А. А.

Результаты конъюнктурного исследования деятельности по ремонту автотранспорта по договорам ОСАГО

№ 5 (108) С. 106–114

Чжан Тэн

Тенденции развития китайско-российских отношений в сфере железнодорожного транспорта

№ 1 (104) С. 40–48

Шинкарук А. С.

Техническая подготовка к планово-предупредительному ремонту двухэтажного подвижного состава

№ 4 (107) С. 53–61

БЕЗОПАСНОСТЬ, УСТОЙЧИВОСТЬ, ЭКОЛОГИЯ

Гордеев Д. С., Томаев А. О.

Сценарный анализ перспектив применения альтернативных видов топлива в автомобильном транспорте в России

№ 4 (107) С. 88–98

Ефанов Д. В., Михайлюта Е. М., Пашуков А. В.

Технологические основы информационного сопряжения систем мониторинга искусственных сооружений автомобильных дорог с интеллектуальными транспортными системами

№ 5 (108) С. 116–125

Ефанов Д. В., Михайлюта Е. М.

Управление надёжностью и безопасностью перевозочного процесса с применением систем непрерывного мониторинга объектов железнодорожной инфраструктуры

№ 2 (105) С. 84–94

Землин А. И., Матвеева М. А., Гоц Е. В.

Управление рисками безопасного использования высокоавтоматизированных транспортных средств в мегаполисе: системно-правовой анализ

№ 3 (106) С. 115–122

Клепалова Ю. И., Щербакова О. В., Балицкий К. С.

Медицинские осмотры работников, связанных с движением транспорта

№ 2 (105) С. 101–109

Коссов В. С., Князев Д. А., Красюков Н. Ф., Махутов Н. А., Гаденин М. М.

Нормативная база обеспечения безопасной эксплуатации железнодорожной техники по ресурсу несущих конструкций

№ 3 (106) С. 106–114

Куприянович М. С.

Роль и место Международного кодекса по охране судов и портовых средств в международно-правовом механизме обеспечения безопасности на морском транспорте

№ 5 (108) С. 142–148

Лёвин Б. А., Цветков В. Я., Исаин Н. В., Охотников А. Л.

Развилки углеродного регулирования

№ 3 (106) С. 96–105

Леонов Т. М., Землина О. М.

Правовое регулирование контроля (надзора) за качеством и безопасностью медицинской деятельности на транспорте

№ 2 (105) С. 95–100

Лимарев А. С., Воротников М. Ю.

Сравнительная оценка перспективности применения электромобилей на водородном топливном элементе

№ 4 (107) С. 99–105

Малышев М. И.

Контроль сохранности навалочных и насыпных грузов путём определения незаполненного объёма полувагона методом стереофотограмметрии

№ 5 (108) С. 135–141

Махутов Н. А., Гаденин М. М., Коссов В. С., Князев Д. А., Красюков Н. Ф.

Развитие риск-ориентированных подходов к определению повреждаемости и ресурса объектов железнодорожного транспорта

№ 4 (107) С. 80–87

Рейес Суарес Яриан, Балабин В. Н., Морехон Меса Яной

Выбросы загрязняющих газов (СО и СО₂) при использовании топливных смесей (этанол-бензин) в двигателях внутреннего сгорания

№ 4 (107) С. 106–110

Саргина А. В., Седова Н. В.

Отслеживание доступности показателей по ЦУР 9.1 по транспортной инфраструктуре на примере стран-участников G20

№ 1 (104) С. 102–109

Филиппов В. Н., Недорчук Б. Л., Петров А. А., Курзина Е. Г.

Технические и нормативно-правовые аспекты обеспечения безопасности перевозки опасных грузов 2–3 класса опасности в вагонах-цистернах

№ 2 (105) С. 110–120

Цховребов Э. С.

Новые подходы к повышению защищённости городской среды от транспортных аварий на основе использования безопасных материалов

№ 1 (104) С. 110–116

Цыганов А. В., Осинцев Н. А., Рахмангулов А. Н., Зенкин А. А.

Критерии устойчивости контрейлерной системы

№ 5 (108) С. 126–134

КОЛЕСО ИСТОРИИ

Двадцатипятилетие инженерной и учёной деятельности

Н. А. Белелюбского (доклад А. Н. Горчакова в Императорском Русском техническом обществе в 1892 году). Пресс-архив

№ 4 (107) С. 133–140





Епишкин И. А., Карпов Л. А., Будицкий Е. Г.

55 лет в авангарде дополнительного профессионального образования на транспорте

№ 2 (105) С. 122–131

Куанышев Б. М.

Вспоминая научную Alma mater

№ 6 (109) С. 138–145

Куликова Е. Б., Енова Л. Е.

Памяти студентов МИИТ – бойцов 19 отдельного батальона ВНОС посвящается...

№ 1 (104) С. 118–125

Курганов В. М., Грязнов М. В., Дорофеев А. Н.

Исследование онтологии логистики историко-генетическим методом

№ 3 (106) С. 124–132

Левин Д. Ю.

С. Ю. Витте – создатель теории железнодорожных тарифов. Часть 1.

№ 5 (108) С. 150–154

Левин Д. Ю.

С. Ю. Витте – создатель теории железнодорожных тарифов. Часть 2.

№ 6 (109) С. 146–158

Мачерет Д. А.

Роль транспорта в формировании «эффекта выдвигения» в древних и средневековых обществах

№ 4 (107) С. 112–121

Проект положения о движении поездов по русским железным дорогам (паровозным), открытым для общественного пользования (1892 год). Пресс-архив

№ 1 (104) С. 126–132

Северный Сибирский торговый путь и Полярно-Уральская железная дорога. Часть 1. Пресс-архив

№ 2 (105) С. 132–136

Северный Сибирский торговый путь и Полярно-Уральская железная дорога. Часть 2. Пресс-архив.

№ 3 (106) С. 133–144

Семенов Н. М.

Как сохраняли раритеты транспорта

№ 4 (107) С. 122–132

КНИЖНАЯ ЛОЦИЯ

Глушаченко С. Б., Зелепукин Р. В.

Военно-правовые знания для будущих работников сферы транспорта (рецензия на трёхтомную монографию «Военное право»)

№ 1 (104) С. 134–137

Ефанов Д. В.

Безопасные железные дороги (рецензия на монографию «Функциональная безопасность систем управления на железнодорожном транспорте»)

№ 6 (109) С. 160–162

Каргина Л. А.

Управление дорогами с математической точностью

№ 4 (107) С. 142–145

Ларин О. Н.

Транспортные системы крупных городов: вопросы эффективности

№ 2 (105) С. 138–142

Чернигина И. А.

Лекарство от «головной боли» железнодорожников (рецензия на монографию «Экономическая оценка сезонной неравномерности перевозок»)

№ 5 (108) С. 156–158

АВТОРЕФЕРАТЫ ДИССЕРТАЦИЙ

№ 1 (104) С. 138–143, № 2 (105) С. 143–149, № 3 (106) С. 146–152, № 4 (107) С. 146–150, № 5 (108) С. 159–162, № 6 (109) С. 164–168

НОВЫЕ КНИГИ О ТРАНСПОРТЕ

№ 1 (104) С. 144, № 2 (105) С. 150, № 3 (106) С. 152, № 4 (107) С. 150, № 5 (108) С. 162, № 6 (109) С. 168



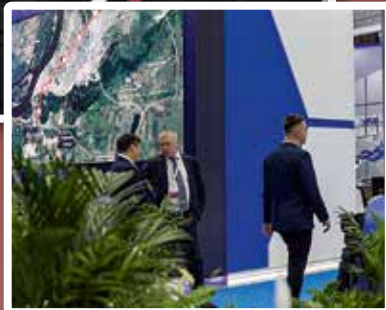
XVII Международный форум и выставка «Транспорт России»

С 14 по 16 ноября 2023 года в рамках «Транспортной недели» в Москве прошел XVII Международный форум и выставка «Транспорт России» – главное деловое событие отрасли в стране. Традиционно программу «Транспортной недели» открыли XIII Международная спартакиада студентов транспортных вузов и Международный фестиваль творчества студентов транспортных вузов «ТранспАрт».

15 ноября форум и выставку посетил Председатель Правительства РФ Михаил Мишустин. Глава Правительства осмотрел экспозиции крупнейших организаций транспортного комплекса, заслушал доклады руководителей предприятий о последних достижениях отрасли. Также Михаил Мишустин вручил государственные награды отличившимся представителям транспортного комплекса и выступил на пленарной дискуссии «Россия 2035: к новой экономике транспорта».

Глава Правительства подчеркнул, что несмотря на санкционные вызовы, транспорт динамично движется вперед, обеспечивая надежное снабжение промышленного сектора, бизнеса и граждан всеми необходимыми товарами и услугами. «В условиях формирования нового многополярного мира нам удалось достаточно быстро перестроить внешнюю торговлю, развернуть грузовые потоки на юг и восток. И важно завершить начатые системные преобразования. Для этого в течение ближайших лет на финансирование государственной программы развития транспортной системы в федеральном бюджете предусмотрено около 1,5 трлн рублей ежегодно», – сказал он.

Помощник Президента Российской Федерации Игорь Левитин отметил, что несмотря на все сложности транспортный комплекс выполнил все стратегические задачи. «Благодаря транспортному комплексу и быстрой смене логистических



цепочек увеличился грузопоток. Сейчас надо заниматься вопросами развития новых коридоров», – добавил он.

Первый заместитель Председателя Правительства Андрей Белоусов затронул вопрос развития трех основных транспортных коридоров – Север-Юг, а также Азово-Черноморского и Восточного направлений.

Министр транспорта Российской Федерации Виталий Савельев рассказал о развитии транспортного комплекса в будущем. «На мой взгляд, будущее в первую очередь заключается в обеспечении связанности наших территорий транспортом, работающим на принципиально новых технологиях и решениях... Наступает время новых технологий, искусственного интеллекта и беспилотных систем».

В рамках различных дискуссионных форматов участники деловой программы форума обсудили такие приоритетные для отрасли направления как строительство автомобильных дорог, развитие транспортно-логистических коридоров, обеспечение безопасности на транспорте, строительства портовой, железнодорожной и воздушной инфраструктуры, пассажирские перевозки по внутренним водным путям, автомобильное сообщение, а также вопросы цифровизации, кадрового обеспечения и научного сопровождения транспортного комплекса.

В отраслевых форматах приняли участие свыше 320 спикеров, общее количество участников деловой программы превысило 3 700 человек. В течение трех дней было проведено свыше 20 деловых форматов, которые в режиме онлайн посмотрели 440 000 раз. В рамках форума подписано 36 знаковых соглашений. Мероприятие посетили 17 руководителей субъектов, делегации 70 российских регионов, а также 10 иностранных делегаций. Участниками стали также 970 компаний и организаций отрасли. Общая площадь выставки составила 3 900 м², участниками стали 87 экспонентов. За 3 дня выставку посетили более 10 000 человек, информационное сопровождение осуществляли свыше 700 журналистов из 244 средств массовой информации.

**По материалам пресс-центра
Министерства транспорта
Российской Федерации:**

<https://mintrans.gov.ru/press-center/news/10992>, <https://mintrans.gov.ru/press-center/news/10978>,
<https://mintrans.gov.ru/press-center/news/10984>, <https://mintrans.gov.ru/press-center/news/10978>,
<https://mintrans.gov.ru/press-center/news/10976> ●



17th Transport of Russia International Forum and Exhibition

The 17th Transport of Russia International Forum and Exhibition, the main business event of the industry in the country, was held in Moscow from 14 to 16 November, 2023, as part of the yearly Transport Week. Traditionally, the program of the Transport Week was opened by the 13th International Sport Games of Students of Transport Universities and the International Festival of Creativity of Students of Transport Universities «TranspArt».

On November 15, the forum and exhibition were visited by the Prime Minister of the Russian Federation Mikhail Mishustin. The Prime Minister toured the expositions of the largest transport companies and heard reports from the CEOs of transport enterprises on the latest achievements in the industry. Mikhail Mishustin also rewarded representatives of the transport sector with state awards and spoke at the plenary discussion «Russia 2035: Towards a New Transport Economy».

The Head of Government stressed that despite the sanction challenges, transport is dynamically moving forward, ensuring

a reliable supply of the industrial sector, business, and citizens with all the necessary goods and services. «In the context of the formation of a new multipolar world, we managed to quickly restructure foreign trade, turn cargo flows to the South and East. And it is important to complete the system transformations that have begun. To this end, over the next few years, about 1,5 trillion rubles will be allocated annually in the federal budget to finance the state program for the development of the transport system,» he said.

Igor Levitin, Aide to the President of the Russian Federation, noted that despite all the difficulties, the transport complex has fulfilled all its strategic objectives. «Thanks to the transport industry and the rapid change of logistics chains, cargo traffic has increased. Now we need to deal with the development of new corridors,» he added.

First Deputy Prime Minister Andrei Belousov touched upon the development of three main transport corridors – the North–South, as well as towards the Azov–Black Sea and Eastern directions.



Vitaly Savelyev, Minister of Transport of the Russian Federation, spoke about the development of the transport complex in the future. «In my opinion, the future is, first of all, in ensuring the connectivity of our territories with transport operating on fundamentally new technologies and solutions... It's time for new technologies, artificial intelligence and unmanned systems.»

Within the framework of various panel formats, the participants of the business program of the forum discussed such priority areas for the industry as the road construction, the development of transport and logistics corridors, ensuring transport safety and security, the construction of port, railway and aviation infrastructure, passenger transportation by inland waterways, road transportation, as well as issues of digitalisation, staffing and scientific support of the transport system.

More than 320 speakers took part in industry formats, the total number of participants in the business program exceeded 3,700 people. Over the course of

three days, more than 20 business events were held, which were viewed 440,000 times online. Within the framework of the forum, 36 landmark agreements were signed. The event was attended by 17 heads of regions, delegations from 70 Russian regions, as well as 10 foreign delegations. 970 companies and organisations of the industry also took part in the event. The total area of the exhibition was 3,900 m², 87 exhibitors took part. For 3 days, the exhibition was visited by more than 10,000 people, information support was provided by more than 700 journalists from 244 media outlets.

Compiled basing on the news released by the press centre of the Ministry of Transport of the Russian Federation: <https://mintrans.gov.ru/press-center/news/10992>, <https://mintrans.gov.ru/press-center/news/10978>, <https://mintrans.gov.ru/press-center/news/10984>, <https://mintrans.gov.ru/press-center/news/10978>, <https://mintrans.gov.ru/press-center/news/10976> ●



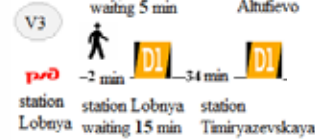
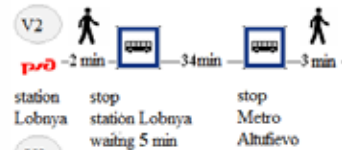
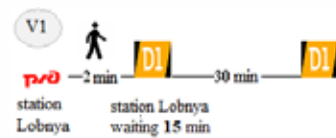
DIGITAL TWINS 176

Analysis of methods of creation of digital twins of water areas and research on optimal tools as condition for development of river autonomous navigation.

SINGLE BACKBONE TRANSPORT NETWORK 183

Methodological rationale of its development and prioritisation of infrastructure projects: theory, techniques, calculations.

THEORY



PUBLIC TRANSPORT 191

Methodology for comprehensive assessment of quality from customer's perspective, criteria, priorities, complicity and sensitivity in selecting optimal route. The impact of the assessment on public transport operations.





ORIGINAL ARTICLE

DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-6-1>World of Transport and Transportation, 2023,
Vol. 21, Iss. 6 (109), pp. 176–182

Methods for Development of a Digital Twin of the Water Area for Navigation of Unmanned Vessels



Igor N. ROSENBERG



Sergey S. SOKOLOV



Irina A. DUBCHAK

Igor N. Rosenberg¹, Sergey S. Sokolov², Irina A. Dubchak³^{1, 2, 3} Russian University of Transport, Moscow, Russia.¹ ORCID 0000-0001-9589-6783; Scopus Author ID: 15136568900; Russian Science Citation Index SPIN-code: 2958-4186; Russian Science Citation Index Author ID: 652172.² ORCID 0000-0002-4581-2518; WoS Researcher ID: A-9507-2015; Scopus Author ID: 56606754000; Russian Science Citation Index SPIN-code: 3175-5350, Russian Science Citation Index Author ID: 207642.³ Russian Science Citation Index SPIN-code: 1330-5849; Russian Science Citation Index Author ID: 1152475.✉ ³ info@science-rut.ru.

ABSTRACT

The article discusses a set of methods with which it is possible to form a digital twin of the water area for autonomous navigation of a river vessel to solve problems of modelling movement in the water area of an autonomous vessel under various environmental parameters (flow velocity, wind speed, etc.), including dynamically changing ones within the process of vessel's movement, to test algorithms for operation of an autonomous vessel under the conditions of emerging threats and emergency incidents. The proposed methods include aerial photography from unmanned aerial systems, airborne laser scanning and coordination of the results of their processing

using geodetic equipment operating using global navigation satellite systems and serving to link all received spatial data into a single coordinate system to form high-precision digital twin components of water area, including the water's edge and part of surface elements.

To form the bottom part of a digital twin of the water area, a possibility was considered to use bathymetric survey data collected with a multibeam echosounder, as well as aerial photography data received from an unmanned aerial vehicle equipped with a high-precision geodetic receiver and an on-board inertial system for laying out bathymetric survey routes.

Keywords: digital twin of the water area, autonomous navigation, digital terrain model, digital bottom model, airborne laser scanning, aerial photography, water transport.

For citation: Rosenberg, I. N., Sokolov, S. S., Dubchak, I. A. Methods for Development of a Digital Twin of the Water Area for Navigation of Unmanned Vessels. World of Transport and Transportation, 2023, Vol. 21, Iss. 6 (109), pp. 176–182. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-6-1>.

The text of the article originally written in Russian is published in the first part of the issue.

Текст статьи на русском языке публикуется в первой части данного выпуска.

INTRODUCTION

Currently, there is a growing interest in creation of automated unmanned (crewless) vessels all over the world [1]. Controlling an unmanned vessel is a complex technical problem, one of the components of which is a digital twin of the water area (DTWA), which contains all the data required for navigation of unmanned (autonomous) vessels [2].

In 2002, the concept of the digital twin was initially introduced as the model focused on the information about a product [the model was then referred to as «Mirrored Spaces Model»] by Michael Grieves, Professor at the University of Michigan [3, 4]. The term «digital twin» (DT) was officially adopted in 2010 when the US National Aeronautics and Space Administration (NASA) provided a detailed concept. This description refers to the integrated use of physical models, sensors, historical operational data, and additional relevant information to model interdisciplinary and multiscale processes. The goal is to create a virtual representation that can reflect the entire life cycle of the corresponding physical object [5]. Essentially, the proposed DT model includes three main components: a physical product, a virtual product, and the relationship between these two products.

Although the concept of the DT initially emerged in the aerospace and manufacturing fields, it has since evolved to extend its application to intangible processes such as smart cities [6], precision (personalised) medicine [7–9], Digital Earth, and even the metaverse [10–14]. DT was included in the top ten key technology trends in the digital industry in 2019 according to Gartner [15]. A striking example of the application of DT is the «Destination Earth» project, initiated by the European Union in March 2021. This initiative aims to create an extremely accurate Earth DT for continuous and accurate monitoring of the planet's health. Besides, it aims to promote high-precision forecasting of natural disasters and anthropogenic environmental degradation, as well as to study the socio-economic impacts of climate change and major natural disasters [13].

With development of DT technology, its range of applications has been gradually expanding to include the marine environment, thereby facilitating the emergence of a Digital Twin of the Ocean. To date, many applications of DT have been implemented under various scenarios [16]. For example, real-time DT systems for marine vessel operations have been developed using wave reconstruction and ship motion forecasting [17]. Application of DT technology allows creating high-fidelity modelling systems for underwater unmanned gliders [18].

Russian state standard (GOST) defines a «digital twin of a product» as «a system consisting of a digital model of a product and two-way information links with the product (if there is a product) and (or) its components»¹. If we expand the concept of a digital twin beyond the scope of a «product», then the definition of «a digital twin as a digital (virtual) model of any objects, systems, processes or people, accurately reproducing the form and actions of the original and synchronised with it»², has become recognised. A digital twin is necessary «to simulate processes in the original object under certain conditions»².

According to the definition given in the Water Code of the Russian Federation, a water area is «a water space within natural, artificial or conditional boundaries», that is, some water surface limited conditionally or physically. However, the navigation process uses primarily information about the depths of the water area, bottom topography, flows, coastal navigational signs, obstacles, etc.

It follows that a digital twin of a water area is a copy made in a virtual environment of the underwater and coastal parts of the water area, as well as its water column, sufficient as for its completeness and reliability for autonomous navigation, and which is a synthesis of 3D models of these parts, cartographic and semantic information about objects located on them and dynamic processes occurring on their territory.

With the help of DTWA, it is possible to solve a range of problems, comprising, for example, modelling the movement in the water area of an autonomous vessel under various environmental parameters (flow velocity, wind speed), including those dynamically changing during movement, testing algorithms for operation of an autonomous vessel under the conditions of emerging threats and emergencies [19], modelling vessel routes depending on tasks (fastest route, most economical route), use in navigation for precise positioning of the vessel by comparing data from external sensors with data from the DTWA data [20] and for choosing further actions depending on the situation and current tasks.

The objective of the study was to reveal a set of methods which allow to form a digital twin of the water area for autonomous navigation of a river

¹ GOST R [State Standard] 57700.37–2021 «Computer models and simulation. Digital twins of products. General provisions».

² What are digital twins and where are they used // RBC Trends. [Electronic resource]: <https://trends.rbc.ru/trends/industry/6107e5339a79478125166eeb?from=copy>. Last accessed 22.12.2023.



vessel, to solve problems of modelling movement in the water area of an autonomous vessel under various environmental parameters, including dynamically changing ones within the process of vessel's movement

RESULTS

Objects and Structure of the Digital Twin of the Water Area

For successful functioning of DTWA, it should be filled with all the data used for vessel navigation. The main requirement for DTWA data is that all data must be interconnected and located in a single coordinate system. The components of DTWA in relation to changes in coordinates in space and their shape are divided into static, transitional and dynamic ones. Besides, within DTWA, dynamic objects depend on factors which are variable quantities that influence the state of the object.

Static DTWA objects include objects that do not change their spatial position. These include most man-made objects – bridges, piers, navigational signs, dams, etc. Also, in most cases, the coastline can also be classified as a static object.

Transitional DTWA objects include objects that are able to change their shape and coordinates over time. As a rule, these are objects that move and change shape in rivers under the influence of channel flows. Also, transitional objects should include some of the man-made objects, such as buoys, buoys, marks, etc. that change their position depending on the wind and flow, as well as with each new navigation due to errors in place where the floating mark is anchored.

Dynamic DTWA objects include objects moving within the water area: vessels, ferries, floating obstacles, etc. The movement of dynamic objects depends on factors which are variables influencing the state of the object: velocity and direction of flow and wind.

The components of DTWA are combined into a single data structure, which is a collection of data elements between which certain connections are established, as well as a method to organise data for more efficient use. The data structure within the digital twin of the water area represents attribute information embedded in each layer of each component.

Layers or objects are indicated by the following three types of signs: area (polygonal), linear, and point ones.

Area signs mark objects depicted on a map scale, that is, those whose dimensions (length, width and area) can be measured on the map, for example,

a large lake, river, etc. Regulatory documents previously gave the following definition: «An area sign consists of an outline the depicted object and of the background colouring, colour shading or grid of identical icons filling it. The outline of objects is shown on the map with solid lines or dotted lines in accordance with their outlines on the ground»³.

Linear symbols depict narrow, extended objects, the width of which can be neglected on the map scale, and the lengths of which are expressed on the map scale (railway tracks, roads, watercourses, power lines, product pipelines and other objects).

Point objects are objects located only at one point in space on a map scale (lonely trees, houses, wells, points of the state geodetic network). Point objects can be designated by the coordinates of their location.

Depending on the required scale of the plan being formed, the same object can be depicted in different ways, that is, when creating a large-scale plan, the object can be indicated by an area symbol, and when creating a small-scale plan, it can be indicated by a point symbol.

Each layer contains its own attribute information, which in turn is divided into 2 types: positional and non-positional.

Positional information describes the position of objects in space in two-dimensional or three-dimensional coordinates.

Non-positional information includes qualitative characteristics of objects (semantic data) and quantitative ones (statistics). Non-positional information is represented as text and/or numeric parameters. In most cases, when working directly with data, the type of object is marked and identified by its attribute parameters (for example, a bridge has a name and is identified by construction materials (reinforced concrete, metal, stone, wood), width, height, presence of navigable spans, number of navigable spans).

Thus, the attribute information of objects of various components of DTWA will contain the following data:

- Positional data – the position of an object in space: X , Y , Z . This type of information is most applicable to point objects, however, for area and linear objects it is also possible to display spatial information as attributes by creating a separate point layer with vertices extracted from a polygon or line.

³ Order of the Ministry of Regional Development of the Russian Federation dated January 31, 2007, No. 4 «On approval of the Requirements for methods of displaying point, linear and area objects on maps (diagrams) provided for by the Regulations on the composition of territorial planning schemes of the Russian Federation».

- Non-positional data – semantic and statistical description of an object: object number, object name, object characteristics, connection with the spatial nature of the object (area, perimeter, width, height).

Methods for Forming a Digital Twin of the Water Area

The collection of spatial data to form a digital twin of the water area is carried out simultaneously with several techniques: by airborne laser scanning, aerial photography, ground geodesy and bathymetric survey.

Airborne laser scanning, aerial photography, and ground geodesy are used to create elements of the coastal and surface parts of DTWA, while bathymetric survey is used for underwater part of DTWA.

Airborne laser scanning

Airborne laser scanning (ALS) or lidar survey is a technology that allows creating digital terrain models, digital relief models and three-dimensional models of objects based on the obtained point clouds.

This method is the fastest, most complete and reliable way to collect spatial-geometric information about the area. The essence of the airborne laser scanning method is the process of recording the X , Y , Z coordinates for each reflection. Due to this, the result is a spatially defined terrain model.

The airborne laser scanning method is carried out using a rotating mirror on the lidar module, the angle of rotation of which is measured by an encoder mounted on the rotation axis of the mirror. An encoder is a rotary sensor that has a special turntable, divided into sectors, due to which this design allows quickly determining the angle of rotation. When the aircraft moves, the scanning laser beam is directed at various terrain objects in a plane perpendicular to the axis of rotation of the mirror. The reflected signal of the scanning laser beam hits the mirror and is recorded by the radiation receiver, and then converted into the usual coordinates X , Y , Z .

The result of airborne laser scanning is a cloud of laser reflection points (LRP), which is subsequently converted into a point cloud with sufficient density for subsequent creation of digital models.

One of the most important stages of ALS data processing is dense cloud classification. This process allows dividing the point cloud into classes, which further simplifies the process of working with data. The essence of classifying a dense point cloud is placing a group of points according to various criteria into a certain class. This process is automatic but requires control.

Aerial photography

«Modern aerial geodesy is based on methods for collecting geospatial information from moving carriers, that is on digital aerial and space photography, methods of direct geopositioning and methods of digital transformation of the results of conditionally static and dynamic surveys of objects to their static models in a given coordinate system» [21].

«An orthophotoplan is a photographic plan of the area with an accurate geodetic reference, obtained by aerial photography with subsequent conversion of aerial photographs (from a central projection to an orthogonal one) based on an effective method of their differential orthophototransformation» [22] and is a topographic digital photoplan compiled from orthophotos obtained following orthorectification. An orthophotoplan is created within the framework of nomenclature sheets or within specified boundaries and is characterised by a certain nominal spatial resolution.

The process of creating an orthophotoplan consists of several stages: phototriangulation, linking with ground-based control, clarification of external orientation parameters of images, orthorectification of images [23].

The final stage in constructing an orthophotoplan is orthorectification of images. Orthorectification is a mathematically rigorous transformation of the original image (shot) into an orthographic projection and elimination of distortions caused by terrain, shooting conditions and camera type.

Ground geodetic control

To accurately link airborne laser scanning and aerial photography, it is necessary to perform a geodetic control of the coastal part of DTWA test site by measuring the respective coordinates of the centres of aerial survey ground control points within the territory of airborne laser scanning and aerial photography. It requires preliminary placement of those ground control points intended for aerial survey at points with known coordinates for the purpose of subsequent accurate coordinate reference of the results of photogrammetric processing of airborne laser scanning and aerial photography materials.

It is recommended to use as those ground control points the objects that have «unchangeable outline on the ground, are contrast with the surrounding background and are clearly visible on aerial photographs». «It is recommended to reliably mark ground control points. If necessary, ground control points are painted on the road surface. The shape of a ground control point must ensure an unmistakable determination of its centre», and therefore it is



recommended to use «ground control points such as «target», half-cross or cross»⁴.

The location of ground control points for aerial survey must comply with the principles below:

- On rectangular areas, ground control points are located according to the «envelope» pattern, which provides for installation of at least five control points; four control points are installed at the corners of the rectangle, and one is placed in the area where the diagonals intersect. With an increase in the geometric complexity of the boundaries of aerial photography area, in the complexity of building area and terrain, the number of control points should increase with a uniform distribution within the survey area and in each corner zone (Pic. 1).

- When surveying a linearly extended object, ground control points are located in pairs at the beginning and end of the surveyed site and then along the site route at least every 500 m along the axis (Pic. 2).

- «When designing several flight missions with planned overlap zones, it is necessary to install at least 2 ground control points within the overlap zone. When the width of the overlap... is more than 1 km, it is recommended to install ground control points at least every 250 m»⁴.

- «In areas with a height difference of more than 20 m, it is recommended to install additional control points at characteristic turning points»⁴.

- The preferred placement of control points is at ground level.

- There should be no objects above the control point that block it from aerial photography at nadir point, including trees, contact networks and power line wires.

- No control points should be placed near high objects, including fences, poles, trees, etc.

It is advisable to measure the coordinates of the centres of ground control points using geodetic-grade GNSS equipment in the differential correction mode to reduce the measurement time.

Differential correction is a technique for improving the accuracy of GNSS data collected. The differential correction method consists of improving the accuracy of the GNSS receiver by taking into account navigation corrections received from third-party sources. As a rule, to single out corrections, a GNSS receiver is used that is fixedly located at a point with known

coordinates (base station). This allows to isolate the «noise» of the main signal due to various distortions (inhomogeneity of the atmosphere, interference from static and moving objects, signal reflections), generate corrections and transmit them via a communication channel to a second mobile receiver (rover), used to measure points with unknown coordinates, which allows eliminating errors in the coordinates obtained on the mobile receiver and determining its coordinates with greater accuracy.

The essence of performing real-time GNSS geodetic measuring (RTK, Real Time Kinematic) is that the base station receives differential corrections from each satellite in orbit to which it is connected, processes these differential corrections online, and transmits them (via mobile or radio communications) to the rover.

As a result of these actions, the rover, which has received corrections, automatically refines its location, displays differentially corrected coordinates on the screen, and records these coordinates into the catalogue when performing direct measurements.

In the case of GNSS measurements followed by office processing with PPK (Post-Processed Kinematics), the base station records all differential corrections received from the satellite, while the rover records telemetry.

Further, in office conditions, the file with differential corrections is combined with the rover telemetry using specialised software, an ephemeris file is added to them, and processing is performed.

This results in a catalogue of refined geodetic measurements.

It is also possible to post-process GNSS measurements taken in RTK mode in case the signal transmitting differential corrections from the base station to the rover is interrupted. The rover, even after signal loss, will continue to record telemetry data, which will allow post-processing to obtain a catalogue of measured points.

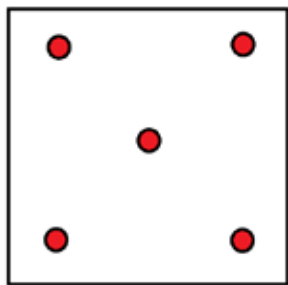
Bathymetric survey

Bathymetric surveys on water bodies (rivers, lakes, reservoirs and in the coastal zone of the sea) are carried out to map the bottom topography. Depending on the expected complexity of the bottom topography, a network of measurement points is formed along which depths are subsequently measured.

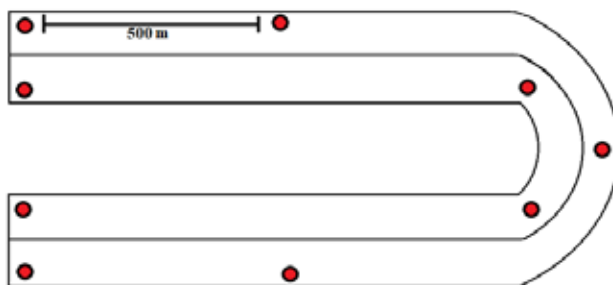
Survey is made along routes located in such a way as to minimise the workload while respecting a given accuracy of underwater relief surveying [24].

Optimisation of bathymetric survey routes can be carried out on the basis of aerospace survey, since

⁴ ODM 218.9.017–2019. Road Industry Methodological Document. Methodological recommendations for performance of aerial phototopographic works using unmanned aerial vehicles during surveys for the purpose of construction and reconstruction of highways. Federal Road Agency (ROSAVTODOR). Moscow, 2021.



Pic. 1. Location of ground control points for the area aerial photography [performed by the authors].



Pic. 2. Location of ground control points for the corridor aerial photography [performed by the authors].

the visible part of the solar spectrum is well transmitted by water and, as a result, allows one to estimate the depth with good accuracy [25]. Limiting factors for determining bottom relief using aerospace methods include water transparency (turbidity), lack of good lighting, and the presence of disturbances (ripples) on the water surface.

Modern bathymetric survey is carried out, as a rule, using a multibeam echosounder (MBES) [26], which performs three-dimensional mapping of the bottom topography based on data from sonar scanning the bottom in a plane perpendicular to the direction of movement of the carrier. At the same time, for correct binding of bathymetric survey data, the MBES carrier must accurately determine its position in space. Determination of the carrier's position in space is carried out, as a rule, using GNSS methods, either in RTK or PPK mode.

Modern hydroacoustic equipment, together with «software for hydrographic works, makes it possible to collect and process data on the bottom topography with high accuracy» [27]. Hydroacoustic equipment can be installed on «hydrographic and specialised vessels,.. autonomous and remotely controlled underwater vehicles» [27].

«The data collected and processed by the onboard hydroacoustic system characterise the unique features of the bottom topography, usually represented by an array of depths with geographic coordinates. The obtained depth values are characterised by uncertainties caused by the difference between the calculated and actual values of the speed of sound in water, and due to acoustic dispersion and absorption by bottom soil» [27].

MBES is one of the most modern, effective and most informative systems for performing area hydroacoustic surveys and thus merits attention regarding its use for navigation purposes of unmanned autonomous vessels.

The MBES sensor is mounted on the bottom of the vessel. Such a location helps obtaining more accurate data and reduces the impact of various noise

and distortions on the signal. The installed MBES, using transducers, emits short acoustic pulses in the direction of the bottom of the water area, forming radiation patterns: wide (120° – 150°), located perpendicular to the vessel's progress, and narrow one (about 1° for high-precision systems), located along the vessel's course.

«Thus, the system performs spatial filtering of acoustic pulses reflected from various discrete areas of the bottom of the water area along the scan path, called irradiation spots, or beam flare spots» [28]. So, based on the delay time of the acoustic pulse and the angle of arrival of the beam, the bottom topography digital twin is formed.

BRIEF CONCLUSIONS

Thus, to create a digital twin of the water area, it is advisable to use combined methods of collecting information. To form the coastal part of DTWA and surface elements, it is effective to use a point cloud and three-dimensional models constructed from aerial photography and airborne laser scanning data with georeferencing based on ground control points measured by geodetic GNSS receivers. Besides, aerial photography data can be used to plot bathymetric survey routes.

To form the bottom part of DTWA, it is advisable to use MBES bathymetric survey data.

REFERENCES

1. Kirillova, M. A., Rozhko, A. I. Prospects for development of unmanned ships in Russian Federation [Perspektivy razvitiya bezekipaznykh sudov v Rossiiskoi Federatsii]. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies*, 2020, Iss. 3, pp. 16–22. DOI: <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2020-3-16-22>
2. Titov, A. V., Barakat, L., Khaizaran, A. Status and perspectives of e-navigation technology implementation. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova*, 2019, Vol. 11, Iss. 4, pp. 621–630. DOI: [10.21821/2309-5180-2019-11-4-621-630](https://doi.org/10.21821/2309-5180-2019-11-4-621-630).
3. Grieves, M. W. Product lifecycle management: the new paradigm for enterprises. *International Journal of Production Development*, 2005, Vol. 2, Iss. 1–2, pp. 71–84. DOI: <https://doi.org/10.1504/IJPD.2005.006669>.



4. Grieves, M. W. Digital Twins: Past, Present, and Future. In: *The Digital Twin*. Springer International Publishing, Cham, 2023, pp. 97–121. DOI: 10.1007/978-3-031-21343-4.
5. Glaessgen, E. H., Stargel, D. S. The Digital Twin Paradigm for Future NASA and U. S. Air Force Vehicles. *Structural Dynamics and Materials Conference*, Honolulu, 2012, 1818. DOI: 10.2514/6.2012-1818.
6. Qi, Y., Li, H., Pang, Z., Gao, W., Liu, C. A Case Study of the Relationship Between Vegetation Coverage and Urban Heat Island in a Coastal City by Applying Digital Twins. *Frontiers in Plant Science*, 2022, Vol. 13, 861768. DOI: 10.3389/fpls.2022.861768.
7. Torkamani, A., Andersen, K. G., Steinhubl, S. R., Topol, E. J. High-Definition Medicine. *Cell*, 2017, Vol. 170, Iss. 5, pp. 828–843. DOI: 10.1016/j.cell.2017.08.007.
8. Rozenberg, O., Greenbaum, D. Making It Count: Extracting Real World Data from Compassionate use and Expanded Access Programs. *American Journal of Bioethics*, 2020, Vol. 20, Iss. 7, pp. 89–92. DOI: 10.1080/15265161.2020.1779857.
9. Barat, S., Parchure, R., Darak, S., Kulkarni, V., Paranjape, A., Gajrani, M. [et al]. An Agent-Based Digital Twin for Exploring Localized Non-Pharmaceutical Interventions to Control COVID-19 Pandemic. *Transactions of the Indian National Academy of Engineering*, 2021, Vol. 6, Iss. 2, pp. 323–353. DOI: 10.1007/s41403-020-00197-5.
10. Tao, F., Zhang, H., Nee, A. Y. C., Liu, A. Digital Twin in Industry: State-of-the-Art. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2019, Vol. 15, Iss. 4, pp. 2405–2415. DOI: 10.1109/TII.2018.2873186.
11. Huang, S., Wang, G., Yan, Y., Fang, X. Blockchain-based data management for digital twin of product. *Journal of Manufacturing Systems*, 2020, Vol. 54, pp. 361–371. DOI: 10.1016/j.jmsy.2020.01.009.
12. Shen, W., Hu, T., Zhang, C., Ma, S. Secure sharing of big digital twin data for smart manufacturing based on blockchain. *Journal of Manufacturing Systems*, 2020, Vol. 61, pp. 338–350. DOI: 10.1016/j.jmsy.2021.09.014.
13. Bauer, P., Stevens, B., Hazeleger, W. A digital twin of Earth for the green transition. *Nature Climate Change*, 2021, Vol. 11, pp. 80–83. DOI: 10.1038/s41558-021-00986-y.
14. Wu, Y., Zhang, K., Zhang, Y. Digital Twin Networks: A Survey. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021, Vol. 8, Iss. 18, pp. 13789–13804. DOI: 10.1109/JIOT.2021.3079510.
15. Panetta, K. Gartner Top 10 strategic technology trends for 2019. October 15, 2018. [Electronic resource]: <https://www.gartner.com/smarterwithgartner/gartner-top-10-strategic-technology-trends-for-2019>. Last accessed: 02.11.2023.
16. Qu, Q., Nurgaliev, I., Muzammal, M., Jensen, C. S., Fan, J. On spatio-temporal blockchain query processing. *Future Generation Computer Systems*, 2019, Vol. 98, pp. 208–218. DOI: 10.1016/j.future.2019.03.038.
17. Lee, J.-H., Nam, Y.-S., Kim, Y., Liu, Y., Lee, J., Yang, H. Real-time digital twin for ship operation in waves. *Ocean Engineering*, 2022, Vol. 266, Part 2, 112867. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2022.112867.
18. Hu, S., Liang, Q., Huang, H., Yang, C. Construction of a digital twin system for the blended-wing-body underwater glider. *Ocean Engineering*, 2023, Vol. 270, 113610. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2022.113610.
19. Sorokin, A. Yu., Ivanov, E. V., Bezvesilnaya, A. A., Klimkin, A. A. On an approach to increasing the accuracy of digital terrain twins based on the analysis of digital spatial geodata [O podkhode k povysheniyu tochnosti tsifrovyykh dvoynikov relefa mestnosti na osnove analiza tsifrovyykh prostranstvennykh geodannykh]. *Scientific and educational problems of civil protection*, 2022, Iss. 1 (52), pp. 50–61. [Electronic resource]: <https://amchs.ru/upload/iblock/bba/ZHurnal-2022-1.pdf> [full issue]. Last accessed 23.11.2023.
20. Pinsky, A. S. E-navigation and unmanned navigation [E-navigatsiya i bezekipaznoe sudovozhdenie]. *Transport of the Russian Federation*, 2016, Iss. 4 (65), pp. 50–54. EDN: WMAHYT.
21. Zotov, R. V. Aerogeodesy: Study guide: in 2 books. Book 1 [Aerogeodeziya: Ucheb. posobie: v 2 knigakh. Kniga 1]. Omsk, SibADI publ., 2012, 216 p.
22. Great Soviet Encyclopedia [in 30 volumes]. Ch. ed. A. M. Prokhorov. 3rd ed. Moscow, Soviet Encyclopedia, 1969–1978.
23. Pavlovskiy, A. A., Karelov, A. I., Scheglov, M. A., Nuykin, A. V. Application of unmanned aircraft systems as part of topographic and geodetic survey in railway transportation. *Automation, communication and informatics*, 2021, Iss. 3, pp. 21–24. DOI: 10.34649/AT.2021.3.3.003.
24. Mustafin, M. G., Valkov, V. A., Pavlov, N. S., Vinogradov, K. P., Bogolyubova, A. A. Monitoring of water bodies by remote methods [Monitoring vodnykh obektov distantsionnymi metodami]. *Bulletin of Siberian State University of Geosystems and Technologies (SGUGiT)*, 2023, Vol. 28, Iss. 2, pp. 67–75. DOI: 10.33764/2411-1759-2023-28-2-67-75.
25. Tkachenko, K. S. Use of aerospace photography in hydrobiological research [Isopolzovanie aerokosmicheskoi semki v gidrobiologicheskikh issledovaniyakh]. *News of Samara Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences*, 2012, Vol. 14, Iss. 1, pp. 15–31. EDN: PDBWOJ.
26. Firsov, Yu. G. Basic requirements for ensuring the quality of modern bathymetric (topographic) survey [Osnovnie trebovaniya k obespecheniyu kachestva sovremennoi batimetriceskoi (topograficheskoi) s'emki]. *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova*, 2014, Iss. 3 (25), pp. 171–179. EDN: SFNIAF.
27. Popko, A. O. Taking into account the uncertainty of bottom surveying with a multibeam echo sounder when forming hydroacoustic images of the relief for navigational orientation purposes [Uchet neopredelennosti s'emki dna mnogoluchevym ekholotom pri formirovanii gidroakusticheskikh obrazov rel'efa dlya tselei navigatsionnogo orientirovaniya]. *National Association of Scientists*, 2015, Iss. 5–2 (10), pp. 76–80. EDN: YFTQHD.
28. Koloskov, E. N., Komipae, B. A. Methods for collecting seafloor backscatter data implemented in modern multibeam echo sounders [Sposoby sbora dannykh obratnogo rasseivaniya morskogo dna realizovannie v sovremennykh mnogoluchevykh ekholotakh]. *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova*, 2016, Iss. 6 (40), pp. 96–105. EDN: XHLRKY.

Information about the authors:

Rosenberg, Igor N., D.Sc. (Eng), Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Chief Scientific Officer of Russian University of Transport, Moscow, Russia, info@science-rut.ru.

Sokolov, Sergey S., D.Sc. (Eng), Associate Professor, Vice-Rector of Russian University of Transport, Moscow, Russia, sokolov.ss@miit.ru.

Dubchak, Irina A., Head of the Department of New Projects and Technologies of Russian University of Transport, Moscow, Russia, info@science-rut.ru.

Article received 02.11.2023, approved 24.12.2023, accepted 29.12.2023.

Approaches to Methodological Rationale of Development of Single Backbone Transport Network and Prioritisation of Transport Infrastructure Development Projects



Arthur V. KARLOV



Oleg V. EVSEEV

Arthur V. Karlov¹, Oleg V. Evseev²

¹ Russian University of Transport, Moscow, Russia.

² Scientific Centre for Complex Transport Problems of the Ministry of Transport of the Russian Federation, Moscow, Russia.

¹ ORCID 0000-0001-7147-8501; Russian Science Citation Index SPIN-code: 1409-3481; Russian Science Citation Index Author ID: 1080516.

² ORCID 0000-0002-2437-6497; Scopus Author ID 57215525670; Russian Science Citation Index SPIN-code: 9447-9075; Russian Science Citation Index Author ID: 187.

✉ ¹ karlov@edu.rut-miit.ru.

ABSTRACT

The article discusses approaches to rationale of the development of the Single Backbone Transport Network (SBTN), political, scientific and mathematical prerequisites for identifying key infrastructure elements. The Transport Strategy of the Russian Federation for the period until 2030 with a forecast until 2035 provides basic criteria for each of the backbone networks of modes of transport, while it is highlighted that the development of the SBTN is carried out using transport and economic balance tools. The article explores the possibilities for the practical application of scientific methods in the implementation of state transport policy based on the existing regulatory framework.

Selection of key (backbone) transport infrastructure is proposed to be made with the Kruskal's algorithm, as well as with corresponding optimisation methods using the principles of connectivity, alternativelessness and intensity. Description of the

construction of a connected network graph includes description of its edges and vertices as well. Application of the described algorithms results in construction of the segments of the SBTN forming a connected transport network that includes the core transport structural framework of the Single Network, as well as additional sections of the network that ensure the passage of traffic flows with the highest cargo and passenger turnover, which together satisfy the restrictive conditions on financing their maintenance and repair.

The proposed methodology can be used, e.g., in development of transport and economic balance tools, as well as of specialised software for modelling traffic flows.

Thus, the article presents a rationale for providing scientific advice and guidance in implementation of state transport policy intended to improve its quality by promoting an evidence-based approach.

Keywords: transport policy, transport infrastructure, public administration analysis, decision-making methods.

For citation: Karlov, A. V., Evseev, O. V. Approaches to Methodological Rationale of Development of Single Backbone Transport Network and Prioritisation of Transport Infrastructure Development Projects. *World of Transport and Transportation*, 2023, Vol. 21, Iss. 6 (109), pp. 183–190. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-6-2>.

The text of the article originally written in Russian is published in the first part of the issue.
Текст статьи на русском языке публикуется в первой части данного выпуска.

INTRODUCTION

In 2021, the Government of the Russian Federation approved a new edition of the country's Transport Strategy (hereinafter referred to as the Strategy) intended for the period until 2030 with a forecast until 2035. For the first time ever, the key document of the transport industry has laid the foundations for a system approach to managing the development of the sector: the development of the country's transport system should be carried out based on the priorities, rules and guidelines defined by the Strategy. The provisions of the Strategy are mandatory when making decisions for both the Federal Government and regional authorities, as well as for managers of enterprises in the transport industry.

The Strategy is a tool for implementing transport policy, which, in turn, when implemented with excellence relies on the so-called «evidence-based approach». The scientific studies in the field of public administration methodology considered this issue quite in detail [1], Russian scientists also explored it in relation to certain sectors of the economy [2]. It should be noted that the Strategy lays down the prerequisites for the use of such an approach, as well as of scientific methods in development of state transport policy. Thus, the most important innovation of the Strategy was introduction, definition and detailing of the Single Backbone Transport Network (hereinafter referred to as SBTN). According to the Strategy, the SBTN is «a balanced and connected transport network that combines the most important transport infrastructure facilities for all modes of transport and ensures the functional unity of the transport system, sustainable interconnection and spatial development of the largest populated areas, economic centres, main mineral resource and production zones, geostrategic territories, cultural heritage sites of the Russian Federation, the most popular tourism sites and recreational areas».

The Strategy provides basic criteria for each of the backbone networks of modes of transport, while highlighting that development of the SBTN is carried out using transport and economic balance tools: «Updating and adjusting the general scheme for development of the Single backbone network is carried out based on the transport and economic balance – a set of economic, mathematical and transport models characterising the dependence of

demand for transportation and its distribution by mode of transport on economic factors and parameters of infrastructure development».

Thus, the Strategy lays the foundations for applying an «evidence-based approach» to public policy. Similar approaches are being introduced in other sectors of the economy, which is also noted by Russian researchers. Besides, the Strategy has established the basic parameters of transport policy in the field of prioritising the expenditure of budget funds at all levels on modernisation, maintenance and development of certain transport infrastructure. This kind of prioritisation is the basis for further development of economic rationale of decision-making mechanisms in the transport industry and increase in the efficiency of the country's economy, including considering the need to improve the quality of investment decisions [3].

The current geopolitical situation and economic conditions require a transformation of the operating conditions of the transport industry, increase in the efficiency and consistency of state transport policy.

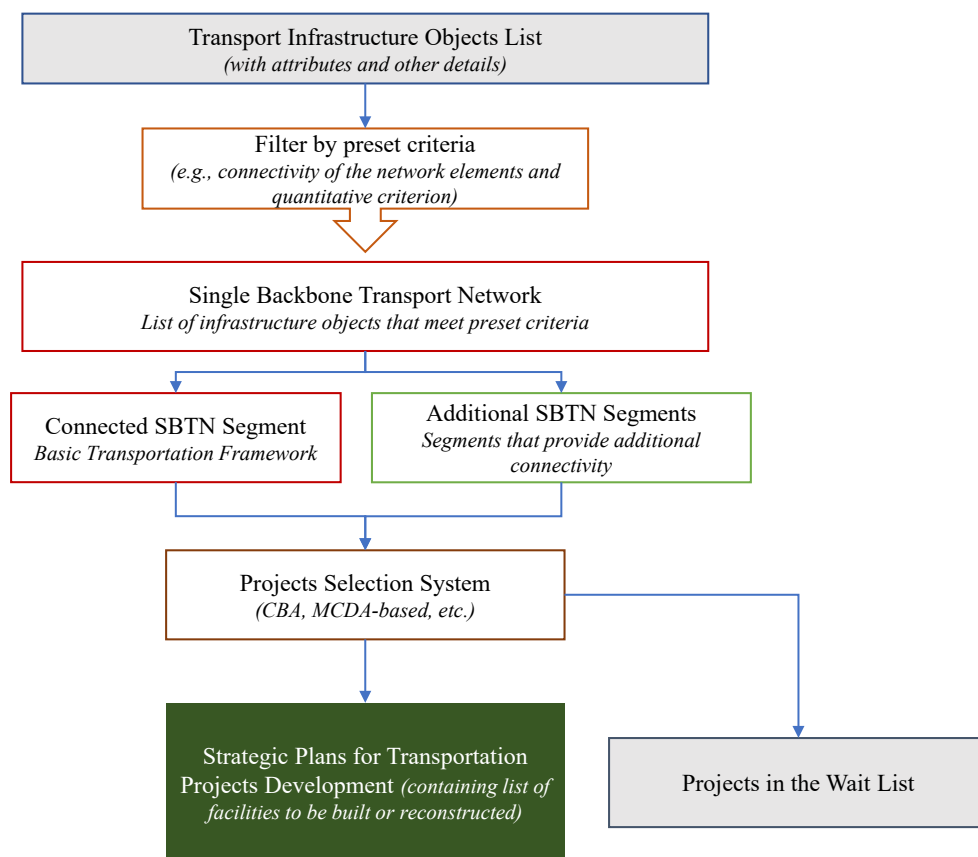
The rate of development of the transport system is directly related to the potential for economic development, which has been noted more than once in scientific studies conducted using various empirical approaches and other assessment methods [4–6].

The existing system of management of development of the transport industry does not fully ensure sufficient interconnection of development tasks of various modes of transport and the primary achievement of the end-to-end goal of ensuring connectivity and optimisation of all types of transport infrastructure, which is necessary for optimal distribution of cargo and passenger flows, considering current challenges and development tasks of the Russian Federation.

It seems that there is a demand for development of a rationale of development of the SBTN, which combines the most important transport infrastructure facilities for all modes of transport and ensures the functional unity of the transport system through the instruments of transport and economic balance, which provides for optimal planning of relevant infrastructure projects.

PROBLEM STATEMENT

Even though the Strategy describes in sufficient detail the criteria for selecting infrastructure facilities and sections for core



Pic. 1. A system for prioritising development projects in the transport industry based on the concept of a Single Backbone Transport Network [chart developed by the authors].

networks by mode of transport, the selection will require further detailing, clarification of the criteria and formalisation of the selection procedure itself to build a connected SBTN graph.

At the same time, it is necessary to establish decision-making procedures about which projects should be selected for the purpose of developing the SBTN. Selection procedures can be based on decision support tools: systems for ranking and selecting projects based on cost-benefit methods and multi-criteria selection [7].

Thus, within the framework of this study and for the purposes of this article, it is proposed to consider a two-stage decision-making system regarding the parameters for development of transport infrastructure in long-term industry development programs:

1. Narrowing of the number of alternatives in the selection procedure: prioritisation and selection of critical and promising infrastructure – its formalisation into the register (lists) of SBTN infrastructure.

2. Selection of measures for development of SBTN infrastructure according to their significance under the conditions of limited funding based on multi-criteria decision and cost-benefit analysis.

The selection procedure is shown schematically in Pic.1.

RESULTS

1. Methodological Approach to Development of SBTN Graph

For the purposes of selecting SBTN objects, we will propose the following methodological approach that clarifies the mechanisms of the Strategy.

The SBTN is divided into segments considering maximisation of operated traffic flows within the limits of restraints on maintenance and repair of transport infrastructure facilities.

Segments are formed in order of increasing volume of traffic flows passing through the network, within the limits of funding for its maintenance and repair.



To determine the boundaries of the SBTN, a network segmentation algorithm is proposed.

1) Segment 1 – the basic transport structural framework of the SBTN – a minimal connected tree of the transport network, covering all key transport zones and ensuring their connectivity with each other. Objects of the basic transport structural framework must be provided with maintenance and repair without fail.

2) Segment 2 and subsequent segments are formed by transport infrastructure objects that are attached to the core transport structural framework and ensure a reduction in transportation distances and time (increasing network connectivity).

The connection is carried out sequentially across levels, based on maximising the traffic flows served by the added objects and satisfying the specified resource limit for maintenance and repair of these objects. The SBTN core transport structural framework with objects added to it forms a general network called the next level segment. The boundaries of the segment are determined by a given budgetary resource limit for maintenance and repair of facilities included in the segment.

3) An increase in the budget constraint on maintenance of SBTN facilities makes it possible to build segments of subsequent levels, each of which will include the previous segment and new transport infrastructure facilities added to it. Thus, segments of different levels are nested within each other. With the transition from level to level, segments gradually capture more and more objects of the SBTN transport infrastructure.

A SBTN segment will be a connected subgraph of the SBTN graph, covering all key transport zones of the territory under consideration. The purpose of dividing the SBTN graph into segments is to determine which subset of SBTN objects should be primarily provided with funding for creation, maintenance and operation throughout the life cycle, which subset of objects should be provided secondarily, and so on according to priorities. In this case, each subset must define an SBTN subgraph that has the property of connectivity. Otherwise, the main function of the Single Backbone Network will not be fulfilled, that is, providing transportation between all transport zones defined for a given study.

Initial list of transport zones:

- Capitals of the constituent entities of the Russian Federation.
- Cities with a population of 100 thousand people or more.
- Airports and alternate airfields necessary for safe operation of airports.
- Railway stations.
- Sea and river ports.
- Checkpoints across the state border.
- Capitals of neighbouring states that have transport connections with the Russian Federation.
- Natural resource exploitation zones.
- Production clusters, centres of economic growth.
- Large objects of tourist attraction.
- Settlements that do not have year-round land communication, except for inland waterways.
- Exclave territories and several territories of geostrategic importance.
- Multimodal transport and logistics centres with sufficient target processing capacity (for example, at least 200 thousand TEU per year), integrated into the SBTN linear infrastructure network, transport and logistics centres created in the format of «cargo villages».

Within the set of indicated transport zone, *key transport zones* are identified, for which a connected single transport network covering them will be found.

Thus, segments are connected subgraphs of the SBTN graph, covering all key transport zones. The connectivity of a graph is determined by the presence of a path along this graph between any pairs of its vertices. Therefore, to solve the problem, it is necessary to determine the key transport zones (nodes of the SBTN graph), on which the SBTN will rely and ensure their connectivity, and then find the edges of the SBTN graph along which it is possible to «travel» from any vertex to any other, that is, the edges that provide graph connectivity. Approaches to such a problem have been considered by several authors [8], but mainly dealt with networks consisting of the infrastructure of one mode of transport.

First, it is advisable to determine the initial subset of SBTN objects – the first basic segment, provided by financing for maintenance and repair, forming a connected subgraph of the SBTN and allowing the

largest volume of traffic flows to pass through. The algorithm for constructing the first SBTN segment can work as follows. SBTN objects ensuring the passage of the maximum flow are sequentially included in the segment, until the resulting network becomes connected, that is, it covers all key transport zones, and between any zones there is a path through the objects of this SBTN segment. To solve this problem, it is possible to use Kruskal's algorithm (an algorithm for finding the minimum spanning tree in a graph), known from graph theory. This approach is practically not used in the domestic literature in relation to the transport industry, except for individual developments in relation to agglomerations [9].

The resulting graph will have the form of a tree (in the terminology of graph theory), i.e., a graph without cycles that covers all vertices of the graph. This graph contains the minimum number of edges that makes it possible to «travel» from any vertex to any other. Thus, the first basic segment of the SBTN is the minimum subgraph of the SBTN, which ensures the connectivity of all transport zones of the territory under consideration, and at the same time the passage of the largest traffic flow. The graph of the first basic SBTN segment can be called the SBTN skeleton or the SBTN core transport structural framework. Spanning tree paths (path along SBTN transport structural framework) may be too long between some transport zones. Therefore, if there are additional reserves of resources for maintenance and repair, it is advisable to supplement the SBTN transport structural framework with SBTN objects, providing them with financing to shorten the paths along the SBTN transport structural framework and provide the ability to lay routes between different branches of the spanning tree.

By adding edges (objects) to the SBTN transport structural framework, the spanning tree turns into a general network with the possibility of using shorter paths between transport zones. Such a network represents the second segment of the SBTN.

The task of constructing the second segment can be formulated as follows. Segment 2 includes all vertices and edges of the first segment, as well as SBTN objects that are not included in segment 1, ensuring the passage of the maximum total flow so that

their total financing does not exceed the specified budget constraint. (Required note: since the spanning tree contains all the nodes of the graph, it is possible to add any edges (SBTN objects) to it and the graph will remain connected). Subject to an increase in the funding limit, it is possible to build the next segment of the SBTN, which will include the previous segment and will contain more edges (objects) of the SBTN, which will make the transport network graph even more connected, that is, containing a larger number of valid routes between vertices (transport zones). In this way, it is possible to build several segments, each of which will correspond to the allocation of a certain additional limit for financing activities for maintenance and repair of transport infrastructure facilities.

2. Proposed Algorithms

SBTN facilities are included in the priority subset of facilities (SBTN segment) based on the principle of performing the maximum transported volume per year.

Kruskal's algorithm (modified) for constructing the first segment of the SBTN – the minimum spanning tree or core transport structural framework of the SBTN – works as follows.

Let there be N nodes (vertices) within the SBTN graph. The algorithm starts working with N trees, each of which initially consists of one single vertex – a specific node of the SBTN graph. Next, the edges of the SBTN graph are sequentially added to the trees, connecting different trees. Edges connecting the vertices of one tree are not considered so that the tree does not turn into a network, since the connection of two vertices of the same tree leads to formation of a cycle in the resulting graph, which ceases to be a tree and turns into a network of a general form. When an edge is added connecting two different trees, these trees merge and form one new tree. In this case, the tree with a lower number absorbs the tree with a higher number. At each step, between the trees, an edge with the maximum volume of traffic is found. The process continues until all the trees merge into one single tree, numbered 1. This tree will be the minimum spanning tree that allows flows with the maximum total volume to pass through. In the classical Kruskal's algorithm, traffic volume is not considered.



Modified Kruskal's algorithm for constructing the basic S_1 segment (transport structural framework) of the SBTN

Data: $T_1, \dots, T_N$ – SBTN spanning trees, each of which initially consists of one vertex (node) of the SBTN graph.

Start: $W = 0$ – initial value of the total volume of traffic of the formed segment S_1 .

Cycle 1 of constructing a S_1 segment (infinite loop with exit condition).

Searching for an edge e_{ij} of the network graph, connecting two trees T_i, T_j , where $i < j$, which has a maximum estimate $W(e_{ij})$ of traffic volume.

Attaching the tree T_j and the edge e_{ij} to the tree T_i , that is, to set $T_i = T_i \cup e_{ij} \cup T_j$. Then to set $W = W + W(e_{ij})$.

If the tree T_i has absorbed all other trees, i.e. only one tree T_1 remains, then exit the cycle 1.

End of cycle 1.

The resulting spanning tree T_1 forms the first basic segment (transport structural framework) of the SBTN i.e. $S_1 = T_1$.

End of the algorithm of construction of the S_1 segment of the SBTN.

As a result of applying the modified Kruskal's algorithm, the SBTN subgraph will be found in the form of a spanning tree for all key transport zones. The constructed subgraph is connected and ensures the passage of flows that together have the maximum volume. This subgraph is the transport structural framework of the SBTN. The construction of the SBTN transport structural framework meets the criterion of network connectivity and the criterion of alternativelessness, since unalternative paths (edges) of the transport network graph that do not have alternatives will automatically be included by Kruskal's algorithm in the minimum spanning tree.

The following S_t segments, where $t = 2, q$, i.e., segments of the next levels, starting from the second, are built subject to additional funding limits C_t for maintenance and repair of SBTN facilities.

Algorithm for constructing segments of level 2 and subsequent levels

Cycle for construction of segments $t = 2, q$ (starting from the second).

Construction of the segment with the number t :

Determining the specified financing limit C_t for a given segment t .

If there is no limit, then exit the segment construction cycle.

If there is at least one object o , that has not been included in the constructed SBTN segments, and whose cost of maintenance and repair is less than the specified funding limit C_t , then it is necessary to construct the SBTN t segment by solving the optimisation problem of maximising the total volume of transportation of objects o_j of the transport network included in the considered segment, with a given restriction on the funding limit C_t for maintenance and repair of its facilities.

End of Cycle 1.

End of construction of segments.

The construction of the SBTN t segment is carried out by solving an optimisation problem, in which the optimisation criterion expresses the maximisation of the total volume of transportation of objects o_j of the transport network included in the considered SBTN segment:

$$\sum_j x_j \times W(o_j) \rightarrow \max,$$

where,

$W(o_j)$ – traffic volume for an object o_j .

The limitations of the problem express the absence of exceeding a given limit for financing maintenance and repair of objects of the formed SBTN segment:

$$\sum_j x_j \times C(o_j) \leq C_t,$$

where $C(o_j)$ – volume of financing C_t for maintenance and repair of an object o_j ;

C_t – limit on financing maintenance and repair of facilities included in t segment of the SBTN.

This optimisation problem has the form of a linear programming knapsack problem, more precisely 0–1 knapsack problem, and is solved by the standard method (dynamic programming). In the case of large dimensions, an approximate, so-called greedy algorithm or other similar algorithms (depending on the problems being solved) can be used for the solution [10].

Approximate algorithm for constructing t segment of SBTN

Let first set $OC_t = C_t$ that is, the remainder of the funding limit OC_t is initially equal to the specified limit C_t .

Segment construction cycle (infinite loop with exit condition).

To find among the SBTN objects of all modes of transport, an object o with a maximum volume of traffic $W(o)$, that fits within the given funding limit, i.e., such that $OC_i - C(o) \geq 0$.

To include the found object in the generated segment $S_i = S_i \cup o$, to set $W = W + W(o)$. $OC_i = OC_i - C(o)$.

If an object with the above properties is not found or all edges of the SBTN graph are included in the segment, then it is necessary to finish building the SBTN segment, that is, to exit the segment construction cycle.

End of the segment construction cycle.

The application of the described algorithms will result in construction of SBTN segments forming a connected transport network, including the basic transport structural framework of the SBTN, as well as additional sections of the network that ensure the passage of traffic flows with the largest volume of traffic, which together satisfy the given restriction on financing their maintenance and repair.

It is to note that in the algorithms described above for formation of SBTN segments, it is possible to consider the amount of transport work performed by transport network objects. In this case, for transport network objects, the so-called total freight and passenger transport intensity or normalised freight intensity, calculated as normalised freight and passenger turnover (transport work) per kilometre of travel, is considered. Here the normalised freight turnover is calculated with the formula $P = P_{cargo} + k \cdot P_{pass}$, where P_{cargo} is cargo turnover; P_{pass} – passenger turnover; k is the coefficient of reduction of passenger turnover to freight turnover (for example, for railways it is taken equal to 1). This calculation option allows us to consider in detail the volume of transportation, including transportation that uses the resources of the considered sections of the transport network not completely, but only partially over a certain length. However, this requires the use of additional initial data and complicates the calculations.

When forming the second and subsequent segments of the SBTN, it is possible, as an additional option, to use the network connectivity criterion, which takes into account the requirements for the presence of direct transport links along the SBTN infrastructure between certain priority transport zones or network nodes, for example, connections between the city of Moscow and the capitals of neighbouring

states, or capitals of constituent entities of the Russian Federation with cities with a population of more than 100 thousand people, etc. It should be noted that such transport connections are highly likely to be included in the SBTN by the algorithms described above. This is because a feature of the transport network of the Russian Federation is the absence of a large number of alternative routes of comparable quality between its main nodes, and the most efficient routes between them are the most in demand when transporting goods and passengers, that is, they will be selected into SBTN segments by the algorithms described above. However, when forming the SBTN, if there are additional requirements for the presence of direct transport connections via the SBTN between key nodes of the network, then it is advisable to check the fulfilment of these requirements using the algorithm given below.

The algorithm for including direct transport links into the SBTN or checking their availability is similar to that described above. For each pair of given nodes A, B , the shortest path between them is found. As the path length, it is advisable to use an estimate of the cost of transportation between nodes A and B , that is, consider the most economical path between nodes. For the found path, the total estimate of the cost $C(A, B)$ of maintenance and repair of its sections that were not included in the previously formed SBTN segments is calculated. If all sections of the found path are already available in the SBTN, then the presence of a direct transport connection between nodes A and B is considered confirmed. Among the considered nodes, direct connections between which are not confirmed by the SBTN, a pair A_i, B_j is found with a minimum estimate of $C(A_i, B_j)$, and if the total cost of maintenance and repair of objects of the formed current segment of the SBTN together with the value $C(A_i, B_j)$ do not exceed the funding limit for objects in this segment, then the edges of the path under consideration that are not included in the already constructed SBTN segments are included in the formed segment. These actions are repeated for the remaining pairs of nodes until the limit of total funding for maintenance and repair of objects selected for the formed segment is reached. Various approaches can be used to visualise a network; this issue was also considered in the works of Russian researchers [11].



Finally, the SBTN will additionally include objects through which the cheapest direct transportation links between specified network nodes pass, or it will be confirmed that such transport links have already been included into the SBTN.

CONCLUSION

As a result of applying the described algorithms, a set of objects (nodes and edges) of the SBTN will be formed that meets the specified criteria.

- The network graph connectivity criteria are satisfied using the developed modified Kruskal's algorithm, which ensures the finding of an SBTN graph connecting all transport zones.

- The quantitative selection criterion is considered in the modified Kruskal's algorithm by finding the edges of the base spanning graph (structural framework) of the SBTN with the maximum volume of traffic, and then by attaching additional edges of the next network segment to the base framework, also with the maximum volume of traffic.

The development of the SBTN using the developed algorithms satisfies the restriction on financing activities for maintenance and repair of infrastructure facilities included into the SBTN.

In the future, development of a connected graph of the SBTN network can be used in formation of a transport and economic balance based on methods developed by Russian researchers [12; 13].

REFERENCES

1. Newman, J. Increasing the ability of government agencies to undertake evidence-informed policymaking. *Evidence Base*, 2020, Iss. 2, pp. 1–9. DOI: 10.21307/eb-2020-005.
2. Kapoguzov, E. A., Chupin, R. I. Possibilities of using an evidence-based approach for analyzing industrial policy [Vozmozhnosti ispolzovaniya dokazatel'nogo podkhoda dlya analiza promyshlennoi politiki]. *Bulletin of Kemerovo State University. Series: Political, sociological and economic sciences*, 2022, Vol. 7, Iss. 3 (25), pp. 323–330. EDN: UCIUOA.
3. Bychkova, A. A. Investments in the transport infrastructure of Russia [Investitsii v transportnyuyu

infrastrukturu Rossii]. *Vestnik universiteta*, 2022, Iss.2, pp. 151–159. EDN: AUTTNE.

4. Melo, P. C. Transport Infrastructure Effects on Economic Output: The Microeconomic Approach. In: *International Encyclopedia of Transportation*, Elsevier, 2021, Vol. 1, pp. 347–354. Ed.-in-chief Roger Vickerman. ISBN 978-0-08102-672-4. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102671-7.10065-X>.

5. Popova, Y. Relations between Wellbeing and Transport Infrastructure of the Country. *Procedia Engineering*, 2017, Iss. 178, pp. 579–588. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.01.112.

6. Berdnikov, S. V., Patrakeeva, O. Yu. Transport infrastructure and economic growth: the problem of assessing effects [Transportnaya infrastruktura i ekonomicheskii rost: problema otsenki effektiv]. *System modelling of socio-economic processes: proceedings of the 42nd International Scientific School-Seminar*, Rostov-on-Don, 01–06 October 2019, Voronezh: Voronezh State University, 2019, pp. 46–51. EDN: BGRKMO.

7. Rosik, P., Wójcik, J. Transport Infrastructure and Regional Development: A Survey of Literature on Wider Economic and Spatial Impacts. *Sustainability*, 2023, Vol. 15, Iss. 1, 548. DOI: <https://doi.org/10.3390/su15010548>.

8. Krygin, A. A., Kupriyanov, B. V. Determination of critical nodes of the transport network [Opredelenie kriticheskikh uzlov transportnoi seti]. *Upravlenie bolshimi sistemami*, 2022, Iss. 100, pp. 194–215. [Electronic resource]: <http://www.ubs.mtas.ru/upload/library/UBS10009.pdf>. Last accessed 26.12.2023.

9. Makarov, I. N. Efficiency of functioning and development of the transport system of a large city and urban agglomeration: optimization criteria, the need for multimodal interaction [Effektivnost' funktsionirovaniya i razvitiya transportnoi sistemy krupnogo goroda i gorodskoi aglomeratsii: kriterii optimizatsii, neobkhodimost multimodal'nogo vzaimodeistviya]. *Bulletin of Irkutsk State Technical University*, 2018, Vol. 22, Iss. 1, pp. 209–217. EDN: YMMWJK.

10. Kozlova, M. G., Lukyanenko, V. A., Makarov, O. O., Rudenko, L. I. Specifics of constructing multi-agent routes in hierarchical networks [Spetsifika postroeniya mnogoagentnykh marshrutov v eirarkhicheskikh setyakh]. *Tauride Bulletin of Informatics and Mathematics*, 2022, Iss. 2 (55), pp. 7–29. EDN: PICXDW.

11. Gyulling, A. O., Vorontsova, N. V. Visualisation on graphs [Vizualizatsiya na grafakh]. *News of Tula State University. Technical science*, 2023, Iss. 2, pp. 128–137. EDN: MLCYDT.

12. Evseev, O. V., Murashov, V. V., Zaboiev, A. I. [et al.]. Transport and economic balance and its role in coordinating transport planning in the context of digital transformation [Transportno-ekonomicheskii balans i ego rol v koordinatsii transportnogo planirovaniya v usloviyakh tsifrovoy transformatsii]. *Modern information technologies and IT education*, 2018, Vol. 14, Iss. 3, pp. 717–726. EDN: YYHQUH.

13. Efimova, O. V., Baboshin, E. B. Transformation of the methodology for forming the transport and economic balance [Transformatsiya metodologii formirovaniya transportno-ekonomicheskogo balansa]. *Ekonomika zheleznykh dorog*, 2022, Iss. 6, pp. 29–38. [Access restricted to subscribers]. EDN: NEOWRB. ●

Information about the authors:

Karlov, Arthur V., Junior Researcher of Centre for Strategic Programs of Russian University of Transport, Moscow, Russia, karlov@edu.rut-miit.ru.

Evseev, Oleg V., D.Sc. (Eng), Associate Professor, Senior Scientific Officer of the Scientific Centre for Complex Transport Problems of the Ministry of Transport of the Russian Federation, Moscow, Russia, evseev@mintrans.org.

Article received 30.11.2023, approved 26.12.2023, accepted 29.12.2023.



The Quality of Public Transport Services in Multimodal Commuting in a Megalopolis



Galina V. BUBNOVA



Oleg N. POKUSAEV



Andrey V. AKIMOV

Galina V. Bubnova¹, Oleg N. Pokusaev², Andrey V. Akimov³

^{1,2} Russian University of Transport, Moscow, Russia.

³ LLC Aeroexpress, Moscow, Russia.

¹ ORCID 0000-0002-2488-0247, Russian Science Citation Index SPIN-code: 1347-4880.

² ORCID 0000-0001-6916-8897.

³ ORCID 0000-0003-2186-9947; Russian Science Citation Index SPIN-code: 6207-5066.

✉ ¹ Bubisek@mail.ru.

ABSTRACT

The paper examines methodological issues related to development of an effective mechanism for structural and parametric identification of segments (streams) within connected flows of pedestrians and passengers through complex, long routes of movement of individuals within the boundaries of a megalopolis. Such routes determine significant volumes of multimodal transportation, repeated during the working week during peak hours, so it is necessary to identify them for managerial decision-making by organisations involved in transport planning, public transport traffic administration and provision of public transportation services.

The key point of the study is to determine the logic of choosing a route through an integral assessment of its quality, which includes an assessment of the quality of not only travelling itself and of services available during transportation, but also of the quality of transport infrastructure facilities, as well as of street-and-road network facilities on real routes involved in movement of people across the urban agglomeration.

To specify complex routes, flows with general parameters for formation and selection of routes for specific groups of pedestrian and passengers, and to build models of their behaviour, the study proposes a new key object, that is a public transport user (PTU), as well as an algorithm for identifying such routes using data from cellular operators.

It is shown that the known tools for studying the structure of demand for travelling on public transport are rather ineffective. The results of a study of the quality of public transport perceived by users within Moscow urban agglomeration presented in the paper have revealed a shift in priorities in choosing a route option from more time and money saving to the best in terms of convenience and quality of public transport on the route.

The study suggests a modified model of interdependent activities that directly influence the assessment of the quality of public transport on the PTU route, as well as a model of the sensitivity of PTU to the quality of route options.

Keywords: public transport, mass transit, transportation logistics, combined routes, behavioural profiles, passenger flows.

For citation: Bubnova, G. V., Pokusaev, O. N., Akimov, A. V. The Quality of Public Transport Services in Multimodal Commuting in a Megalopolis. World of Transport and Transportation, 2023, Vol. 21, Iss. 6 (109), pp. 191–200. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-6-3>.

**The text of the article originally written in Russian is published in the first part of the issue.
Текст статьи на русском языке публикуется в первой части данного выпуска.**

INTRODUCTION

In accordance with the basic principles of sustainable development, public transport (PT) demonstrates higher quality since it is «more environmentally friendly», manages a structured demand for transportation services and owns a developed mechanism for satisfying it, including rational transit (e.g., [1]).

Namely the problem of creating such a mechanism determines *the key objective* of this study.

It should be noted that the very concept of «public transport» is very relative. In most countries, it is interpreted as a specific type of passenger transportation that operates on the territory and within the boundaries of a populated locality and meets mandatory characteristics that comprise the invariability of the route of movement of vehicles along the lines of the transport network allocated for these purposes; regularity of vehicles arrivals and departures at/ from stations/stops for passenger embarkation and disembarkation; publicity, i.e., awareness of people about methods of transporting passengers, amounts and forms of payment for travel¹². In several European countries and in the United States, where movement of people using personal vehicles prevails, the requirement for PT traffic according to patterns permitted by local administrations and departments of transport is not so strict. In these cases, slight deviations of PT vehicles from the path on certain sections of the route are possible due to the difficult road situation, as well as to the requirements for passengers boarding and disembarking (while planned stops remain obligatory).

According to another interpretation of PT, it includes vehicles intended for simultaneous movement of a «sufficiently large» number of people [2], which introduces some uncertainty for understanding the object of this study.

Another characteristic of public transport is its «accessibility», which in some interpretations applies to the entire population, in others refers to «wide strata» of population or general public.

As for the physical accessibility of public transport, this requirement is unambiguous, while in terms of financial affordability in the second

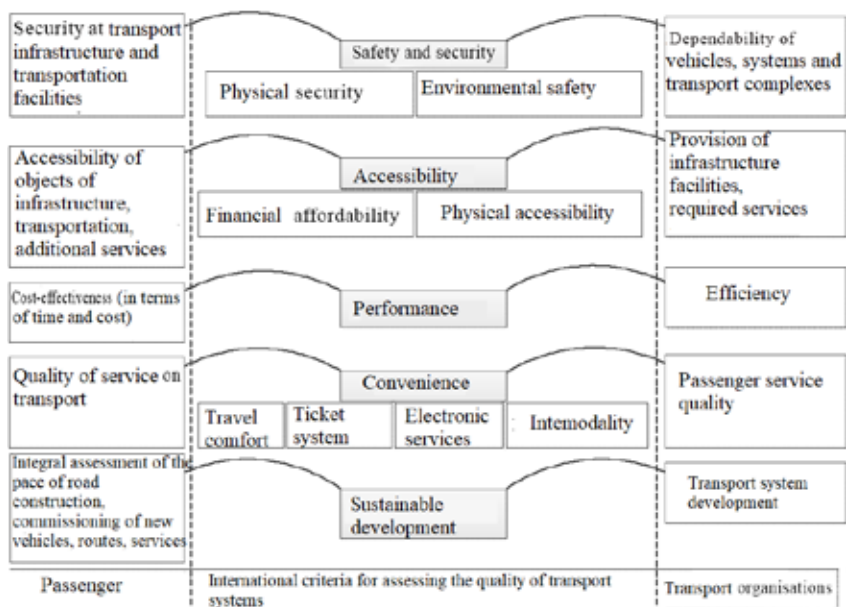
definition, such transport must provide price conditions for transportation of passengers with «low» incomes. In this context, the economic affordability of PT is not clearly defined either and thus is interpreted differently in different countries. In a few cases, the very principle of focusing on serving the population with low incomes is denied. Recently, a point of view has been gaining popularity according to which urban public transport should provide different services in terms of their range and quality, ensuring that the needs of different groups of people are met, including passengers who express readiness to pay a higher price for higher quality [3]. This position defines the existing differences in the standard sets of PT products and services adopted in different countries, which can be provided to people through allocation of specialised lines, partial operation of more comfortable vehicles on fixed routes as well as through provision of additional services.

For megalopolises, the requirements of consistency, regularity, public character, accessibility when organising «simultaneous» transportation of «large numbers» of passengers, in our opinion, are the most important. In this context, the article does not consider personal vehicles, taxis, including minibuses with fewer than 20 seats.

The public transport system of large urban agglomerations unites the transport systems of not only the city itself, but also of its suburbs and its commuter towns. PT systems of megalopolises with a high concentration of business buildings in the central areas of the city (e.g., Moscow) and of residential buildings around the circumference and in the adjacent suburbs and commuter towns are distinctive by active commuting of the population. The scale of large urban agglomerations, the high density of the transport network, which unites routes of various modes of urban transport in most megalopolises, as well as the remoteness of residential facilities from scientific, educational, cultural, business and other centres of attraction of human flows, result in particular significance of complex itineraries (with more than one transfer), of long, combined routes which are in demand for the population and ensure commuting and are characteristic there-of. Such routes, according to our estimates, account for about 68 % in Moscow. The presence of many options for moving people to their destination across the megalopolis, for using various elements of street-and-road

¹ Collins English Dictionary (n.d.). [Electronic resource]: <https://www.collinsdictionary.com/dictionary/english/public-transport>.

² English Oxford Living Dictionaries (n.d.). [Electronic resource]: <https://www.oxfordlearnersdictionaries.com/definition/english/public-transport?q=Public+transport>.



Pic. 1. Model for a comprehensive assessment of the quality of transport (transport complexes and systems) [compiled by the authors].

infrastructure (on pedestrian sections of their itinerary) and elements of infrastructure of various types of public transport determines the need to assess the quality of such a route from the perspective of its end user, who is the main source of information on the perceived quality of public transport in general.

Insufficiency of fundamental developments in the studies on the logic of constructing and choosing a complex itinerary for various behavioural profiles of public transport users to identify within the general pedestrian and passenger flow profiled streams (segments) with characteristic parameters of their formation, as well as of studies on sensitivity of such segments on long, combined routes using modern digital technologies contributes to the relevance of the above research tasks.

MATERIALS AND METHODS

Among scientists and practitioners today, uniform criteria have been adopted for assessing the quality of the main «product» of public transport – «passenger transportation». They are reflected in the relevant standards, guidelines, handbooks of the International Association of Public Transport [UITP], UNECE³, national

handbooks (e.g.⁴), etc., and are mostly based on the classic model of quality spiral.

The level of quality, in this case, usually determines the discrepancy between the achieved and expected quality of the transport service. In the USA and in several countries, it is calculated as the ratio of the actual level of quality to the expected level.

On the other hand, to evaluate public transport as a form of «organisation,» a set of criteria has become popular, which reflects the overall integrated assessment of the quality of transport, both from the customer's perspective and by transport organisations [4]. By transforming approaches to a comprehensive assessment of the quality of passenger transport from both customer's and transport organisations' perspective, we get a possibility to build a conceptual model for assessing the quality of public transport, shown in Pic. 1.

Since the overall assessment of the quality of public transport from the perspective of people mobility consists of assessments of effectiveness and quality (comfort) of transportation in a vehicle of each individual, as well as of their assessments of quality of elements of transport infrastructure (street-and-road, transport, route network) and services referring to their trips, then the quality of

³ UNECE. A Handbook on Sustainable Urban Mobility and Spatial Planning – Promoting Active Mobility. United Nations Publication. 2020. [Electronic resource]: <https://unece.org/transport/publications/handbook-sustainable-urban-mobility-and-spatial-planning>. Last accessed 22.11.2023.

⁴ A Handbook for Measuring Customer Satisfaction and Service Quality. Transportation Research Board. National Research Council [TRB]. Washington, D.C.: National Academy Press, 1999.



public transport as perceived by its user («perceived quality») will be identical to the quality of a route with a wide range of characteristics.

For combined, long routes with transfer hubs and walking sections, the performance indicator (total travel time), in our opinion, is no longer sufficient. The choice of a route (of better quality for an individual), as research results have shown [5], is influenced not only by the time in motion and waiting for the vehicle, the time of transfer to another transport route, but also by the quality of service while the passenger is in the vehicle and the pedestrian/passenger is at public transport infrastructure facilities along all the route from the place of departure to the place of destination. In this context, well-known methods for assessing the quality of a route [6] can be used only in terms of assessing its effectiveness, namely, «time en route».

Several researchers are trying to evaluate a transport service through the prism of its value for the end user. Some adhere to the traditional view and interpret the value of such a service through the opportunity to use time in a vehicle to their advantage [7; 8]. Others consider the value through accessibility [9], others – through perceived convenience, the quality of a comprehensive service [10]. Considering the quality of public transport on its customer's route in a broad sense, the value of the route option for PTU and the quality of public transport for PTU will be identical. Obviously, the value of the same route will differ for different people and different groups of users.

Traditional methods for determining the structure of demand for transport services, passenger preferences, convenience, accessibility and other important parameters and criteria for building and choosing a route, in most techniques, are based on marketing tools. In this case, the information is received based on the results of the surveys, which, according to experts, are effective only to evaluate the expected and desired quality of the route. At the same time, the real preference, the choice of the route option can be «seen» using modern digital technologies, the data of cellular operators and the method of identification of the individual's movement route in the territory of urban agglomeration proposed in [11].

RESULTS

To specify such behavioural profiles and, accordingly, the streams within the interrelated flows of pedestrians and passengers, primarily

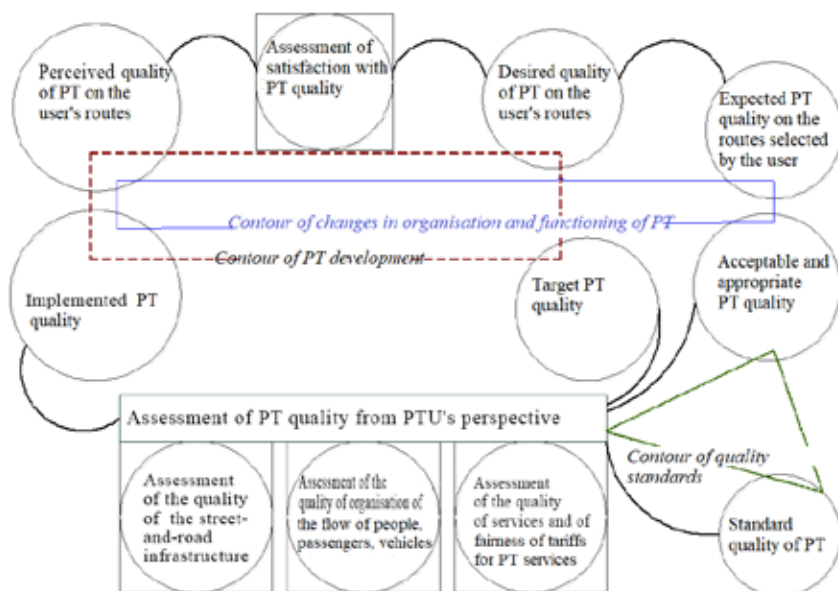
identification of PTU is necessary. We propose to understand the public transport user of a megalopolis as a generalised, composite image of a person who changes over the course of time the status from an individual who makes a decision (search for information, analysis, evaluation and choice of an option) to a pedestrian and passenger en route. The introduction of this category into scientific discourse avoids problems of integration and coordination of data received from various sources of information, as well as of binding layers of the digital ecosystem of transport [12]. In this case, it becomes possible to conduct a multidimensional analysis of the results of sociological and marketing research conducted by various organisations and analytics received directly from carriers, cellular operators, organisations responsible for the operation and development of transport infrastructure.

Consideration of this facility in the complex scheme of organisation of public transport services for the population makes it possible to evaluate the quality of the «integrated product» of PT, namely the PTU route with a structured set of its characteristics during three phases of the evaluation process: desire (desired quality), expectation (expected quality) and reality (implemented quality). As a result, the classic quality spiral is modified and takes the form shown in Pic. 2.

As shown in Pic. 2 assessments of satisfaction with a public transport from customer's perspective can be obtained based on the results of comparing the values of the indicators of the «implemented» and «perceived and desired» quality, as well as of the «implemented» and «perceived and expected». In the first case, we are dealing with an ideal assessment, in the second with realistic one, which is formed considering the existing experience of PTU of using the analysed route. Moreover, factors that affect satisfaction and loyalty in the assessment of service do not differ significantly from those presented in the work [3].

The combined route of PTU does not always mean a change on the route of the type of transport, there are options of using one and the same type of transport, but of different routes along the lines/tracks/roads of this type of transport.

In PTU commuting, the final destination is an object of long-term stay (set by the researcher), and the origin one is the place on the residential area map. Another important condition for



Pic. 2. A model of interdependent types of activities affecting the assessment of the quality of transport services and public transport systems on the PTU route [compiled by the authors].

identifying the object of analysis and evaluation (referring to combined PTU routes) is a repetition of the route during the working days (during the time of the greatest loading on transport infrastructure). Accordingly, the proposed tools for specification of such routes are based on the principle of «repeatability».

To identify such routes and multimodal passenger transportation schemes, it is proposed to use the «models of network proximity» [11], to analyse and evaluate such routes it is suggested to apply methods of fuzzy clusterisation and the rate of user's satisfaction with public transport services [13].

In our opinion, the products of visual analysis of data are best suited as a research tool [14].

The fundamental difference of the proposed approach to the study and quality assessment of the full route of PTU is focusing on known assessment of the «level of service» of the passenger (LOS) [15], which indicates the level of quality of transport services and is used to classify traffic flows by organisations engaged in urban transport planning, namely on comprehensive quality assessment. If in a known concept the quality of transport systems is associated with its ability to ensure safe and reliable services to its passengers, then in the proposed concept, the assessment affects not only the systems of services provided to PTU, but also the state (quality) of the urban environment engaged on the user route that adds the value of

additional service in the form of a variant of multimodal transportation by public transport.

As an example, we considered the combined routes of Moscow Megalopolis, involving Moscow central diameters No. 1 (MCD1), No. 2 (MCD2) and the Moscow central circle (MCC) with walking sections of the PTU route, as well as Moscow metro and urban ground transport. These routes comprised options complicated for analysis and evaluation by PTU, consisting of no less than five alternative routes that had close values of the performance indicator. Main features of the studied combined routes of PTU are schematically shown in Pic. 3.

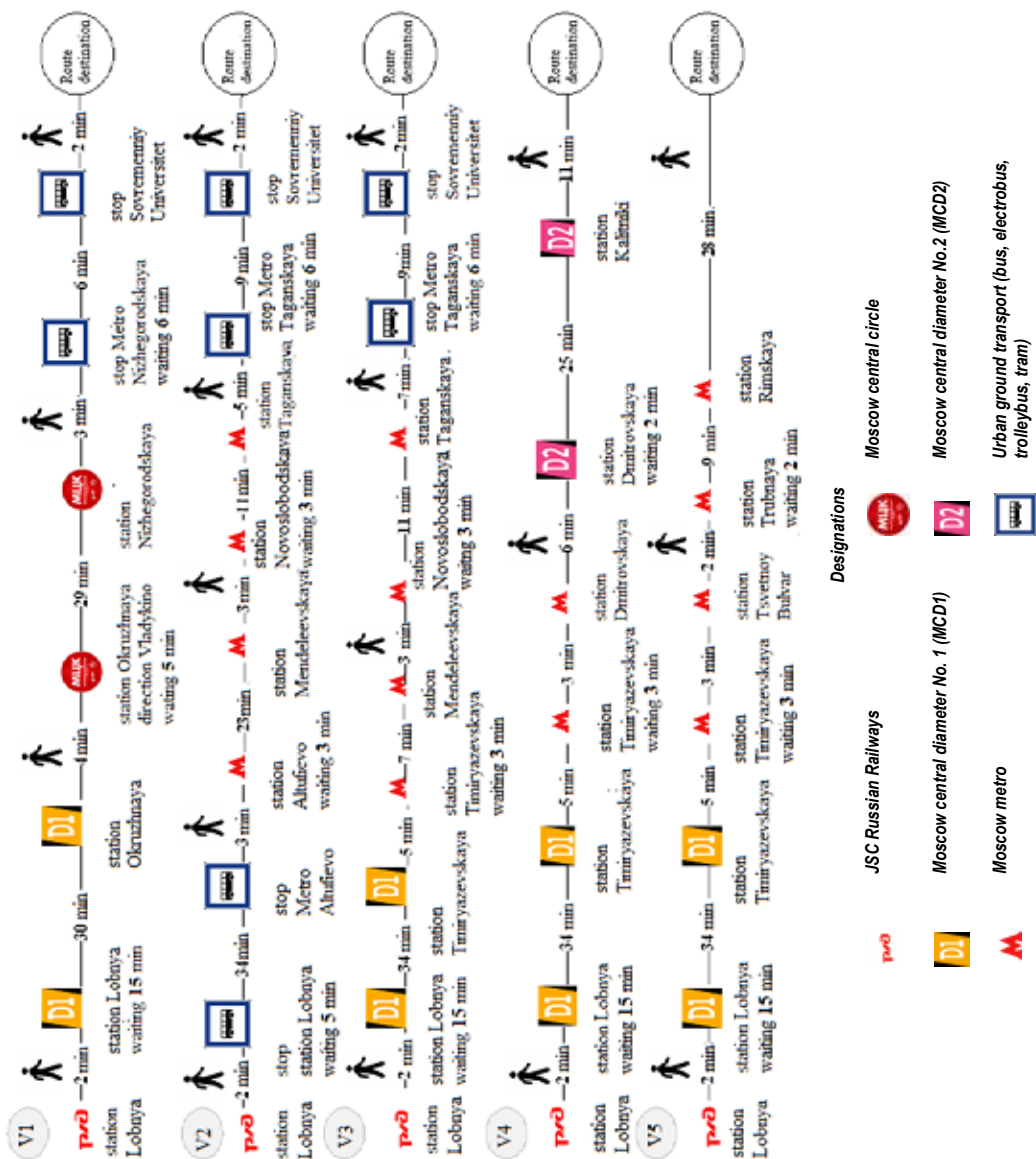
Table 1 presents the estimates of the considered route options. The values of the quality index reflected in Table 1 were obtained based on the results of studies conducted in 2020 on the issue of assessing the quality of transport infrastructure and transportation.

500 PTUs chosen randomly took part in the experiment. The assessment was carried out on a ten-point scale.

The results of the study confirmed our hypothesis that the choice of route is not always determined by the minimum travel time and cost of travel. 41 % of respondents preferred the fourth option, which has the highest quality index (nine points).

The economic assessment of performance of the set of possible routes that can be formed using MCD1, MCD2 is shown in Table 2.





Pic. 3. The structure of alternative options for the PTU route [compiled by the authors].

The columns in Table 2 indicate the departure stations. The lines indicate the arrival stations, at the intersection of the lines and columns there are the values of the effects for the corresponding routes (rubles per year), black cells mean the impossibility of constructing a route.

For economic assessment of effectiveness of the transport route, we used JSC Russian Railways 2020 data on passengers entering the railway stations indicated in Table 1 in the first half of the day, as well as methodological provisions [16], in which it is considered that

every hour of time saved while waiting electric train, can be spent by the passenger on work, education or leisure. In this case, we assumed that the utility of a unit of time is the same in all three areas of its application. Thus, assessing the socio-economic effect, in our case, will come down to calculating the additional potential income caused by saving time [17].

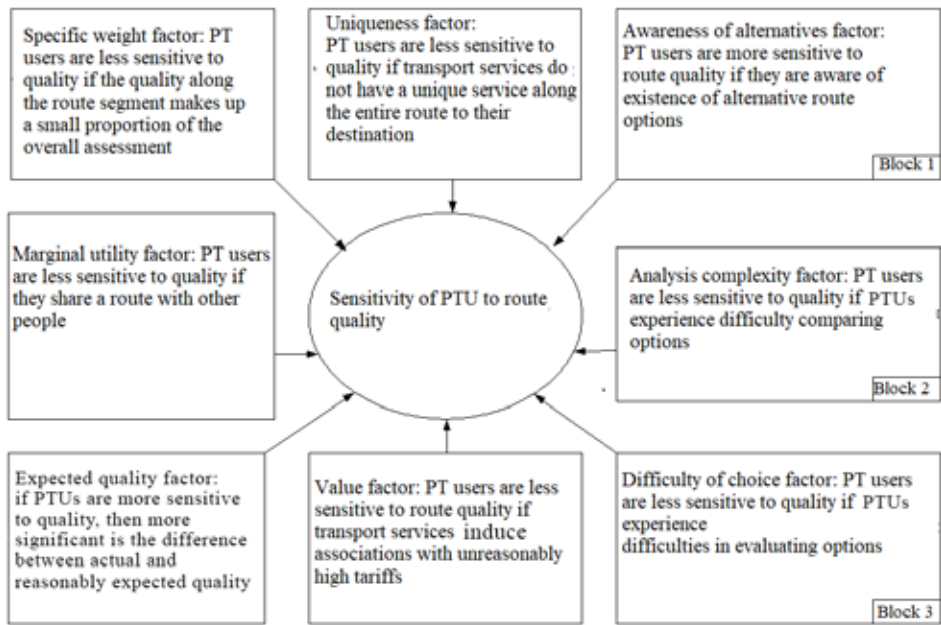
The results of our studies of quality of routes in Moscow agglomeration among passengers of suburban stations in the considered directions of travel showed that there was a shift in PTU

Table 1

Quantitative assessment of parameters of the routes under study

Assessment criteria	Numbers of alternative route options				
	V1	V2	V3	V4	V5
Performance (travel time, hours)	1,42	1,49	1,47	1,46	1,43
Route complexity (number of transfers)	2	3	3	2	2
Price/cost of service, rub.	MCD1 52/50 +MCC +bus 46/42	MCD152/50 +bus 46/42	MCD1 78/50 +metro +bus 46/42	MCD1 78/50 +metro +MCD2 46/42	MCD1 78/50 +metro
Quality index of PT on the route	8	6	7	9	7

Source: Compiled by the authors.



Pic. 4. A model for determining behavioural profiles of PTUs based on the priority «PT quality» [compiled by the authors].

priorities. There has been an increase in the number of PTU who give preference to options for complex, combined routes with the best characteristics of service, comfort and quality of transport infrastructure elements and route networks of the megalopolis: from 51 % in 2019 to 67 % in 2020 (provided the difference in travel time along the route does not exceed ten minutes). The survey covered 2000 people.

It is proposed that the specification of streams within the structure of passenger flow on long combined routes be carried out based on the parameters that influence the behaviour of PTUs of particular profiles presented in Pic. 4.

The difficulty of creating a mechanism for satisfying structured demand for public transport services that is adequate to real conditions is created by PTU who do not choose the

traditional route («adherents») but do plan it and form it randomly. In this context, conducting research in terms of awareness, complexity of analysis and evaluation is a relevant task. Knowledge of the share of PTUs who respectively have information about alternative routes (Block 1, Pic. 4), have difficulties in planning a travel route, determining its structural characteristics and desired quality parameters (Block 2, Pic. 4), as well as those who have difficulties in determining criteria for a comprehensive assessment of public transport on the PTU route are necessary to build such behavioural models (Block 3, Pic. 4).

DISCUSSION

The results presented in this work lead us to a number of controversial issues and conclusions.



Matrix of PT performance values on combined PTU commuting routes (railway-metro pattern)

Table 2

	OTRADNOE	ODINTSOVO	BAKOVKA	TREKHGORKA	NEMCHINOVKA	SETUN	RABOCHY POSELOK	KUNTSEVO I	SLAVYANSKIY BULVAR	FILI	TESTOVSKAYA	BEGOVAYA	MOSKVA BELORUSSKAYA	MOSKVA SAVYOLOVSKAYA	TIMIRYAZEVSKAYA	OKRUZHNAVYA	DEGUNINO	BESKUDNIKOVO	LIANOZOVO	MARK	NOVODACHNAYA	DOLGOPRUDNAYA
ANNUAL EFFECT																						
OTRADNOE		-115 869	290 148	-31 133	1 008 863	1 706 657	1 063 398	-306 335	0	-133 955	50 844	580 340	-680 055	2 841 399	290 649	881 59	334 872	378 235	460 342	16 755	11 888	239 363
ODINTSOVO	-135 444		-4 648	8 421	-7 146	-12 598	380 740	-1 371 994	13 211 688	-87 895	-244 552	86 866	-7 348 785	2 776 959	229 639	235 222	134 860	297 008	338 666	71 54	17 009	201 666
BAKOVKA	350 512	-42 539		-4 965	69 957	57 006	100 043	-249 953	1 517 165	344 189	-75 176	125 315	-384 218	338 077	24 771	6 545	26 745	34 906	39 965	0	1 376	23 617
TREKHGORKA	-24 365	-4 953	-204		1 131	19 076	30 297	-489 116	3 674 799	1 596 004	-138 93	908 938	1 004 592	300 066	33 107	4 204	42 213	58 754	62 477	6 614	160	73 259
NEMCHINOVKA	640 776	5 664	77 370	2 645		-5 199	8 872	-179 666	758 632	235 297	3 027	31 506	-365 530	74 456	10 721	1 630	6 905	12 738	13 919	0	4 478	18 654
SETUN	1 573 478	58 502	67 874	112 055	-4 270		15 756	1 095 537	14 968 659	19 817 588	-423 280	5 133 229	12 575 299	3 589 589	534 412	429 630	464 073	726 741	693 199	110 864	1 950	238 187
RABOCHY POSELOK	961 614	366 178	73 666	40 559	10 575	731		140 055	2 553 619	2 565 540	-970 851	-51 693	2 202 528	1 640 120	251 440	163 199	197 893	339 626	278 850	544 79	4 995	74 402
KUNTSEVO I	-196 545	-1 088 338	-142 760	-387 808	-59 760	755 040	174 143	-320 136	-6 777 164	-6 777 164	-788 169	18 567 964	1 107 030	6332 823	668 203	1 557 098	598 257	886 402	745 541	168 465	29 563	137 165
SLAVYANSKIY BULVAR	0	3 044 868	421 782	856 081	217 630	3 018 985	746 572	-249 511	29 374 311	29 374 311	7 421 274	552 74 601	15 591 290	21 160 257	5 600 257	4 539 993	2 506 531	3 239 811	7 065 702	632 066	122 341	307 923
FILI	-1 221 500	-2 105 461	207 750	987 276	79 015	9 509 443	41 904 407	-79 406	27 523 639	0	-903 154	27 933 060	4 799 858	8 047 054	2 073 230	396 279	1 424 555	2 010 598	1 728 114	402 676	77 683	690 527
TESTOVSKAYA	-18 951	596 186	146 161	90 086	6 336	538 888	499 674	-799 406	6 890 531	-1 456 824		14 686 180	20 491 229	7 650 490	2 476 948	-1 660	1 331 274	2 613 123	2 347 999	745 087	134 317	366 641
BEGOVAYA	3 039 611	4 222 829	674 389	2 554 473	89 203	4 218 897	2 414 851	14 763 610	45 688 616	23 646 103	23 091 711		19 451 283	46 868 057	10 530 956	1 989 781	4 412 499	5 670 406	4 494 557	1 346 074	421 281	1 094 448
MOSKVA BELORUSSKAYA	-599 921	-7 520 205	-286 763	-142 958	-346 020	5 491 279	4 405 263	943 012	17 020 225	4 538 388	18 852 258	21 353 233		0	-791 600	6 239 448	6 274 625	7 342 359	4 422 399	1 901 230	739 739	5 806 504
MOSKVA	120 66 301	12 961 026	1 755 799	2 140 223	245 553	9 121 305	8 431 949	5 026 389	21 454 135	8 218 817	6 255 859	42 628 174	406 539		4 563 363	1 272 224	102 494	205 608	62 115	-447 941	-190 178	-975 018
SAVYOLOVSKAYA																						
TIMIRYAZEVSKAYA	881 068	1 022 465	103 044	66 951	19 084	1 733 640	1 753 025	693 991	6 517 178	2 454 988	1 209 483	10 931 775	-975 580	3 386 088		4 938 893	4 664 547	2 865 024	3 490 161	1 063 673	138 181	1 130 397
OKRUZHNAVYA	89 622	46 438	5 691	2 600	1 629	284 235	338 829	1 473 930	4 945 655	740 830	6 919	3 160 673	2 961 555	2 593 861	2 591 768		77 050	639 653	1 710 209	779 294	217 592	1 196 194
DEGUNINO	302 331	238 064	54 377	77 555	6 666	583 081	404 376	467 340	2 655 274	1 446 206	208 991	2 655 319	5 013 801	526 949	3 861 686	52 127		74 802	913 828	66 583	6 275	259 321
BESKUDNIKOVO	490 417	422 335	46 998	62 574	13 979	836 374	670 864	889 066	3 538 382	2 232 038	586 661	3 398 333	5 908 000	518 641	2 743 853	786 000	42 446		95 351	780 49	8 711	319 071
LIANOZOVO	614 183	556 792	42 828	86 720	22 652	823 708	577 761	670 338	2 757 988	1 688 373	333 085	2 120 520	3 829 790	227 031	3 321 164	1 574 824	834 409	63 889		25 090	62 374	1 019 128
MARK	39 042	31 614	3 677	6 665	784	179 222	80 413	167 383	751 824	474 488	118 168	749 132	1 764 612	-56 001	1 480 304	811 515	106 919	104 459	-1 868		-3 196	119 822
NOVODACHNAYA	18 646	12 797	0	8 912	3 565	65	13 160	7 350	36 651	19 606	3 405	74 002	86 671	-190 264	-45 961	115 644	-3 251	-7 612	41 384	797		17 877
DOLGOPRUDNAYA	338 004	309 332	23 227	85 183	4 395	295 043	140 227	140 306	364 045	740 308	112 144	643 783	1 120 541	-335 898	1 667 810	1 428 096	237 267	409 434	755 669	144 796	30 029	

Source: Compiled by the authors

- Considering the global trend to digitalisation of all spheres and areas of activity, we can assume the promising character of conducting in-depth research on real preferences, choices and implementation of customers' routes, as well as of building standard behavioural models of consumers of PT services. The developed models and algorithms for identifying profiled segments of passenger flows based on data from cellular operators make it possible to assert the possibility of using digital traces of PTU movements in the analysis and assessment of preferences and of acceptable PT quality characteristics.

- Not all users can correctly formulate their preferences. Research results show that in the decision-making process, the final choice is not always made in favour of a route option that has been built according to the parameters and criteria initially set by an individual. Conclusion can be made that survey methods are not so effective for improving traffic management systems and transport services for the population. The implemented routes provide a more accurate picture of preferences and attitudes towards PT quality.

- Not all PTUs choose a rational route of movement even after a real trip. Conclusion can be made that identification of a rational flow of passengers on a combined transport route, assessment of its capacity and sensitivity to price, service and organisational measures will make it possible to develop an effective mechanism for controlling movement of individual segments of flows of people in a megalopolis, as well as to identify bottlenecks in the system of traffic control and transport services.

- New services should include offers of routes for various profiles of PTUs with better «qualitative» characteristics of PT infrastructure elements within the permissible ranges of extra travel time and travel costs, which would consider the desire and ability of PTUs to independently conduct multi-parameter analysis and multi-criteria assessment of route options with the best characteristics for them.

CONCLUSIONS

The results of our research show the large share of multimodal transport along combined PTU routes using railway transport and urban public transport within commuting patterns of population migration. At the same time, there are reserves for optimising the load on certain sections of the transport network of a megalopolis by changing the direction of movement of

passenger streams, identified by the behavioural profiles of the PTUs.

To form a behavioural profile of PTUs, it is proposed to use the principle of preference not only according to the known parameters of the route (type of transport, permissible number of transfers, maximum waiting time for a vehicle, time spent for walking sections, etc.), but also according to the quality parameters of public transport infrastructure elements engaged along the route.

The specification of profiled passenger streams within passenger flow is carried out based on a network proximity model and comprehensive assessment of quality of the route, which refers not only to its structure and performance from the point of view of saving time and money, but also to its convenience and «modernity».

We also identified a trend in Moscow for a change in the preferences of PTUs in the process of choosing a route option, from the initially planned more time-saving route to a route option with better quality indicators, but a longer travel time (with approximately equal total fare cost).

Analysis and assessment of sensitivity of connected flows of pedestrians and passengers within the boundaries of long combined routes to changes in the quality parameters of public transport infrastructure elements gives ground for offering the population a new service [18], which is a product of logistics of multimodal passenger transportation and mean route options for specific behavioural profiles of PTUs.

The introduction of the concept of «public transport user» with a variable status allows us to solve the problem of inconsistency of decisions in a multi-agent system, combine appropriate analytics in a multi-layer transport ecosystem, link quality assessments of the street-and-road network, route network, vehicles, transportation along the route and services from the perspective of a specific individual or a specific group of people within one behavioural profile.

Studies on the choice of public transport routes and assessment of their quality by people who owns a personal vehicle are also becoming interesting in the regions and countries with high rate of passenger cars per 1000 inhabitants, particularly in the USA and in the EU (respectively estimated as more than 850 and 560 in 2022).

Understanding the logic of forming a route and choosing an option for movement of people



across a megalopolis has a direct impact on congestion of individual sections of transport lines and the performance of public transport, allows developing reasonable plans for the necessary changes in transport systems considering the features of the current and predicted behaviour of users of transport services in specific region. This also applies to public transport development programs, which identify priority objects for transport construction and reconstruction of transport lines and nodes. In this context, more in-depth research is relevant, which will be based on the use of modern machine learning technologies in real time for a complex agent-based model of decision making in cities [19].

REFERENCES

1. Sztangret, I. Systemic Sustainable Development in the Transport Service Sector. *Sustainability*, 2020, 12 (22), 9525. DOI: 10.3390/su12229525.
2. Barter, P. A. Public Planning with Business Delivery of Excellent Urban Public Transport. *Policy and Society*, 2008, Vol. 27, Iss. 2, pp. 103–114. DOI: 10.1016/j.polsoc.2008.09.007.
3. Van Lierop, D., Badami, M. G., El-Geneidy, A. M. What influences satisfaction and loyalty in public transport? A review of the literature. *Transport Reviews*, 2018, 38 (1), pp. 52–72. DOI: 10.1080/01441647.2017.1298683.
4. Milovanović, A., Lekić, O. Z. Indicators of Sustainable Development and the Urban Sustainability. In: *Sustainability and Resilience Socio-Spatial Perspective*, TU Delft Open, 2018, pp. 103–124. [Electronic resource]: https://www.researchgate.net/publication/328320057_Indicators_of_Sustainable_Development_and_the_Urban_Sustainability. Last accessed 21.11.2023.
5. Litman, T. The Future is not what it Used to Be: Changing Travel Demands and their Implications for Transport Planning. Victoria Transport Policy Institute. [Electronic resource]: <https://vtpi.org/future.pdf>. Last accessed 21.11.2023.
6. Litman, T. Evaluating Public Transit Benefits and Costs. Victoria Transport Policy Institute. [Electronic resource]: <https://vtpi.org/tranben.pdf>. Last accessed 21.11.2023.
7. Mouter, N., Chorus, C. Value of time – A citizen perspective. *Transportation Research*, Part A, 2016, Vol. 91 (C), pp. 317–329. DOI: 10.1016/j.tra.2016.02.014.
8. Molin, E., Adjenughwure, K., De Bruyn, M., Cats, O., Warffemius, P. Does conducting activities while traveling reduce the value of time? Evidence from a within-subjects designed choice experiment. Presentation at the International Transport Forum (ITF) Roundtable on Zero Value of Time. ITF Roundtable Reports, 2019, Vol. 132 (2), pp. 18–29, Paris, France: OECD Publishing. DOI: 10.1016/j.tra.2019.10.017.
9. Crozet, Y., Mercier, A. Urban Toll: Rethinking Acceptability Through Accessibility. International Transport Forum Discussion Papers, 2018, No. 2018–16, OECD Publishing, Paris. DOI: <https://doi.org/10.1787/af22477a-en>.
10. Sidorchuk, R., Efimova, D., Lopatinskaya, I., Kaderova V. Parametric Approach to the Assessment of Service Quality Attributes of Municipal Passenger Transport in Moscow. *Modern Applied Science*, 2015, Vol. 9, Iss. 4, pp. 303–311. DOI: <http://dx.doi.org/10.5539/mas.v9n4p303>.
11. Namiot, D. E., Pokusaev, O. N., Chekmarev, A. E. Models of network proximity in information systems in transport. *International Journal of Open Information Technologies*, 2020, Vol. 8, Iss. 9, pp. 53–58. EDN: PDQDEW.
12. Leviäkangas P., Öörni R. From business models to value networks and business ecosystems – What does it mean for the economics and governance of the transport system? *Utilities Policy*, 2020, Vol. 64, 101046. DOI: 10.1016/j.jup.2020.101046.
13. Vicente, P., Suleman, A., Reis, E. Index of Satisfaction with Public Transport: A Fuzzy Clustering Approach. *Sustainability*, 2020, 12 (22), 9759. DOI: <https://doi.org/10.3390/su12229759>.
14. Medvedenko, S. A., Namiot, D. E. Visual analysis of railway passenger traffic data. *International Journal of Open Information Technologies*, 2021, Vol. 9, Iss. 6, pp. 51–60. [Electronic resource]: <http://injoit.org/index.php/j1/article/view/1113>. Last accessed 23.11.2023.
15. Kittelson, W. K. Historical Overview of the Committee on Highway Capacity and Quality of Service. In: *Transportation Research Circular E-C018: 4th International Symposium on Highway Capacity*. Proceedings. June 27–July 1, 2000, Maui, Hawaii. Transportation Research Board. National Research Council. Ed. Werner Brilon. [Electronic resource]: <https://trid.trb.org/view/657327>. Last accessed 23.11.2023.
16. Worsley, T., Leung, J. What is the Value of Saving Travel Time?–Summary and Conclusions. International Transport Forum, 2019, pp. 12–15. Paris, France. [Electronic resource]: <https://www.itf-oecd.org/sites/default/files/docs/value-saving-travel-time.pdf>. Last accessed 23.11.2023.
17. Adjenughwure, K. The Monetary value of a pleasant and productive train trip. Master Thesis, Delft University of Technology. 2017. [Electronic resource]: <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:fec31781-e374-4eb4-9e8a-02064fca0c63?collection=education>. Last accessed 23.11.2023.
18. Esztergár-Kiss, D., Kerényi, T. Creation of mobility packages based on the MaaS concept. *Travel Behavior and Society*, 2020, Vol. 21, pp. 307–317. DOI: 10.1016/j.tbs.2019.05.007.
19. Yan Zhang, Grignard A., Lyons, K., Aubuchon, A., Larson K. Real-time Machine Learning Prediction of an Agent-Based Model for Urban Decision-making (Extended Abstract). Proceedings from AAMAS '18: 17th International Conference on Autonomous Agents and MultiAgent Systems, 2018, pp. 2171–2173. [Electronic resource]: <https://ifaamas.org/Proceedings/aamas2018/pdfs/p2171.pdf>. Last accessed 23.11.2023.

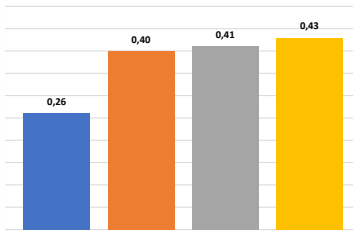
Information about the authors:

Bubnova, Galina V., D.Sc. (Economics), Professor at the Department of Economics, Production Organisation and Management, Deputy Director of the Scientific and Educational Centre of Digital High-Speed Transport Systems of Russian University of Transport, Moscow, Russia, Bubisek@mail.ru.

Pokusaev, Oleg N., Ph.D. (Economics), Associate Professor, Director of Russian Transport Open Academy of Russian University of Transport, Moscow, Russia, oleg@pokusaev.com.

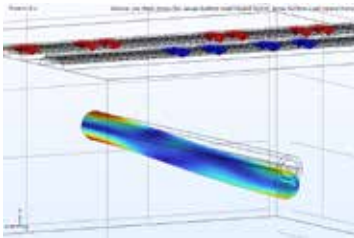
Akimov, Andrey V., General Director of LLC Aeroexpress, Moscow, Russia, akimov_post@mail.ru.

Article received 11.11.2023, approved 27.12.2023, accepted 29.11.2023.



RAILWAY TRACK 202

Binding agents for sub-ballast protective layer.



HSR 238

Buried structures: impact of the HS rolling stock.



ROLLING STOCK 208, 216, 227, 232

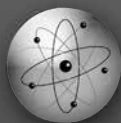
Spring suspension of the locomotive.

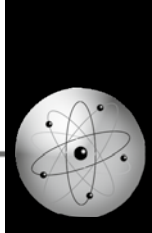
Unification of onboard traction energy storage devices.

Asynchronous traction motor with inclined slot rotor.

Maintenance of passenger coaches' wheelsets: advantages of digitalisation.

SCIENCE AND ENGINEERING





ORIGINAL ARTICLE

DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-6-4>World of Transport and Transportation, 2023,
Vol. 21, Iss. 6 (109), pp. 202–207

Material Laboratory Testing of the Sub-Ballast Protective Layer with Binding Agents



Kirill A. DOROSHENKO



Evgeny S. ASHPIZ



Vyacheslav A. KOROSTELEV

Kirill A. Doroshenko¹, **Evgeny S. Ashpiz**², **Vyacheslav A. Korostelev**³

^{1, 2} Russian University of Transport, Moscow, Russia.

³ Komkor LLC, Krasnodar, Russia.

¹ ORCID 0009-0000-1536-5959.

² ORCID 0000-0003-1334-2117; Russian Science Citation Index SPIN-code: 5412-7662.

✉ ¹ inozrelez@mail.ru.

ABSTRACT

The importance of the reinforcement of the subgrade and particularly of its main platform is conditioned by the increase in train axle load.

The analysis of the results of testing of the strength and deformation characteristics of recycled ballast material during improved with binding agents with the addition of polymer stabilizers has been conducted to assess the applicability of soil consolidation technology when arranging a sub-ballast protective layer.

Laboratory testing has allowed to obtain the dependences of compressive strength and bending stretch on the percentage of Portland cement and polymer stabilizer, and to assess the decrease in material properties when exposed to an aggressive environment.

The testing has resulted in selection of optimal composition of cement and stabilizer for a given granulometric composition of sub-ballast protective layer and allowed to reveal main advantages of the use of soil stabilizer as compared with the samples with the use of cement only.

Keywords: railway transport, sub-ballast protective layer, deformation modulus, binding agents, stabilizers, plate loading tests, elementary test samples.

For citation: Doroshenko, K. A., Ashpiz, E. S., Korostelev, V. A. Material Laboratory Testing of the Sub-Ballast Protective Layer with Binding Agents. World of Transport and Transportation, 2023, Vol. 21, Iss. 6 (109), pp. 202–207. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-6-4>.

The text of the article originally written in Russian is published in the first part of the issue.

Текст статьи на русском языке публикуется в первой части данного выпуска.

INTRODUCTION

One of the key approaches to the solution of tasks of the growth in performance of railways with the increase in the volume and speed of cargo delivery is associated with the operation of the trains with increased axle loads, e.g., of up to 27 tf on the network of Russian Railways. This in turn involves ensuring the stability of the position of the rail track, depending on the condition of the subgrade. Considering that, for in many cases, the subgrade was built more than a hundred years ago and was designed for significantly lower loads, increasing them can cause deformation of the subgrade in places where its load-bearing capacity is insufficient. Therefore, it is important to strengthen the subgrade, and, first, its main platform.

Existing technologies for strengthening the main platform of the subgrade when carrying out work on reconstruction or major repairs of the track, which have proven themselves positively in Russia and abroad, involve the installation of the sub-ballast protective layer (SPL) made from crushed stone-sand-gravel mixtures (hereinafter referred to as CSSGM), thanks to what the track receives an increased stability [1–6]. The advantage of this technology is the ability to perform it without removing the rail-sleeper grid during deep cleaning of ballast. However, the widespread implementation of this technology is hampered by several factors including:

- Large thickness of SPL, which leads to a slowdown in the pace of work during technological traffic intervals and to an increase in cost.
- High cost of CSSGM material.
- The need to deliver CSSGM to the work site.

To reduce the thickness of SPL while ensuring its required reinforcement characteristics, geogrid reinforcement is used. The possibility of reducing the thickness of SPL when using geogrids is justified by scientific research [5; 6] and in Russia is enshrined in a regulatory document¹. But the need to deliver a new CSSGM material and the associated disadvantages still remain, so one of the promising options for constructing a SPL is the use of local materials, which can be the

accumulated thick volume of ballast materials. However, according to research conducted at Russian University of Transport², the deformation modulus of the mixture of old ballast materials itself is no more than 65 MPa, and, therefore, it is impossible to achieve a deformation modulus at the top of SPL above this value. According to [2], to ensure at the level of the main platform of the subgrade the required value of the deformation modulus, which according to¹ should be of 80 MPa, the deformation modulus of SPL material should be about 150–200 MPa.

In this regard, it is proposed to consider the possibility of arranging SPL using old ballast materials obtained during their cleaning with improving their characteristics to the required values by treating them with binders with the addition of a polymer stabilizer. This technology will reduce the time it takes to complete the work by eliminating the operations of removing the ballast layer and eliminating the need for delivery of new CSSGM materials, as well as by reducing the thickness of SPL itself.

Currently, road construction widely uses cement additives and polymer-mineral compositions to strengthen the main platform and foundations [7; 8], which, according to research [9], allows:

- Reducing the thickness of the structural layer.
- Reducing material consumption and time for production and delivery of materials.
- Using production waste instead of its disposal.

The use of stabilizers is due to an increase in the crack resistance of the structure and resistance to aggressive environments [10].

PROBLEM STATEMENT

The objective of the work was to select, under laboratory conditions, the correct amount of Portland cement and stabilizer additives to be added to the recycled old ballast to obtain deformation characteristics required for SPL material.

The initial SPL material for laboratory research was taken from among ballast treated products previously received at Moscow Railway and used in studies conducted at RUT (MIIT)².

¹ Instructions for the installation of sub-ballast protective layers during the reconstruction (modernisation) of the railway track, approved by the order of JSC Russian Railways dated December 12, 2012, No. 2544r. [Electronic resource]: <https://base.garant.ru/406652845/>. Last accessed 23.12.2023.

² Technical specifications for the material of the protective layer using products from cutting out old ballast with crushed stone cleaning complexes. Scientific and technical report. Stage No. 1 «Laboratory test results.» Topic leader E. S. Ashpiz. Moscow, MIIT 2021, 111 p.





Pic. 1. Holder for making samples [authors' photo].

The granulometric composition of this material is shown in Table 1.

Various amounts of Portland cement and polymer stabilizers were added to this material, and samples were prepared for laboratory testing to determine the deformation modulus depending on its composition.

To assess the effect of humidity on the strength properties of the material, tests after water absorption were planned as well.

TEST TECHNIQUES

The tests were carried out through two stages. At the first stage, the amount of cement was selected for the material with the selected granulometric composition (see Table 1). To select the amount of cement, elementary samples were made, which were a cylinder with a height of 60 mm and a diameter of 101 mm. The samples were mixed with 2 %, 3 % and 4 % of Portland cement (calculated per weight of the soil) and with water until optimal humidity was achieved. Next, the mixture was placed in a special holder (Pic. 1), where it was subjected to vibration on a vibrating table to better fill the voids formed during the laying process, after which the mixture was compacted by a press under a load of 24 tons. After compaction, the samples were extracted from the holder and left to gain strength for seven days. A total of 18 samples were made: six per each percentage of cement. After gaining strength, the samples were subject to compression test to determine the deformation modulus of the

Table 1
Granulometric composition (particle size distribution) of SPL material used to produce samples

Fraction, mm	Percentage
25–30	2,04
20–25	18,57
12,5–20	18,57
10–12,5	6,40
7,5–10	9,13
5–7,5	7,24
2,5–5	8,43
1,25–2,5	4,52
1–1,25	0,72
0,63–1	9,56
0,315–0,63	7,15
0,16–0,315	5,99
< 0,16	1,69

material of the fixed sub-ballast protective layer, including after water absorption, according to the technique³ simulating the laying of the sub-ballast protective layer respectively in dry weather and under conditions of high humidity. The composition that had shown the most optimal characteristics was accepted for further research on the selection of a stabilizer.

At the second stage, with the selected cement content, the rational content of the stabilizer (for which the Nicoflok additive was chosen) was identified, which allows further work (for example, track ballasting) to be carried out immediately after compaction of the mixture, thus minimising the time for laying the protective layer.

Nicoflok belongs to the group of redispersible polymer powders (RPP), which give mineral-based materials greater impact strength, reduce the fragility of the material and increase resistance to aggressive environments, and slow down the setting time. The chemical composition of Nicoflok stabilizer is represented by the following components: activated silica – 40 %, calcium salts – 15 %, sodium salts – 15 %, lignin-based polymers – 30 % [11].

To study the influence of the stabilizer on the characteristics of SPL material, similar samples

³ GOST [State Standard] 10180-2012. Concrete. Method for determining strength using control samples. Moscow, Standartinform, 2018, 31 p. [Electronic resource]: <https://docs.cntd.ru/document/1200100908>. Last accessed 23.12.2023.

Table 2

Test matrix for selecting stabilizer content

Sample type*)	Test type	Number of samples, pcs.	Age of tested samples, days	Determined characteristics
Control sample: 0 % of a stabilizer	Compressive strength	9	7, 14, 28	Modulus of material deformation, MPa
	Tensile strength at splitting	3	7	Split strength, MPa
5 % of a stabilizer	Compressive strength	9	7, 14, 28	Modulus of material deformation, MPa
	Tensile strength at splitting	3	7	Split strength, MPa
	Compressive strength in water-saturated condition	6	7	Modulus of material deformation, MPa
7 % of a stabilizer	Compressive strength	9	7, 14, 28	Modulus of material deformation, MPa
	Tensile strength at splitting	3	7	Split strength, MPa
	Compressive strength under water-saturated condition	6	7	Modulus of material deformation, MPa
10 % of a stabilizer	Compressive strength	9	7, 14, 28	Modulus of material deformation, MPa
	Tensile strength at splitting	3	7	Split strength, MPa
	Compressive strength under water-saturated condition	6	7	Modulus of material deformation, MPa

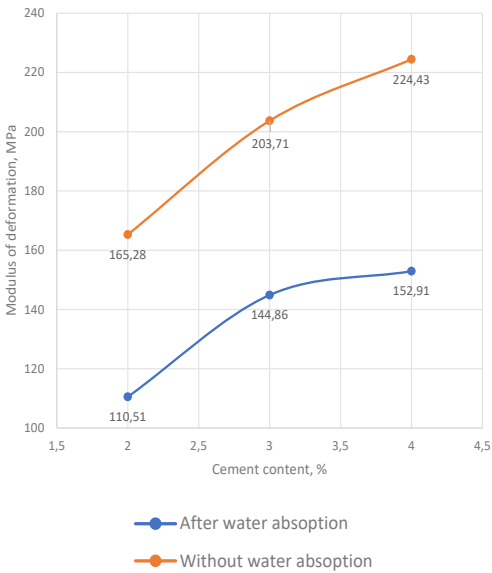
* % of a stabilizer is determined by the amount of cement.

were made with a selected cement composition, as well as with 5 %, 7 % and 10 % of Nicoflok RPP content if calculated based on the total mass of cement (0,15 %, 0,21, 0,3 % of the soil mass). According to the technical specifications for the stabilizer⁴, the use of more than 10 % of the additive by mass fraction of cement is not recommended. The choice of the percentage of stabilizer was determined by the parameters of compression in dry and water-saturated conditions and tensile strength during splitting according to technique², based on assessment of the influence of the stabilizer on the deformation characteristics and crack resistance of SPL material. The matrix of performed tests is presented in Table 2.

TESTS RESULTS

The test results for samples with Portland cement additives in dry and water-saturated states are shown in Pic. 2.

The analysis of data in Pic. 2 shows that when the sample contains 2 % of cement, the

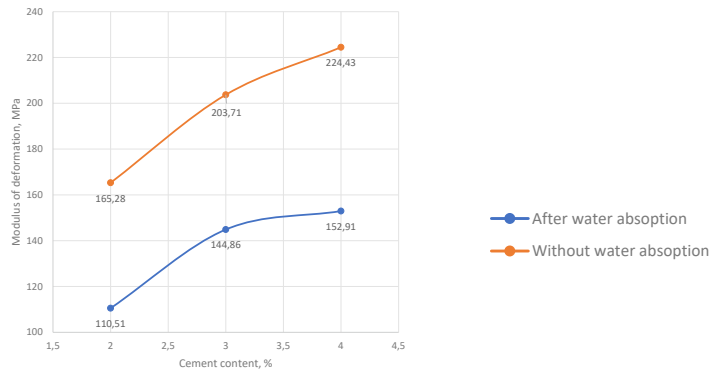


Pic. 2. Dependence of the deformation modulus on the amount of cement [developed by the authors].

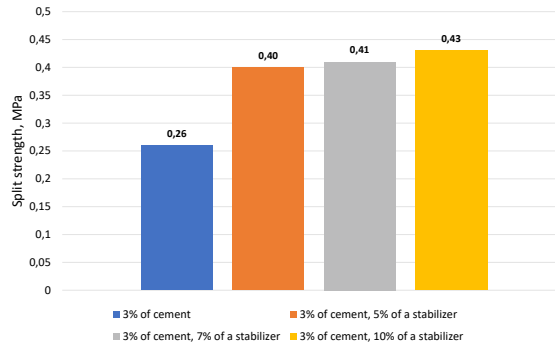
composition in terms of deformation modulus in a water-saturated state does not meet the requirements for SPL according to¹, and an increase in cement content from 3 % to 4 % changes the deformation modulus by only 1,06 times, which is irrational, therefore, we can recommend an additive equal to 3 % cement.



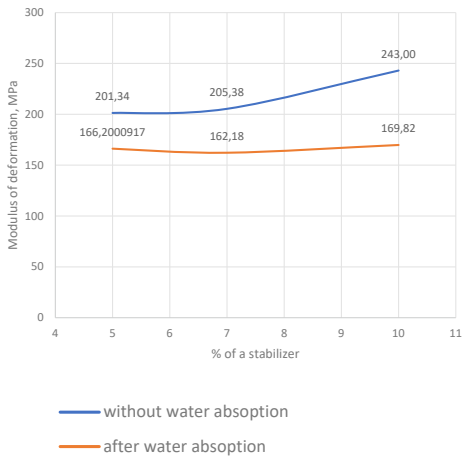
⁴ STO [Standard developed by an organisation] 13881083.002–2021 Nicoflok polymer-mineral additive for mixtures with inorganic binder. Technical conditions. St. Petersburg, Nikel publ., 2021, 30 p.



Pic. 3. Dependence of the deformation modulus on the percentage of Nicoflok RPP [developed by the authors].



Pic. 4. Split strength test results depending on the percentage of Nicoflok RPP [developed by the authors].



Pic. 5. Results of compression tests of samples with Nicoflok RPP with and without water absorption [developed by the authors].

Next, tests were carried out to select the percentage of soil stabilizer at 3 % cement content. The test results are shown in Pic. 3.

As can be seen from the test results, the addition of a stabilizer increases the deformation modulus of the mixture by 12,4–23,6 %, depending on its percentage in the mixture. Also, it can be estimated that strengthening of the

samples is mainly achieved within 7 days (80,6–93,5 % of the strength at the age of 28 days), therefore, the main tests can be carried out at this age, which allows optimising the time for further study.

To evaluate crack resistance and resistance to aggressive environments, splitting strength and compressive strength tests were carried out. The test results are presented in Pics. 4 and 5.

As can be seen from the graphs, the use of a stabilizer increases the splitting strength by 58–65 %. Based on this, it follows that the material treated with the stabilizer will be less destroyed by bending stresses, which will positively affect the durability of the SPL structure.

Based on the test results, it should also be noted that for this SPL material with 3 % cement content, according to the criteria of strength and deformability, 5 % of the Nicoflok additive is sufficient and its further increase is impractical.

CONCLUSIONS

During the study, a total of 84 laboratory samples were produced with different contents of Portland cement and stabilizer additives,

which were subject to compression tests, including following water saturation and different strengthening times, as well as for splitting tests.

Laboratory studies of the influence of binding materials and soil stabilizers on the strength and deformation characteristics of SPL material obtained from ballast layer recycled products allow drawing a series of conclusions.

1) Based on the test results, the optimal composition of cement and stabilizer was selected for a given granulometric composition of SPL.

2) The main advantages of using soil stabilizers in comparison with samples using only cement:

- Increase in deformation modulus by 12,4–23,6 %.
- Increase in splitting strength by 58–65 %.
- Reduction in losses in modulus of deformation after water absorption by 17 %.

3) The use of binding agents in combination with polymer stabilizers makes it possible to increase the deformation modulus of the material by 3,1 times and reach values greater than 200 MPa, which makes it possible to consider the possibility of constructing SPL from recycled products obtained after cleaning the ballast layer, ensuring a reduction in the cost and duration of work during technological traffic intervals, and to remove currently existing restrictions on its use.

REFERENCES

1. Blazhko, L. S., Chuyan, S. N., Zakharov, V. B., Chernyaev E. V. Analysis of methods for increasing the bearing capacity of soils on the main platform of the subgrade [Analiz sposobov povysheniya nesushchei sposobnosti gruntov osnovnoi ploshchadki zemlyanogo polotna]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putei soobshcheniya* [News of the St. Petersburg Transport University], 2016, Iss. 3 (48), pp. 328–336. [Electronic resource]: <https://izvestiapgups.org/assets/files/10.20295–1815–588X-2016–3/10.20295–1815–588X-2016–3–328–336.pdf>. Last accessed 23.12.2023.

2. Track Compendium: Formation, Permanent Way, Maintenance, Economics. 2nd edition. Hamburg: Eurailpress. 2011, 634 p. ISBN 978-3-7771-0421-8.

3. Markin, M. A. Solution to the problem of eliminating local track pumping [Reshenie problemy ustraneniya

lokalnykh vyplezkov]. *Put i putevoe khozyaistvo*, 2021, Iss. 5, pp. 18–20. EDN: TQEYLF.

4. Vorobyov, V. B. Strengthening the main platform of the subgrade with a sub-ballast protective layer to increase the capacity of railways [Usilenie osnovnoi ploshchadki zemlyanogo polotna podballastnym zashchitnym sloem dlya povysheniya propusknoi sposobnosti zheleznykh dorog]. *Vestnik Instituta problem estestvennykh monopolii: Tekhnika zheleznykh dorog*, 2022, Iss. 2 (58), pp. 41–45. EDN: LTYTUA

5. Kuznetsova, A. V., Savin, A. V. Forecast of accumulation of soil deformations of the subgrade under the influence of cyclic load based on the results of computer modelling [Prognoz nakopleniya deformatsii grunta zemlyanogo polotna pod deistviem tsiklicheskoi nagruзки na osnove rezultatov kompyuternogo modelirovaniya]. *Transport construction. Collection of articles of the second All-Russian scientific and technical conference*. Moscow, Pero publ., 2021, pp. 201–208. EDN: AJTBDH.

6. Cook, J., Buckley, J., Dobie, M., Bhavsar, R. The Use of Multiaxial Geogrids in Rail Trackbed Stabilisation. IHHA Conference, Perth, Australia, 2015. [Electronic resource]: https://www.researchgate.net/publication/279195354_The_Use_of_Multiaxial_Geogrids_in_Rail_Trackbed_Stabilisation. Last accessed 23.12.2023.

7. Khudaykulov, R. M., Mirzaev, T. L. Application of stabilizers to improve the strength of the soil foundation of highways [Primenenie stabilizatorov dlya uluchsheniya prochnosti gruntovogo osnovaniya avtomobilnykh dorog]. *Transportnie sooruzheniya*, 2019, Vol. 6, Iss. 1, p. 12. EDN: NXYZZV.

8. Razuvaev, D. A., Lanis, A. L. The use of soil stabilizers when expanding the network of local roads [Ispolzovanie stabilizatorov gruntov pri rasshirenii sesti avtomobilnykh dorog mestnogo naznacheniya]. *Modernisation and scientific research in the transport complex*, 2012, Vol. 3, pp. 223–228. EDN: PXBECJ.

9. Solihu, H. Cement Soil Stabilization as an Improvement Technique for Rail Track Subgrade, and Highway Subbase and Base Courses: A Review. *Journal of Civil & Environmental Engineering*, 2020, Vol. 10, Iss. 3. DOI: 10.37421/jcce.2020.10.344.

10. Dmitrieva, T. V., Markova, I. Yu., Strokova, V. V. [et al]. Efficiency of stabilizers of various composition for strengthening the soil with a mineral binder. *Construction materials and products*, 2020, Vol. 3, Iss. 1, pp. 30–38. DOI: <https://doi.org/10.34031/2618-7183-2020-3-1-30-38>.

11. Mitrofanov, N. G., Panov, I. V., Rumyantsev, D. A., Shabanova, T. N., Zenkin, I. N. Invention Patent RBU 2520118 C2. Composition for laying the bases of road pavements and other structures [Kompozitsiya dlya ustroystva osnovanii dorozhnykh odezhd i drugikh sooruzhenii]. Patent owner: Federal State Budgetary Institution of Higher Professional Education Tyumen State University of Architecture and Civil Engineering. Application 03.09.2012; published 20.06.2014, Bulletin. No. 17, 11 p. [Electronic resource]: https://rusneb.ru/catalog/000224_000128_0002520118_20140620_C2_RU/?ysclid=lsdbqebhvj270351254. Last accessed 23.12.2023. ●

Information about the authors:

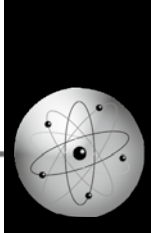
Doroshenko, Kirill A., Ph. D. Student at the Department of Track and Track Facilities of Russian University of Transport, Moscow, Russia, inozrelez@mail.ru.

Ashpiz, Evgeny S., D.Sc. (Eng), Associate Professor, Head of the Department of Track and Track Facilities of Russian University of Transport, Moscow, Russia, geonika@inbox.ru.

Korostelev, Vyacheslav A., founder of Komkor LLC, Krasnodar, Russia, sk2100024@gmail.com.

Article received 06.12.2023, approved after reviewing 22.12.2023, accepted 27.12.2023.





ORIGINAL ARTICLE

DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-6-5>

Increasing the Dynamic Characteristics of the Locomotive by Changing the Position of the End Coils of the Springs of the Body Spring Suspension



Sergey G. SHANTARENKO



Sergey V. SAVINKIN

*Sergey G. Shantarenko¹,
Sergey V. Savinkin²*

Omsk State Transport University, Omsk, Russia.

¹ WoS Researcher ID: B-1719-2016; Scopus Author ID: 57200089403; Russian Science Citation Index Author ID: 477507.

² ORCID 0000-0002-4015-574X; Russian Science Citation Index Author ID: 1098289.

✉ ² syava-sv@yandex.ru.

ABSTRACT

The article presents the results of a study of the influence of the position of the end coils of the springs of the locomotive body spring suspension on their static deflection and on the parameters of the elastic transverse connection of the bogie with the body, which depends on angular movement of the end coils when a locomotive negotiates curves of different directions, to improve the dynamic qualities of the electric locomotive.

Consideration of various options for installing body springs with the method of mathematical modelling using a computer-aided design software package has resulted in the rationale and

description of the optimal version of the position of the end coils of the springs allowing to improve dynamic qualities of the locomotive thanks to the least resistance to bogie rotation, to the symmetry of the restoring torque and to favourable curve negotiation by locomotive thus reducing the wear rate of the flanges of the wheel tires.

It has been established that if the position of end coils is optimal, the direction of coiling of body springs does not have a significant effect on the symmetry of the restoring torque when the bogie negotiates the curves of different directions.

Keywords: railway transport, body suspension, transverse connection, body spring, end coil, static deflection, restoring torque, lateral force, dynamic characteristics of the locomotive, flange wear.

For citation: Shantarenko, S. G., Savinkin, S. V. Increasing the Dynamic Characteristics of the Locomotive by Changing the Position of the End Coils of the Springs of the Body Spring Suspension. World of Transport and Transportation, 2023, Vol. 21, Iss. 6 (109), pp. 208–215. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-6-5>.

*The text of the article originally written in Russian is published in the first part of the issue.
Текст статьи на русском языке публикуется в первой части данного выпуска.*

INTRODUCTION

The underframe is part of the design of the locomotive, ensuring its movement along a rail track, and is a carriage with wheelsets on which the necessary power and auxiliary equipment is located. The underframe is the main body structure of the locomotive directly ensuring its movement.

The underframe is subject to a number of mandatory design requirements and maintenance conditions during operation, which include the ability:

- To move on straight and curved sections of the track without causing overloads in structural elements.
- To maintain the strength of components and parts throughout their service life.
- To protect equipment against harmful effects of vibrations and the external environment.

The bogies perceive traction and braking forces, lateral, horizontal and vertical forces when the locomotive passes uneven tracks and transmit them through spring supports to the body frame. The transverse connection of the bogie frame with the body is carried out due to the transverse compliance of the body springs and the stiffness of the springs of stop pins, which also provide the ability to rotate the bogie in curved sections of the track and dampen various forms of vibration of the body [1].

The spring suspension should have the necessary flexibility and the ability to absorb (dampen) vertical and lateral vibrations that occur during movement of an electric locomotive and evenly distribute the loads between the wheelsets and wheels [2].

The so-called dynamic characteristic or qualities of an electric locomotive depend on the design features of the spring suspension and its parameters, as well as on how the oscillating masses of the body and bogie are distributed [2; 3].

The vertical stiffness of the primary suspension (on the wheel) is determined by the total stiffness of the springs and the stiffness of the vertical locking plate sets connected parallel to them. The presence of a parallel connected flexible element (locking plates sets) with significant stiffness does not allow make the primary spring suspension sufficiently soft. Thus, reducing the stiffness of the springs by half leads to a decrease in the total stiffness by only 30 %. To simultaneously ensure the

necessary strength of the springs, their overall dimensions would have to be significantly increased, which is impossible. To reduce the dynamic impact of forces acting on the locomotive from the track and to increase the efficiency of damping vertical vibrations of its underframe, the spring suspension of the locomotive is carried out as two-stage suspension. The secondary suspension consists of flexible side supports, through which the weight of the body is transferred to the bogie frames. The location of the side supports, and the stiffness of the secondary suspension are determined by the conditions for the rational use of the adhesion weight (weight on the driving wheels) of the locomotive when applying tractive force [4], the selection of the optimal damping torque that dampens the horizontal vibrations of the locomotive, and the rational perception of the body weight by the bogie frame.

The objective of the study, the results of which are presented in this article, was to determine the optimal option for installing the end coils of springs of the flexicoil type for a body spring suspension from the point of view of increasing the dynamic characteristics of an electric locomotive.

The work was carried out using the mathematical modelling method including the application of the universal MathCAD software, the Siemens NX10 software package based on the finite element method and using the linear static analysis.

RESULTS

Assessment of the Influence of the Position of the End Coils of Body Springs on the Dynamic Characteristics of the Locomotive

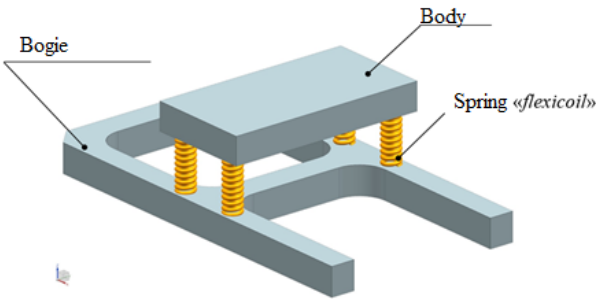
The modern options for spring suspension for traction rolling stock comprise technical solutions, the use of which is associated with operation of springs regarding transverse (shear) loads [5]. An example is the body suspension used on electric locomotives of the 2ES6 series, made through four flexicoil springs on each bogie (two on each side). The connections between the body and the bogie frame are designed to transmit all types of forces between the body frame and the bogie. Rotation of the bogie relative to the body in curved sections of the track causes transverse deformation of the end coils of the springs, while the bogie is subject to a restoring



Table 1

Properties of the flexicoil spring [performed by the authors]

Designation	Name	Value
Steel	60C2XA	
G	Shear modulus	78 kN/ mm ²
E	Modulus of normal elasticity	196 kN / mm ²
d	Spring rod diameter	46 mm
D	Average spring diameter	197 mm
n	Number of operating coils	9
n_1	Total number of coils	11
h_0	Free height of spring	650 mm
F_1	Calculated vertical static load on spring	66,2 kN
s_1	Calculated static spring deflection under load F_1	105 mm
C	Longitudinal spring stiffness	640 N/ mm
C_0	Lateral spring stiffness	123 N/ mm
h_1	Spring height under calculated static load F_1	549 mm
m	Spring mass	79 kg



Pic. 1. 3D model of the design of the body spring suspension of the 2ES6 electric locomotive [performed by the authors].

torque as described in GOST [Russian state standard] 34628–2019¹ and 2ES6.00.000.00 RE5² operating manual. The position of the end coils of the springs affects the restoring torque caused by transverse deformation of the springs acting on the bogie, on the parameters of the flexible transverse connection of the body with the bogie when the locomotive negotiates curved sections of the track, and can lead to misalignment of the body relative to the bogie frame and uneven distribution of vertical loads along the axes of the wheelsets [2; 6].

Modern computer-aided design software systems, due to the ability to analyse many options for the relative arrangement of structures,

components and parts, make it possible to achieve an optimal design solution³ [7; 8]. When implementing this approach, it is possible to qualitatively and quantitatively assess the influence of the design features of the units and their relative position on the performance of the entire structure [9; 10].

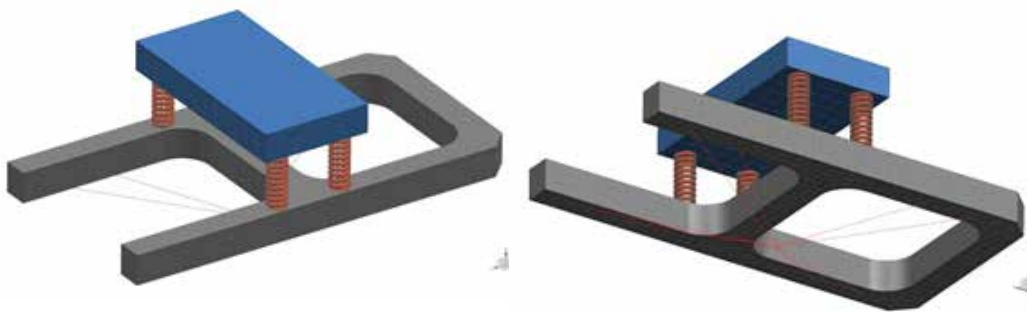
This principle was used to find the optimal option for installing flexicoil type springs in the body spring suspension of electric locomotives of the 2ES6 series. During the design process, three options for the position of the end coils of the body springs in relation to the sides of the bogie frame were studied, including the option recommended in the operating manual for the 2ES6 electric locomotive, with the end coils oriented outside the bogie.

The study allowed assessing of the influence of the position of the end coils of body springs on their static deflection, revealing a relationship

¹ GOST [Russian state standard] 34628–2019. Springs and spring kits for spring suspension of railway rolling stock. Methods for calculating strength under the action of longitudinal and combined loads. Moscow, Standards Publishing House, 2020, 24 p. [Electronic resource]: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293723/4293723988.pdf?ysclid=lnykd2ck61744121497>. Last accessed 26.05.2023.

² 2ES6 DC cargo electric locomotive with commutator traction motors. Operating manual. Part 6. Mechanical part. 2ES6.00.000.00 RE5. Yekaterinburg: Publishing house of Ural Locomotives LLC, 2011, 97 p.

³ Universal mechanism 9. User manual. Modelling the dynamics of railway carriages. Official website www.universalmechanism.com: 2021, 268 p. [Electronic resource]: <http://www.universalmechanism.com/download/90/rus/08umloco.pdf>. Last accessed 19.11.2022.



Pic. 2. FEM of the body spring suspension of the 2ES6 electric locomotive [performed by the authors].

between their location and the magnitude of the angular movement of the end coil, which in turn has a significant impact on the resulting transverse deformation of the springs and on the parameters of the flexible transverse connection of the bogie with the body when the locomotive negotiates curved sections of the track [11].

The peculiarity of the design of flexicoil springs is their transverse stiffness, which is five times less than the longitudinal one. This design solution does not prevent the bogie from rotating in curves, and the restoring torque from the transverse deformation of the springs with the correct orientation of the end turns depends on the angle of rotation of the bogie and is equal to $11.75 \text{ kN}\cdot\text{m}/\text{deg}^2$. Table 1 shows the parameters of the flexicoil body spring.

Study of the influence of the position of the end turns on the parameters of the flexible transverse connection of the locomotive body suspension was carried out using the Siemens NX10 software package [7].

The calculated 3D model of the design of the body spring suspension of the electric locomotive of the 2ES6 series is shown in Pic. 1.

The bogie is represented by a dimensional model, and the body of the electric locomotive is represented as a volumetric mass element with characteristic points for installing body springs. The springs are modelled in full accordance with the design documentation.

To perform the calculation, six finite element models (FEM) were created [12], one of which is shown in Pic. 2.

The other models differ only in orientation of the end coils of the springs relative to the longitudinal axis of the bogie and the direction (depending on the direction of the negotiated curve) of the force Q_m acting on the spring set and tending to rotate the bogie through an angle φ .

The structural elements are modelled with 3D *CTETRA(10)* and *CHEXA(20)* elements.

The installation of the bogie on the axle-box springs was modelled by 1D *RBE2* elements, the dependent nodes of which are connected to the places where the axle-box spring supports are installed on the bogie. The independent unit is located on the axis of rotation of the safety king pin of the electric locomotive and is fixed according to five degrees of freedom (movements along three *XYZ* axes are limited and rotations relative to the *X* and *Y* axis are limited).

The bogie body simulator is limited along its vertical edges by two degrees of freedom (movements along *X* and *Y* axes are limited).

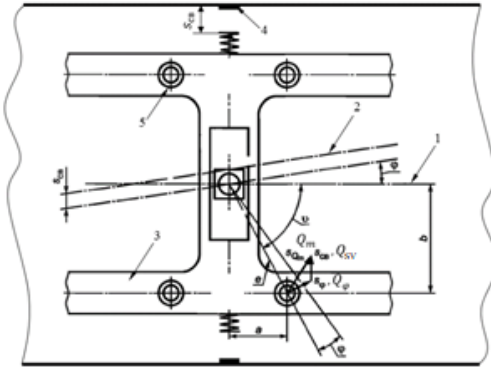
The contact points of the body springs with the bogie and the body simulator are modelled with a Face Gluing type connection, which is a rigid connection between structural elements that eliminates transverse movements of the end coils of the body springs in the lower guide cups of the bogie frame and in the upper cups of the body frame.

Calculations of the angle of rotation of the bogie relative to the body were carried out using the Siemens NX10 software package, based on the finite element method, and using a nonlinear static analysis.

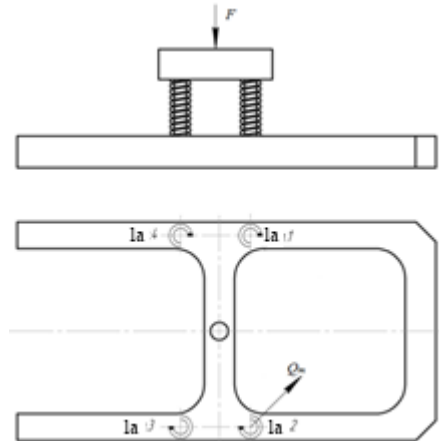
When an electric locomotive negotiates a curve, the forces Q_φ from the rotation and the forces Q_{sv} from the sideslipping of the bogie act on the set of body flexicoil springs in the transverse direction. These two forces result in the force Q_m , which tends to rotate the bogie through an angle φ (Pic. 3). The reaction to the force Q_m will be the moment of resistance to rotation (restoring torque), tending to return the bogie to its original position.

When calculating, we accepted that the vertical static force from the mass of the electric locomotive per spring set of one bogie, $F = 270$

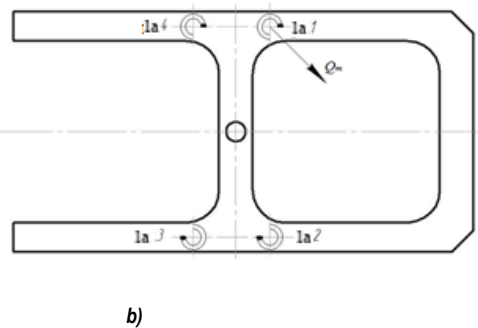
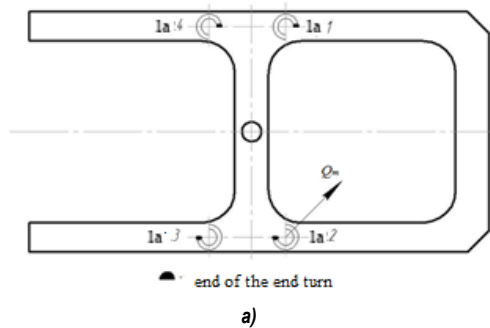




Pic. 3. Calculation diagram of transverse deformations of body springs when the locomotive moves in a curve: 1 – longitudinal axis of the body; 2 – bogie axis during rotation and swaying; 3 – bogie frame; 4 – body bolster; 5 – body spring [performed by the authors].



Pic. 4. Directions of action of design forces [performed by the authors].



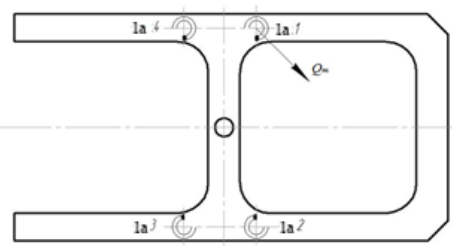
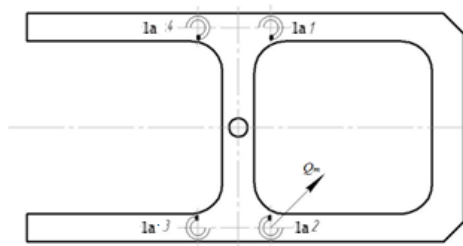
Pic. 5. Design diagram No. 1: a) – movement of the locomotive in the left curve; b) – movement of the locomotive in the right curve [performed by the authors].

kN, and the transverse force oriented to the longitudinal axis of the bogie at an angle of 315° or 45° depending on the direction of the curve, $Q_m = 30$ kN (Pic. 4).

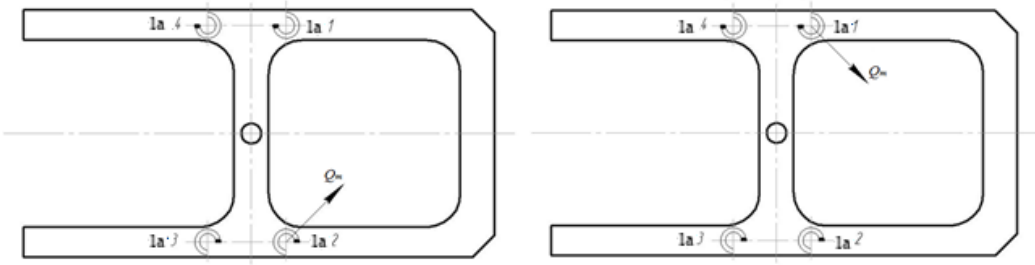
Determining the Optimal Option for Installing the End Coils of Springs of the Flexicoil Type for Body Spring Suspension

To find the optimal position of the end coils of the spring set, at which the restoring torque of

the bogie will be symmetrical, and the influence of the torsional moments arising in the working coils of the springs under the influence of a vertical static load on the parameters of the transverse elastic connection of the bogie with the body will be minimal [13], three position options were studied while six design cases were accepted depending on the direction of the curve negotiated by locomotive. Design cases and diagrams of the position of the end coils of the springs are shown in Pics. 5–7.



Pic. 6. Design diagram No. 2 [performed by the authors].

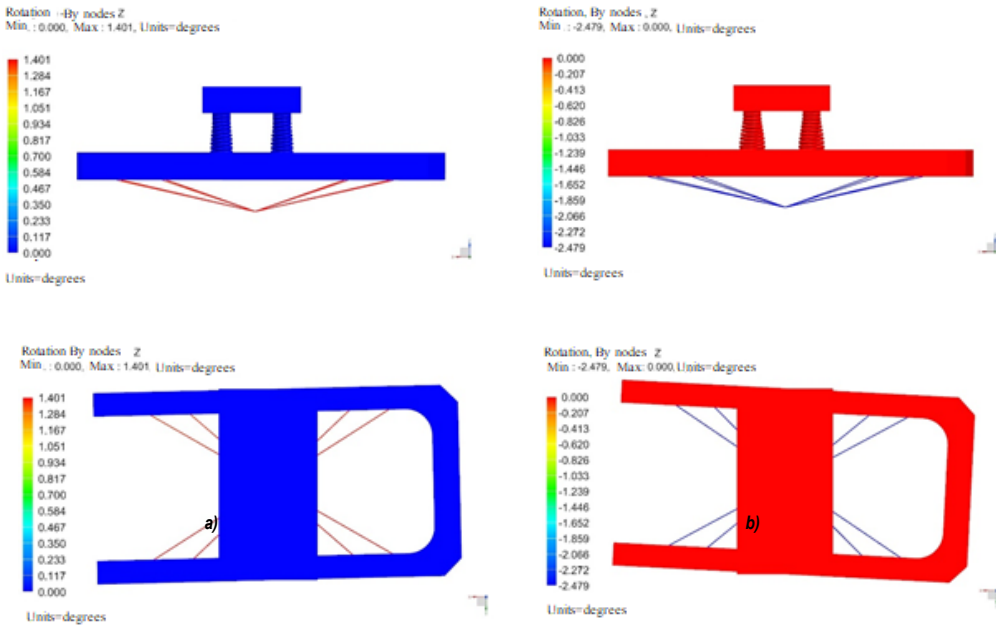


Pic. 7. Design diagram No. 3 [performed by the authors].

Table 2

The value of angles for design diagrams [performed by the authors]

Design diagram	Spring 1	Spring 2	Spring 3	Spring 4
1	0°	180°	180°	0°
2	90°	270°	270°	90°
3	180°	0°	0°	180°



Pic. 8. Fragment of calculating the angle of rotation of the bogie in the Siemens NX10 software package (design diagram No. 1): a) – movement of the locomotive in the left curve; b) – movement of the locomotive in the right curve.

The angles between the longitudinal axis of the bogie and the end of the end coil of the spring are shown in Table 2.

The results of calculating the angle of rotation of the bogie relative to the body of the electric locomotive for all design diagrams and cases are given in Table 3.

The «—» sign is used when the bogie is rotating clockwise, i.e., the locomotive negotiates the right curve.

Taking the example of the design diagram No. 1 (Pic. 5), a fragment of calculating the angle

Table 3

Values of rotation angles of the bogie relative to the electric locomotive body [performed by the authors]

Design diagram	$\varphi, ^\circ$	Curve direction
1	1,401	left
	-2,479	right
2	2,099	left
	-1,971	right
3	2,215	left
	-1,121	right



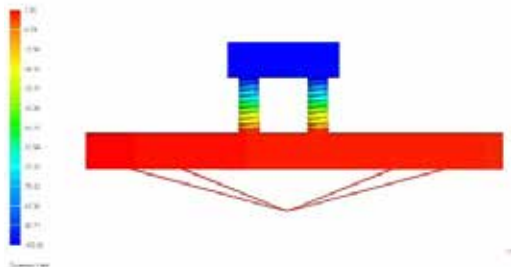


Рис. 9. Фрагмент расчета статического прогиба кузовного пружинного комплекта от действия вертикальной статической силы F в программном комплексе Siemens NX10.

of rotation of the bogie in the Siemens NX10 software package is shown in Pic. 8.

To assess the influence of the position of the end coils of the body springs on their static deflection, as well as to assess the movements of the bogie (angle of rotation) due to unbalanced torsional moments arising in the working coils of the springs from the influence of a vertical static load, the force Q_m was excluded from the FEM and design diagrams. This condition can be interpreted as movement of the locomotive along an ideal straight section of track [14] and used when assembling the mechanical part during the repair process to comply with the regulated parameters of the flexible transverse connection of the bogie with the body and preserve them in operation [6].

The calculation results are shown in Table 4.

One of the fragments of calculating static deflection in the Siemens NX10 software package is shown as an illustration in Pic. 9.

Fragments of calculations of the angles of rotation of the bogie are similar to those presented in Pic. 8.

Taking into account the requirements for the dynamic qualities of the locomotive and with the vertical dynamics coefficient of the second stage of the spring suspension equal to 0,25 (GOST R 55513–2013⁴), which corresponds to real operating conditions, the longitudinal deformation of the springs increases by 26 mm, the difference in the angles of rotation of the bogie to the left and right along the direction of the curve relative to the electric locomotive body, taking into account the action of the force Q_m , increases by 1,6°, and the angle of rotation of the bogie relative

Table 4

Static deflection values for a set of body springs and the angle of rotation of the bogie under the action of force F alone

Design diagram (only force F)	Static deflection, mm	φ , °
1	105,50	–0,567
2	105,10	0,1
3	105,58	0,578

to the electric locomotive body under the action of a vertical force F alone increases by 0,24°, which has a significant negative impact on the characteristics of the transverse flexible connection of the bogie with the body and contributes to the skewing of the bogie in a curve.

CONCLUSIONS

Thus, the conducted research has resulted in identification of the optimal layout of the end coils of body springs in which, the angular movement of the end coils under the influence of the vertical force from the mass of the body per bogie will be minimal (0,1°), and the restoring torque from the lateral deformation the springs will be symmetrical and the same in value regardless of the direction of the curve of the rail track (Pic. 6).

This orientation of the end coils of the body flexicoil springs contributes to the symmetry of the parameters of the transverse flexible connection of the bogie with the body when the locomotive negotiates the curves of different directions, ensuring a uniform effect on the ridges of the tires of the wheelsets, and does not affect the static deflection of the springs. The same coiling (right) of all four body springs when installed in accordance with design diagram No. 2 (Pic. 6) does not have a significant effect on the bogie's resistance to negotiating the curves of different directions.

The rational installation of the end coils of the body suspension springs alone can reduce the lateral force acting on the tire flange, thereby creating more favourable conditions for the bogie to negotiate the curved sections of the track, which will help reduce the wear rate of the wheelset tire flanges [15–17].

The proposed algorithm for selecting the position of the end coils of body springs can be used for traction rolling stock of all series, which use the similar design solutions for body spring suspension as those used for the 2ES6 electric locomotive.

⁴ GOST R [Russian state standard] 55513–2013. Locomotives. Requirements for strength and dynamic properties. Moscow, Standartinform publ., 2013, 46 p. [Electronic resource]: <https://docs.cntd.ru/document/1200104254?ysclid=lnykb5q9v354720493>. Last accessed 26.05.2023.

REFERENCES

1. Garg, V. K., Dukkipati, R. V. Dynamics of Railway Vehicle Systems [Russian edition's title: *Dinamika podvizhnogo sostava*]. Transl. from English by K. G. Bomshtein, ed. by N. A. Pankin. Moscow, Transport publ., 1988, 391 p. ISBN 5-277-00226-X.
2. Shantarenko, S. G., Savinkin, S. V., Sviridova, Yu. A. Uneven distribution of axial loads as a factor of unilateral wear of the flanges of wheelsets of electric locomotives of the 2ES6 series [Neravnomernoe raspredelenie osevykh nagruzok kak faktor odnostoronnego iznosa grebnei kolesnykh par elektrovozov serii 2ES6]. Transport and logistics: development in the context of global changes in flows: Collection of scientific works of VII international scientific-practical conference. Rostov-on-Don, 2023, pp. 410–414. ISBN 978-5-907295-82-7.
3. Savoskin, A. N., Burchak, G. P., Bondarenko, D. A. Probabilistic methods in problems of dynamics, strength and reliability of rail vehicles: stereotype edition [Veroyatnostnie metody v zadachakh dinamiki, prochnosti i bezotkaznosti relsovykh ekipazhei: Stereotipnoe izdanie]. Moscow, Alliance Publishing House, 2022, 612 p. ISBN 978-5-00106-528-9.
4. Lisunov, V. N. The use of forces of interaction between the driving wheel and the rail in traction and electric braking modes: Monograph [Ispolzovanie sil vzaimodeistviya dvizhushchego kolesa s relsom v rezhimakh tyagi i elektricheskogo tormozheniya: Monografiya]. Omsk, Omsk State Transport University, 2003, 160 p. ISBN 5-94941-016-5.
5. Buinosov, A. P., Fetisova, N. G. Options for the use and calculation of cylindrical helical springs in the spring suspension of modern locomotives [Varianty ispolzovaniya i raschet tsilindricheskikh vintovykh pruzhin v resornom podveshivaniy sovremennykh lokomotivov]. Scientific and Technical Bulletin of Volga Region, 2016, Iss. 5, pp. 62–64. EDN: WRPXNJ.
6. Shantarenko, S. G., Savinkin, S. V. The influence of the location of the end coils of the springs of the locomotive body spring suspension on the parameters of the elastic transverse connection of the body with the bogie [Vliyaniye raspolozheniya kontsevykh vitkov pruzhin kuzovnogo podveshivaniya lokomotiva na parametry uprugoi poperechnoi svyazi kuzova s tezhkoi]. Bulletin of Rostov State Transport University, 2023, Iss. 2, pp. 45–50. DOI: 10.46973/0201-727X_2023_2_5.
7. Goncharov, P. S., Artamonov, I. A., Khalitov, T. F., Denisikhin, S. V., Sotnik, D. E. NX Advanced Simulation. Engineering analysis. Moscow, DMK Press, 201, 504 p. ISBN 978-5-94074-841-0.
8. Andryushchenko, A. A., Shutova, M. N. The influence of the location of the support coil of the spring of the axle-box spring suspension on the strength of the axle-box body of the 2ES5K electric locomotive [Vliyaniye raspolozheniya opornogo vitka pruzhiny buksovogo resornogo podveshivaniya na prochnost korpusa buksy elektrovoza 2ES5K]. Bulletin of the All-Russian Scientific Research and Design Institute of Electric Locomotive Engineering, 2008, Iss. 1 (55), pp. 168–174. EDN: JWLASJ.
9. Shantarenko, S. G., Savinkin, S. V., Sviridova, Yu. A. Structural features of mechanical components and failures of new series locomotives [Konstruktsionnye osobennosti uzlov mekhanicheskoi chasti i otkazy lokomotivov novykh serii]. Operational reliability of the locomotive fleet and increasing the efficiency of train traction: materials of XII All-Russian scientific and technical conference with international participation. Omsk, 2022, pp. 96–106. ISBN 978-5-94941-311-1.
10. Parnyuk, S. M. Dependability of technical means and approaches to technical regulation [Nadezhnost tekhnicheskikh sredstv i podkhody k tekhnicheskomu regulirovaniyu]. Locomotive, 2022, Iss. 7 (787), pp. 13–18. EDN: TCSDHB.
11. Savinkin, S. V., Shantarenko, S. G. The influence of the transverse rigidity of the body suspension of the 2ES6 electric locomotive on the wear of the flanges of wheelsets [Vliyaniye poperechnoi zhestkosti kuzovnogo podveshivaniya elektrovoza 2ES6 na iznos grebnei kolesnykh par]. Innovative projects and technologies in education, industry and transport: Materials of XVI scientific conference dedicated to the Day of Russian Science. Ed. Galiev, I. I. Omsk, OmGUPS publ., 2022, pp. 401–407. EDN: ZPZQSF.
12. Ashurkova, S. N., Antipin, D. Ya. Selection of a rational load-bearing structure of a passenger car body with reinforcement elements of a perforated section [Vybor ratsionalnoi nesushchei konstruktssii kuzova passazhirskogo vagona s podkreplyayushchimi elementami perforirovannogo secheniya]. Transport Urala, 2019, Iss. 2 (61), pp. 23–27. EDN: HKPNJX.
13. Martyanov, A. A., Martyanov, A. P., Yakhin, S. M. Practical calculation of elastic elements with a large pitch of turns for strength and rigidity during compression deformation [Prakticheskiy raschet uprugikh elementov s bolshim shagov vitkov na prochnost i zhestkost pri deformatsii szhatiya]. Bulletin of Kazan State Agrarian University, 2010, Vol. 5, Iss. 4 (18), pp. 117–119. EDN: NBJOUH.
14. Galiev, I. I., Minzhasarov, M. Kh., Lipunov, D. V. Formation of a mathematical model of vertical oscillations of 2ES6 electric locomotives considering the dynamics of wheel-motor units [Formirovaniye matematicheskoi modeli vertikalnykh kolebaniy elektrovozov 2ES6 s uchedom dinamiki kolesno-motornykh blokov]. Izvestiya Transsiba, 2021, Iss. 4 (48), pp. 96–108. EDN: DXXRHE.
15. Buinosov, A. P. Methods for increasing the service life of tires of wheelsets of traction rolling stock: Monograph [Metody povysheniya resursa bandazhei kolesnykh par tyagovogo podvizhnogo sostava: Monografiya]. Moscow, Training and methodological centre for railway education, 2010, 224 p. ISBN 978-5-9994-0038-3.
16. Kuznetsov, V. F., Shantarenko, S. G., Savinkin, S. V. Wear of the flange material of the locomotive wheel tire [Iznos materiala grebnya bandazha kolesa lokomotiva]. Izvestiya Transsiba, 2022, Iss. 4 (52), pp. 82–88. EDN: EFFXCC.
17. Doronin, S. V., Doronina, I. I. Controlling the movement of locomotive bogies in curves [Upravleniye dvizheniem lokomotivnykh tezhkek v krivyykh]. Izvestiya Transsiba, 2016, Iss. 1 (25), pp. 25–30. EDN: VYXGPZ. ●

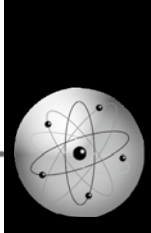
Information about the authors:

Shantarenko, Sergey G., D.Sc. (Eng), Professor at the Department of Transport Mechanical Engineering Technology and Rolling Stock Maintenance of Omsk State Transport University (OmGUPS), Omsk, Russia, ShantarenkoSG@omgups.ru.

Savinkin, Sergey V., Ph.D. student at the Department of Transport Mechanical Engineering Technology and Rolling Stock Maintenance of Omsk State Transport University (OmGUPS), Omsk, Russia, syava-sv@yandex.ru.

Article received 05.08.2023, approved 13.11.2023, accepted 17.11.2023.





ORIGINAL ARTICLE

DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-6-6>

Unification of Onboard Traction Energy Storage Devices for Railway Rolling Stock

**Mikhail V. Yaroslavl'tsev***Toraighyrov University, Pavlodar, Republic of Kazakhstan.**ORCID 0000-0002-1440-2065; SCOPUS Author ID 56532450300; Russian Science**Citation Index SPIN-code 3977-8959.**✉ myaroslavl'tsev@yandex.ru.***Mikhail V. YAROSLAVTSEV****ABSTRACT**

As the cost of traction lithium batteries decreases, many rolling stock models are being created that use them to receive recovery energy, equalise the load on the energy source, and ensure autonomous operation. The objective of the work is to show the advantages of separate design and production of onboard traction storage devices and the rolling stock using them, which will require standardisation of energy storage devices, as well as to outline the range of requirements that will need to be set when developing a standard, and to illustrate proposals by identifying possible requirements for weight, size and energy characteristics of a unified energy storage device. For this purpose, a review of approaches to the use of energy storage devices and modern designs of rolling stock on which

traction batteries are used is followed by main scenarios for the use thereof.

Following identification of main processes of energy conversion by the traction drive of locomotives at various time intervals, the parameters of energy storage devices were assessed for a wide range of possible scenarios for their application using methods of traction theory.

The results obtained allowed calculating main characteristics of unified energy storage modules. A specific analysis was carried out to identify the limitations that determine energy intensity and power, weight, dimensions and method of mounting of storage devices, their rated voltage. Requirements are formulated for design of a standard mechanical, electrical and information interface of the proposed modules.

Keywords: railways, traction energy storage device, lithium-ion battery, standardisation, interchangeability, energy saving.

For citation: Yaroslavl'tsev, M. V. Unification of Onboard Traction Energy Storage Devices for Railway Rolling Stock. World of Transport and Transportation, 2023, Vol. 21, Iss. 6 (109), pp. 216–226. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-6-6>.

The text of the article originally written in Russian is published in the first part of the issue.

Текст статьи на русском языке публикуется в первой части данного выпуска.

INTRODUCTION

A rapid introduction of traction energy storage devices (TESD) intended for railway rolling stock has manifested since the beginning of the 2020s [1; 2]. Catenary-battery electric trains with a range of up to 100–200 km have been operated in the UK, Germany, Denmark, Japan and are planned for delivery to the USA, Latvia and other countries^{1, 2, 3, 4}. In 2021, first battery electric locomotive with a storage unit of a capacity of 2,4 MWh, designed for coordinated operation together with mainline diesel locomotives, was tested in the USA⁵. EMD Joule offers similar battery electric locomotives with storage capacity from 4 to 14,5 MWh with a power output of 1500–5700 kW⁶, which are being tested in the USA and Brazil, and Wabtec offers battery electric locomotives of capacity from 1,1 to 8,5 MWh with power output up to 5000 kW⁷. In China, a battery electric locomotive ordered by Thailand with a range of up to 200 km⁸, a mainline electric locomotive with a storage capacity of 0,2 MWh for shunting operations and a catenary-battery shunting locomotive with a capacity of 0,35 MWh ordered by Hungary have been built⁹. Several other

electric locomotives with battery-powered last-mile capability are being developed¹⁰. In Russia, in recent years, hybrid and catenary-battery shunting locomotives of TEM35, TEM5Kh, TEM9N, EMKA2 series have been developed¹¹.

The active development of new types of locomotives has become possible following improvement of lithium-based batteries, which have a high specific energy and high specific power, as well as of electric double layer capacitors (EDLC). Their typical parameters according to data from [3] and from manufacturers¹² are described in Table 1. The scope of application of traction lithium batteries is regularly expanding as their price decreases. Thus, according to various estimates by Bloomberg, by 2030 the price of batteries will decrease by 1,5–3 times compared to 2023¹³.

Technical and economic calculations carried out by Stadler in 2021 showed that the use of battery electric trains on non-electrified lines can be more profitable than diesel trains, even

¹ Stadler Flirt Akku. [Electronic resource]: <https://www.stadlerail.com/en/flirt-akku/details/>. Last accessed 22.05.2023.

² Alstom presents its battery-powered multiple unit train in Saxony [Electronic resource]: https://www.alstom.com/sites/alstom.com/files/2021/09/07/20210907_PR_DACH_Saxony_BEMU_Demo_EN.pdf. Last accessed 22.05.2023.

³ 新たな「蓄電池電車」を男鹿線に導入します [A new battery train will appear on the Oga line] [Electronic resource]: <https://www.jreast.co.jp/akita/press/pdf/20151120-1.pdf>. Last accessed 22.05.2023.

⁴ Metro class 777 IPEMU. [Electronic resource]: https://www.stadlerail.com/media/pdf/mmer_ipemu0922e.pdf. Last accessed 22.05.2023.

⁵ BNSF Battery Electric Locomotive Report. [Electronic resource]: <https://ww2.arb.ca.gov/sites/default/files/2022-11/zanzeff-bnsf-belreport.pdf>. Last accessed 22.05.2023.

⁶ EMD Joule battery-electric locomotive. [Electronic resource]: <https://s7d2.scene7.com/is/content/Caterpillar/CM20220627-26f7e-6007b>. Last accessed 22.05.2023.

⁷ Battery electric locomotive technology FLXdrive. [Electronic resource]: <https://www.wabteccorp.com/FLXdrive-Battery-Electric-Locomotive?inline>. Last accessed 22.05.2023.

⁸ CRRC Dalian delivers battery locomotive to Thailand. [Electronic resource]: <https://www.railjournal.com/technology/crrc-dalian-delivers-battery-locomotive-to-thailand/>. Last accessed 22.05.2023.

⁹ CRRC Locomotives in Europe. [Electronic resource]: <https://crrczelc-europe.com/locomotives-in-europe/#norebro-custom-646cada43b9861>. Last accessed 22.05.2023.

¹⁰ Traction: Going the last mile. [Electronic resource]: <https://www.railwaygazette.com/in-depth/traction-going-the-last-mile/59444.article>. Last accessed 22.05.2023.

Traxx locomotive with zero-emission last mile operational in 2025. [Electronic resource]: <https://www.railtech.com/rolling-stock/2022/09/20/traxx-locomotive-with-zero-emission-last-mile-operational-in-2025/>. Last accessed 22.05.2023.

¹¹ Seleznev, I. L., Shafrin, A. V., Chekmarev, A. E., Khokhryakov, V. A., Vanin, I. V. Meet: TEM5Kh – the concept of a new hybrid locomotive [Znakomtes: TEM5Kh – kontsept novogo gibridnogo lokomotiva]. *Lokomotiv*, 2019, Iss. 12, pp. 30–32.

Kuznetsov, L. V. Sinar locomotives follow the course of the Environmental Strategy [Lokomotivy «Sinary» sleduyut kursom Ekologicheskoi strategii]. *Lokomotiv*, 2021. – № 11. – С. 2–3.

Electric locomotive EMKA2. [Electronic resource]: <https://eec.eaunion.org/comission/departament/dotp/klimaticheskaya-povestka/bank/118091/>. Last accessed 22.05.2023.

¹² Winston battery. [Electronic resource]: <http://en.winston-battery.com/index.php/products/power-battery>. Last accessed 22.05.2023.

SCiB rechargeable battery – Toshiba. [Electronic resource]: <https://www.global.toshiba/ww/products-solutions/battery/scib/product/cell.html>. Last accessed 22.05.2023.

Ultracapacitor overview – Maxwell Technologies. [Electronic resource]: <https://maxwell.com/products/ultracapacitors/>. Last accessed 22.05.2023.

¹³ Goldie-Scot, L. A Behind the Scenes Take on Lithium-ion Battery Prices – Bloomberg NEF. [Electronic resource]: <https://about.bnef.com/blog/behind-scenes-take-lithium-ion-battery-prices/>. Last accessed 22.05.2023.

Bullard N. Even High Battery Prices Can't Chill the Hot Energy Storage Sector – Bloomberg NEF. [Electronic resource]: <https://www.bloomberg.com/news/articles/2023-01-12/even-high-battery-prices-can-t-chill-the-hot-energy-storage-sector>. Last accessed 22.05.2023.



Table 1

**Technical and economic characteristics of energy storage devices
[performed by the author based on data [3]^{9,12}]**

Type of ESD	LiFePO ₄	Li ₄ Ti ₅ O ₁₂	EDLC
Specific energy, Wh/kg	125	90	6
Specific discharge power, W/kg	250–350	1800	not limited for traction storage devices
Specific charge power, W/kg	120	1800	
Density of elements, t/m ³	1,6	2,0	1,0
Specific cost, \$/kWh	120–150	200–250	5000–10 000
The number of charge-discharge cycles	3000	up to 20 000	1·10 ⁶ –10·10 ⁶

without considering energy savings from regenerative braking¹⁴.

In the coming years, we can expect development of new series of locomotives equipped with traction energy storage devices for the 1520 mm gauge network. There are many possible scenarios for using TESD on rolling stock [4–11]. A description of the tasks they solve is given below when assessing energy density and power.

Although areas of application differ in the requirements for power and energy density of storage devices, which determines their weight and dimensions, as well as for the service life of the TESD, the operating conditions of traction lithium batteries are similar regardless of their purpose. Currently, energy storage devices, as a rule, are designed individually for each series of rolling stock. But as the scope of their application expands, the unification of energy storage devices becomes relevant.

The development and production of a number of standard sizes of unified modular storage devices for traction rolling stock (TRS) will create the prerequisites for a more dynamic and efficient development of new types of traction. This solution will allow:

1. To increase the reproducibility and repeatability of technical solutions used in production of series of energy storage devices, which will stabilise their quality and reduce costs.
2. To separate the tasks of designing a locomotive and an energy storage device, which will speed up their development and allow expanding the range of production.
3. To create the opportunity to choose

between different types of storage devices on one type of rolling stock.

4. To increase the dependability of operation of rolling stock with energy storage devices due to the ease of their replacement.

5. To obtain a possibility of stationary charging of modules with their exchange at turnover points, if this is justified by operating conditions.

6. To be able to exchange storage devices with different degrees of battery degradation between locomotives operating within the sections of different lengths of battery-powered running and ruling gradient. This will make it possible to extend the service life of energy storage modules beyond the nominal number of charge-discharge cycles under conditions that do not require the implementation of their full capacity.

Standardisation of energy storage devices corresponds to the modern trend towards increasing the modularity of locomotive designs, implemented, for example, in TEM9, TEM23, TEM33 series of diesel locomotives and by some manufacturers of vehicles for modes of transport other than rail¹⁵.

The data presented allow us to conclude on the relevance of the further task of developing new series of TRS using traction energy storage devices. Therefore, *the objective* of the work is to analyse the characteristics and conditions of operation of energy storage devices, to show the feasibility of standardising traction energy storage devices for different types of TRS and for different purposes of their use, and to propose criteria for normalising the parameters of energy storage modules.

To show possible features of energy storage modules for various series of TRS and different

¹⁴ Stadler manifests market leadership in alternative drive technologies: DB Regio orders more battery-operated trains. [Electronic resource]: <https://www.stadlerail.com/en/media/article/stadler-manifests-market-leadership-in-alternative-drive-technologies-db-regio-orders-more-battery-operated-trains/1080/>. Last accessed 22.05.2023.

¹⁵ NIO's battery swap network open to other brands. [Electronic resource]: <https://cnevpost.com/2023/04/02/nio-battery-swap-network-open-to-other-brands-like-cloud-service-william-li/>. Last accessed 22.05.2023.

areas of application, the study has assessed their specific characteristics and considered the limitations of their design according to the conditions of their operation. The *methodology* of the study is described together with the results obtained.

RESULTS

Estimation of Power and Capacity of Onboard Traction Energy Storage Devices

Determining the mass and dimensions of a battery-type energy storage device requires finding its two main parameters which are capacity and power. Their exact calculation for given conditions is a complex task that requires development of parameters for promising locomotives and analysis of their operating modes. Installing powerful energy storage devices on existing series of locomotives is, as a rule, impossible, since this would require significant changes in the equipment layout, traction converter circuits, control systems, body ventilation systems, etc.

It is important to note that to find the values of power and capacity of the energy storage device, it is not enough to know the time distribution of the power consumed by the traction drive. It is necessary to predict the largest and smallest energy reserves of the energy storage device during the voyage, for which it is necessary to establish the dependence of the power of the traction electric drive on time using traction calculations or from records of motion parameter recorders. Although a complete solution of such a problem for a wide range of situations within the framework of a single study is impossible, for the purposes of the article an approximate calculation is offered that allows us to estimate the capacity of onboard energy storage devices under the typical scenarios of their use described below.

In case of *reuse of regenerated braking energy* when stopping at a station, the capacity of the energy storage device is determined primarily by the kinetic energy of train movement. In this situation, the losses to overcome resistance to movement are small in relation to the kinetic energy (1)¹⁶:

$$E = k \frac{mV^2}{2} . \quad (1)$$

¹⁶ The designations used in expressions (1)–(5) are explained after the expression (5).

It is accepted that the power of the energy storage device must ensure implementation of the full power of traction motors.

When *levelling out the unevenness of the traction load* caused by the alternation of modes due to the characteristics of the track profile as well as to the imposed speed limitations, the capacity is estimated by the power of the locomotive and duration of maintaining a given mode (2):

$$E = kPt . \quad (2)$$

As an analysis of the graphs of modes used shows, for locomotives it is typical to alternate positions of control unit at least every 30 minutes. It is typical that electric and diesel trains (motor driven rolling stock (MDRS)) periodically change power consumption which is caused by stops for boarding passengers. In the calculation, it is assumed that the time they travel from station to station does not exceed, as a rule, 15 minutes.

When travelling for *longer distances* power consumption depends primarily on average values of main and additional resistance to movement.

Requirements for TESD *during shunting movements, as well as when overcoming the «last mile»* while approaching the loading site, capacity was evaluated for a travel range of 10 km with an equivalent slope of 5 ‰ according to the expression (3):

$$E = kmL(w + ig) . \quad (3)$$

Movement using only energy storage device along a section of 100 km and 300 km. Capacity of TESD is also determined according to the expression (3). In both cases, it is assumed that the elevation difference on the site is 500 m, which is considered when setting the equivalent slope. For the latter tasks, during the evaluation calculation it is permissible to neglect energy losses caused by speed fluctuations and by braking.

Since TESD can be installed on various types of TRS, the calculation of their characteristics is carried out in specific form, per 1000 kW of locomotive hourly power. To move from specific values to absolute ones, it is necessary to increase them in proportion to the power of the locomotive when determining capacity according to (2) or in proportion to the mass of the train for expressions (1) and (3). However, since at equal coefficient of adhesion and running speed the traction force of a locomotive is proportional to its power, the mass of the train can also be approximately considered proportional to power.



The calculated values of travel speed, slope and length of sections were chosen to ensure the possibility of operating the energy storage devices over the most part of the network. The mass of the train per 1 MW hourly power of the locomotive with an axle load of 25 tons is accepted as corresponding to the critical norm for sections with a ruling gradient of 5 ‰.

When choosing the type of energy storage devices, it is important to consider their service life. As studies of battery durability show [12; 13], the amount of energy that a lithium battery can absorb during its service life weakly (within 20 %) depends on the depth of discharge. When receiving electrical energy from the circuit, the only type of battery for which the cost of received energy exceeds the cost of receiving it from the circuit are lithium titanate batteries [14]. Another advantage is their high power, which in some cases makes it possible to significantly reduce the mass of the energy storage device and make it expedient to use it on rolling stock, despite the higher specific cost compared to lithium iron phosphate (lithium ferrophosphate) batteries. It was for this type that the calculations included an assessment of the mass and dimensions of energy storage devices.

The mass and volume of energy storage devices are determined by their specific characteristics given in Table 1 in accordance with (4, 5):

$$m_{ES} = k_m \max\left(\frac{E}{E_s}, \frac{P}{P_s}\right), \quad (4)$$

$$V_{ES} = \frac{k_v}{\rho} \max\left(\frac{E}{E_s}, \frac{P}{P_s}\right), \quad (5)$$

In expressions (1)–(5):

E – capacity of an energy storage device, kJ;

$k = 1, 2$ – coefficient taking into account losses during energy conversion;

m – mass of the train moved by one section of TRS, t;

V – running speed of the train, m/s;

P – a TRS section's power, kW;

t – duration of TESD being in discharge mode, s;

w – specific resistance to train movement at speed V , N/t;

i – normalised slope at the section where locomotive is battery-driven, ‰;

g – free fall acceleration, m/s²;

L – travel range using battery power, km.

m_{ES} – TESD mass, kg,

V_{ES} – TESD volume, m³,

E_s – specific energy of TESD, kJ/kg,

P_s – specific power of SD, kW/kg,

$k_m = 1,5$ – ratio of the total mass of the module to the mass of the batteries,

$k_v = 2$ – ratio of the total volume of the module to the volume of the batteries,

ρ – battery density, kg/m³.

When calculating, it was assumed that the volume of the module, taking into account the housing and battery control system, is 2 times more than the volume of the battery cells, and the mass of the module is 1,5 times greater. In all cases, the reserve for losses during electrical and electrochemical energy conversions is additionally considered, taken equal to 20 % of the capacity of the energy storage device. Resistance to motion w is determined according to the requirements of the Rules for Traction Calculations¹⁷.

The calculation results are given in Table 2.

As the calculation results show, in case of using lithium-titanate batteries, for most areas of TESD application, except for receiving regenerated braking energy (requiring the least energy reserve), their parameters are determined by capacity. At the same time, for lithium iron phosphate batteries, in most cases the limiting parameter is the battery power. Based on the totality of their characteristics, it is currently advisable to use lithium titanate batteries for most applications, except for ensuring movement over long distances [14].

Since at the design stage of a new series of TRS the designer has the freedom to choose measures to increase the strength of the body and change the electrical equipment circuit, the task of incorporating TESD into the design of the locomotive seems completely solvable. The most important fundamental problem on this path seems to be ensuring the ability to maintain the power of the locomotive without exceeding the restrictions on dimensions and axle load. At the concept level, before development of the design, it can be noted that the existing series of TRS, having a common type of traction and purpose, may have a difference in power per unit mass exceeding 20 %. This supposes a possibility of reducing the weight and dimensions of equipment for installing onboard TESD of relatively small capacity with a total weight of up to 10–15 tons and a volume of up to 10 m³. For tasks that

¹⁷ Rules for Traction Calculations of Train Operation [Pravila tyagovykh raschetov dlya poezdnoi raboty]. Moscow, JSC Russian Railways, 2016, 515 p.

Table 2

Parameters of energy storage devices depending on the function they perform
[performed by the author]

Estimation of the volume of an energy storage module with $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ (LTO) batteries, m^3/MW	1,3	0,6	0,5	6,2	6,2	3,1	3,1	0,7	0,5	33,7	11,2	3,1	51,9	25,3	5,9
Estimation of the mass of the LTO battery, considering the housing and support systems, t/MW	2,1	0,9	0,8	10,2	10,2	5,1	5,1	1,2	0,8	55,6	18,5	5,1	85,6	41,7	9,7
Volume of LTO batteries, m^3	0,6	0,3	0,3	3,1	3,1	1,5	1,5	0,4	0,3	16,8	5,6	1,5	26,0	12,6	2,9
Weight of LTO batteries according to power, t	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Weight of LTO batteries according to capacity, t	1,4	0,6	0,1	6,8	6,8	3,4	3,4	0,8	0,2	37,0	12,3	3,4	57,1	27,8	6,5
Volume of LiFePO_4 batteries, m^3	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	16,7	5,6	5,2	25,7	12,5	5,2
Weight of LiFePO_4 batteries according to power, t	8,3	8,3	8,3	8,3	8,3	8,3	8,3	8,3	8,3	8,3	8,3	8,3	8,3	8,3	8,3
Weight of LiFePO_4 batteries according to capacity, t	1,0	0,4	0,1	4,9	4,9	2,4	2,4	0,6	0,2	26,7	8,9	2,4	41,1	20,0	4,7
Capacity of TESD, MJ	450	200	40	2200	2200	1100	1100	250	75	12000	4000	1100	18500	9000	2100
TESD power, kW	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
Running speed, km/h	80	120	100	80	120	100	20	40	40	80	120	100	80	120	100
Weight, t	1500	300	90	1500	300	90	1500	300	90	1500	300	90	1500	300	90
Type of rolling stock	Cargo train	Passenger train	MDRS	Cargo train	Passenger train	MDRS	Cargo train	Passenger train	MDRS	Cargo train	Passenger train	MDRS	Cargo train	Passenger train	MDRS
Main function of a storage device	Receiving braking energy before stopping			Buffering of load irregularities on the energy source			Autonomous travel over a 10 km area or shunting work			Autonomous travel over a 100 km area, elevation difference up to 500 m			Autonomous travel over a 300 km area, elevation difference up to 500 m		

require the highest capacity of TESD (battery-powered travelling over long distances, overcoming climbs in mountainous areas), it is possible to propose their placement into a specialised section of locomotive, if the current rate of specific energy and cost of TESD allows such a solution.

Basic Requirements for Energy Storage Devices

Operating conditions impose several constraints on the TESD design, which must be determined when drawing up technical specifications. These include:

1. Determining the total mass and dimensions of TESD, based on the requirements for power and capacity, as well as on ensuring operating modes and ease of use. This will allow assignment of an easy-to-use basic module size, which will be a multiple of possible storage device's types.

2. Selecting the rated voltage (range of voltages) of the module and the number of series-connected elements in it. The rated voltage of TESD is determined primarily by the convenience of their interface with the power circuits of the locomotive.

3. Selecting a charge equalisation system, since lithium batteries are damaged when overcharged. Many circuit solutions for such systems are known [15; 16], differing in the amount of energy loss and cost. There is no need to standardise them, but it may be important to consider the requirement for the ability to turn off some of the cells to control the battery voltage and improve its dependability.

4. Ensuring temperature conditions. Although modern traction batteries have a relatively wide range of operating temperatures (from -40 to $+65$ °C for $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$, from -45 to $+85$ °C for LiFePO_4) [15–17], the experience of their



operation indicates the need to narrow the range to maintain high energy and power characteristics of elements. Depending on the amount of current flowing and temperature, both cooling and heating of the batteries may be required [17].

To heat the module in winter, it is necessary to introduce heating elements into its design, as well as external thermal insulation. Cooling can be provided using various coolants. The simplest solution is to use ambient air. In this case, it is advisable to provide an external system for its centralised supply.

5. Design of the TESD interface, which is further understood as a set of technical requirements that ensure mechanical, electrical and logical interfacing of replaceable modules with locomotive systems, being mentioned below.

5.1. Mechanical fastening that ensures reliable fixation of the module and the ability to quickly dismantle it.

5.2. Connection to ventilation ducts for supply and exhaust of cooling air with the possibility of closing the ducts when operating at low temperatures.

5.3. Connection to DC buses for receiving and transmitting electrical energy from the traction converter.

5.4. Providing power supply for the module's own needs when using an external power source, considering the power required to ensure its thermostating.

5.5. Connection to the information bus to provide communication with the locomotive control system.

6. Microprocessor control and diagnostic system. The control system must perform a number of functions, listed below.

6.1. Determining the charge level of the energy storage device.

6.2. Collection of diagnostic information to monitor the degree of wear of battery cells. Assessment of the energy stored within each group of elements based on the voltage across it and the amount of current passed.

6.3. Module temperature and charge equalisation control.

6.4. Module shutdown in case of overvoltage, short circuits, overheating, fire.

6.5. Communications with the locomotive control system, as well as indication of the charge level and emergency conditions on the module body. To ensure versatility and preserve the capacity of communication lines, it is advisable

to select a specialised bus that uses one of the frequently used data transfer protocols, for example CAN. At the same time, the head controller of the communication line ensures interaction of the energy storage devices with the locomotive control system and must be developed considering the features of a specific series.

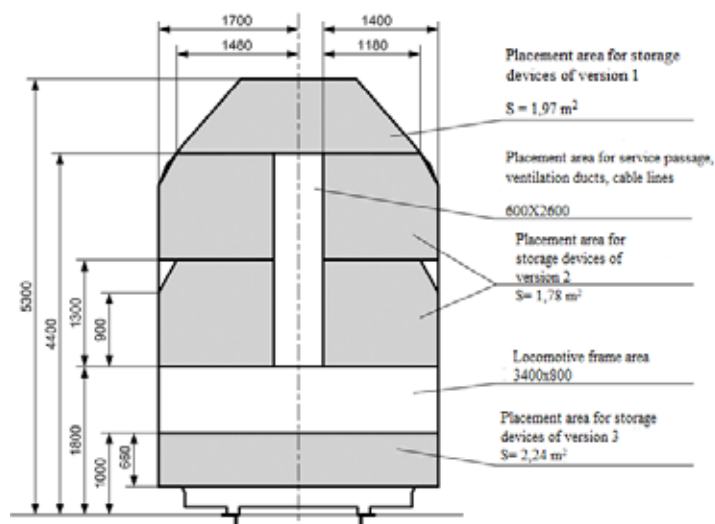
7. The influence of cost and dependability requirements for modules on their design. Despite the long-term downward trend in costs of energy storage devices, battery cells will continue to account for the largest share of energy storage module costs. This justifies increasing the complexity of the design of storage modules for the sake of increasing battery life. The effectiveness of charge equalisation and temperature control solutions should be determined taking into account the effect of increasing the service life of energy storage devices and reducing energy losses in them.

The Rationale of the Main Parameters of Battery Modules

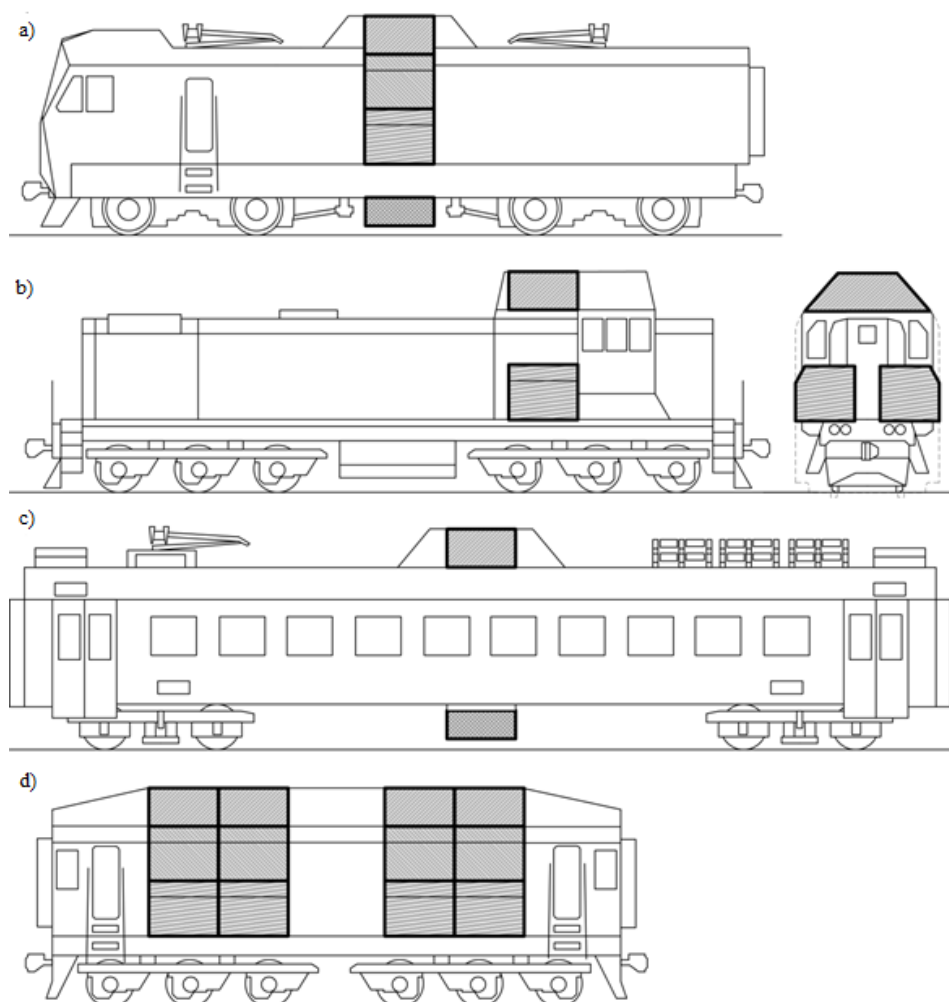
Next, the analysis was carried out of the conditions that most influence the number of elements and system connection diagram in the module.

Capacity, dimensions and weight. The power of locomotive series built over the last decade varies from 880 kW (TEM18DM) to 6600 kW (EP20), changing between mass series in steps of 600–1000 kW, i.e., by 10–15 % of the maximum. To ensure applicability over a wide range of TRS power, it is necessary to limit the capacity of the module to 1000–2000 MJ. To ensure shunting movements, modules with a capacity of 100–200 MJ can be used. In addition to the requirement for multiplicity of TESD capacity and for different modules for various TESD applications and locomotive power, the dimensions of the modules are also limited by design and operational requirements.

To reduce heat loss in winter, reduce the weight of the body and thermal insulation, it is advisable to reduce the outer surface of the module, taking similar overall dimensions along all axes, and also to increase the size and energy storage capacity of the modules. To ensure freedom of arrangement of promising locomotive series and simplify their design, it is desirable, on the contrary, to reduce the size of the modules. The possibility of using mass lifting equipment and transporting modules by road requires that the mass of the module be limited to 5 tons or 10



Pic. 1. Zones of possible placement of energy storage devices in 1-T dimension [performed by the author].



Pic. 2. Possible options for placing modular energy storage devices: a – on mainline locomotives, b – on shunting locomotives, c – on motor driven rolling stock, d – on a specialised section. The number of modules may vary depending on the purpose of installing the TESD [performed by the author].



tons¹⁸. Clarification of their parameters requires considering the design requirements that determine the possibility of placing and servicing modules on rolling stock.

When developing the proposals, the task was set to divide the volume that allows the placement of storage devices within the rolling stock's dimensions into parts of equal cross-section to equalise the length and capacity of modules. As shown in Pic. 1, in the section of size 1-T¹⁹ it is possible to distinguish six zones with a cross-section of about 2 m² each. This allows to assume the mass of a single module to be 5 tons and the length to be 1,7–1,8 m. Possible layout solutions for different storage applications are presented in Pic. 2.

For storage devices placed in the locomotive body, a symmetrical arrangement is proposed while maintaining a 600 mm wide passage between the modules. It is proposed to set the lower boundary of the area of placement of TESD at a height of 1800 mm from the level of the rail head (RHL), which is determined by the frame dimensions of most locomotive series. The upper boundary is set in accordance with the outline of the 1-T dimension. This scheme allows installing modules both vertically, using a crane, and horizontally, using loaders.

The height of the top point of the roof (excluding equipment) of modern single-story electric trains and passenger cars does not exceed 4400 mm from the RHL. Therefore, it is proposed to place modules within the 1-T dimension above this level. The storage devices placed under the car are proposed to be placed within the clearance up to a height of 1000 mm, which is determined by the smallest standard wheel diameter.

Rated voltage. The value of the rated voltage of the traction energy storage device is also one of the factors most closely related to the main design solutions for locomotives. The energy storage device is a source of energy for traction electrical equipment in the same way as the catenary for an electric locomotive or the traction generator for a diesel locomotive (hereinafter referred to as the primary source of energy).

Considering that the TESD charge requires the ability to smoothly regulate the voltage on it, it can be assumed that the storage devices will find application primarily on rolling stock with four-quadrant traction converters. Only in this case the possibility of receiving regenerated braking energy is implemented and all the benefits of energy storage are achieved. As an exception, a less energy-efficient, but simpler option of installing a charging converter on catenary-battery rolling stock can be used while keeping contactor speed control.

Since the storage device is connected to the traction converter, its operating voltage range should approximately correspond to the voltage range of the primary energy source. This solution will simplify the circuit and increase the efficiency of energy conversion. To justify the voltage level, a review of the characteristics of a modern TRS with an asynchronous traction drive was performed^{20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27}. On a TRS with the ability to be powered from a 3 kV catenary, the DC link voltage, as a rule, corresponds to the catenary's voltage. In other cases, the voltage, as a rule, is assumed to be in the range of 1400–2800 V. Its minimum level

²⁰ Zaitsev, G. K. Construction, operation and repair of diesel locomotives of 2TE25A (2TE25K) series [Ustroistvo, ekspluatatsiya i remont teplovozov serii 2TE25A (2TE25K)]. Moscow, JSC Russian Railways, 2014, 400 p. ISBN 978-5-89035-733-5..

²¹ Conversion technology [Preobrazovatel'naya tekhnika]. [Electronic resource]: <https://dals.spb.ru/index.php/ru/preobrazovatel'naya-tekhnika>. Last accessed 22.05.2023.

²² Electric train with asynchronous traction drive type EGE series ES2G: Operating manual ES2G.0.00.000.000–01 RE3 [Elektropoezd s asinkhronnym tyagovym privodom tipa EGE serii ES2G: Rukovodstvo po ekspluatatsii ES2G.0.00.000.000–01 RE3]. – Book 4. – Yekaterinburg, JSC Ural locomotives, 2016, 106 p.

²³ Suburban electric train of urban type EG2TV model 62–4496: Operating manual 4496.00.00.000 RE [Elektropoezd prigorodnogo sledovaniya gorodskogo tipa EG2Tv model 62–4496: Rukovodstvo po ekspluatatsii 4496.00.00.000 RE]. – Tver, JSC TVZ, 2016, 536 p.

²⁴ Osintsev, I. A., Loginov, A. A. Arrangement and operation of electric locomotive 2ES10 [Ustroistvo i ekspluatatsiya elektrovoza 2ES10]. Moscow, JSC Russian Railways, 2014, 334 p. ISBN 978-5-89035-786-1.

²⁵ Smaglyukov, D. A. Arrangement and operation of electric locomotive EP20 [Ustroistvo i ekspluatatsiya elektrovoza EP20]. Moscow, JSC Russian Railways, 2015, 361 p. ISBN 978-5-89035-787-8.

²⁶ TsT-453/08 Operating rules for electric locomotives of the KZ4A series [TsT-453/08 Pravila ekspluatatsii elektrovozov serii KZ4A]. – Astana, 2008. – 446 p.

²⁷ Zagortsev, V. A. et al. Cargo electric locomotive BKG-1 [Gruzovoi elektrovoz BKG-1]. Gomel, BelsUT, 2021, 271 p. ISBN 978-985-554-958-2

¹⁸ GOST [State standard] 1575–87 Lifting cranes. Rows of basic parameters [GOST 1575–87 Krany gruzopodemnie. Ryady osnovnykh parametrov]. Moscow, IPK izd-vo standartov, 2002, 9 p.

¹⁹ GOST [State standard] 9238–2013 Dimensions of railway rolling stock and proximity to buildings [GOST 9238–2013 Gabarity zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava i priblizheniya stroenii]. Moscow, IPK izd-vo standartov, 2014, 178 p.

Table 3

Main characteristics of modular traction energy storage devices for installation on rolling stock [performed by the author]

Type of TESD	LiFePO ₄	Li ₄ Ti ₅ O ₁₂	EDLC
Weight, t	5		
Volume, m ³	from 3,0, depending on the placement area		
Capacity, kWh	625	300	15
Discharge power, kW	1200	6000	not limited for TESD
Charge power, kW	600	6000	
Rated voltage, V	3000		
Rated current, A	400	2000	> 5000



should be sufficient for the inverter to generate voltage on the traction motor. Since asynchronous traction motors have no restrictions on commutation, to optimise the characteristics of the stator windings, their rated line voltage is chosen in the range of 1,4–2,5 kV [18; 19].

It can be expected that several types of TRS will retain the ability to directly connect the traction converter to the 3 kV network. Therefore, it is advisable to take the rated voltage of the drive corresponding to the voltage of the DC catenary. The standard catenary voltage range is 2000–3600 V²⁸, which is almost the same as the operating voltage of a 1330 cells’ lithium titanate battery with a nominal voltage of 3070 V.

Installing individual voltage converters in energy storage modules seems impractical. Modern semiconductor devices have high unit power. The use of a single traction-charging converter will reduce the weight, volume and total cost of the equipment, and simplify the control system. Renouncing to voltage converters as part of storage modules will also increase the overall dependability of the system. The high power of the modules will provide the possibility of their direct parallel connection.

Capacity and power. The main parameters of the proposed modules within given dimensions

²⁸ GOST [State standard] 29322–92 (IEC 38–83) Standard voltages [GOST 29322–92 (IEC 38–83) Standartnie napryazheniya]. Moscow, Izd-vo standartov, 1992, 7 p.

are presented in Table 3. The capacity of a module based on lithium titanate batteries will be 300 kWh, and the rated power 6000 kW, which makes it possible to install even a single module on a locomotive.

CONCLUSION

The work highlights the prospects for creating new series of railway rolling stock with onboard energy storage devices and lists the problems that can be solved by using them while substantiating feasibility of separating the tasks of designing locomotives and storage modules. A list of requirements is provided, the fulfilment of which will ensure the interchangeability of energy storage modules. An assessment was made of the specific power and energy of the modules for various options for their application.

It is proposed to use standardised modules weighing 5 tons. For example, installing 2–3 modules on a section of a 3000 kW freight locomotive will ensure a constant supply to its primary energy source. Installing one module on a section of an electric train with a power of 1200 kW will not only solve this task, but also provide catenary-free operation within a range of about 100 km. In the future, these recommendations can be clarified, but solving this problem will require an analysis of the operating conditions of rolling stock with energy storage devices,



considering the characteristics of the planned areas of its circulation.

In the future, the scope of application of energy storage devices will increase with the decrease in costs of batteries decreases, development of alternative materials with lower cost, and of new types of storage devices with higher capacity. Standardising and ensuring the interchangeability of energy storage devices will not only simplify and speed up the emergence of new technologies but will also create many new opportunities for their use. This makes it advisable to consider the requirements for electrical energy already at the stage of setting the parameters of promising types of rolling stock.

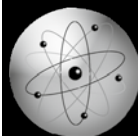
REFERENCES

1. Prospects for traction batteries in railway transport [*Perspektivy tyagovykh akkumulyatornykh batarei na zheleznodorozhnom transporte*]. *Zheleznie dorogi mira*, 2023, Iss. 1, pp. 43–48. [Electronic resource]: <https://zdmira.com/articles/perspektivy-tyagovykh-akkumulyatornykh-batarej-na-zheleznodorozhnom-transporte>. Last accessed 22.05.2023.
2. Battery traction recharges decarbonisation fight. [Electronic resource]: https://www.railjournal.com/in_depth/battery-traction-recharges-decarbonisation-fight/. Last accessed 22.05.2023.
3. Yu Miao, Hynan P., von Jouanne, A., Yokochi, A. Current Li-Ion Battery Technologies in Electric Vehicles and Opportunities for Advancements. *Energies*, 2019, Vol. 12, Iss. 6, Article ID 1074. DOI: 10.3390/en12061074.
4. Nezevak, V. L., Shatokhin, A. P. Features of the Traction Load for Determining the Parameters of the Electric Energy Storage Device. *World of Transport and Transportation*, 2018, Vol. 16, Iss. 2 (75), pp. 84–94. DOI: 10.30932/1992-3252-2018-16-2-8.
5. Loginova, E. Yu., Kuznetsov, G. Yu. Improving Traction Characteristics of a Diesel Locomotive with a Hybrid Power Plant. *World of Transport and Transportation*, 2022, Vol. 20, Iss. 3 (100), pp. 21–29. DOI: 10.30932/1992-3252-2022-20-3-3.
6. Valinsky, O. S., Evstafiev, A. M., Nikitin, V. V. On the issue of determining the energy storage capacity for traction rolling stock of railways [*K voprosu opredeleniya emkosti nakopitelya energii dlya tyagovogo podvizhnogo sostava zheleznykh dorog*]. *Elektronika i elektrooborudovanie transporta*, 2021, Iss. 2, pp. 8–11. [Electronic resource]: <http://eet-journal.ru/upload/iblock/93a/l6167j3bpgez0e4eg5atib9ea6wqk2ei.pdf>. Last accessed 22.05.2023.
7. Sychugov, A. N. Program for calculating the parameters of electrical energy storage devices for autonomous traction rolling stock: certificate of registration of the computer program. Reg. № 2022619798 dated 26.05.2022. Application № 2022618257 dated 05.05.2022.
8. Shevlyugin, M. V., Zhetov, K. S., Pletnev, D. S., Glushchenko, M. D. Experimental study of the autonomous operation of electric rolling stock in the metro [*Eksperimentalnoe issledovanie avtonomnogo khoda elektropodvizhnogo sostava metropolitena*]. *Elektrotehnika*, 2021, Iss. 9, pp. 19–21. – [Electronic resource]: <http://www.znack93.ru/images/archive/2021/09–2021.pdf>. Last accessed 22.05.2023.
9. Shtang, A. A., Yaroslavl'tsev, M. V. Catenary-battery shunting electric locomotive with energy storage based on lithium-ion batteries [*Kontaktno-akkumulyatornyy manevrovyy elektrovoz s nakopitelem energii na osnove litii-ionnykh akkumulyatorov*]. *Elektronika i elektrooborudovanie transporta*, 2016, Iss. 1, pp. 13–16. [Electronic resource]: <http://eet-journal.ru/upload/iblock/1f2/9t3xgjb6vx070j9idtu2n7tp9k8gfv6.pdf>. Last accessed 22.05.2023.
10. Yaroslavl'tsev, M. V., Shchurov, N. I., Anosov, V. N. Energy-efficient traction drive for urban trackless transport [*Energoeffektivniy tyagoviy privod gorodskogo bezrel'sovogo transporta*]. Novosibirsk, NGTU publ., 2017, 135 p. ISBN 978-5-7782-3274-7.
11. Kuznetsov, G. Yu., Loginova, E. Yu. Improving the technical characteristics of autonomous locomotives with a lithium-ion traction battery [*Povyshenie tekhnicheskikh kharakteristik avtonomnykh lokomotivov s litii-ionnoi tyagovoi batareei*]. *Izvestiya Transsiba*, 2022, Iss. 4 (52), pp. 57–65. [Electronic resource]: [http://izvestia-transsiba.ru/images/journal_pdf/2022–4\(52\).pdf](http://izvestia-transsiba.ru/images/journal_pdf/2022–4(52).pdf). Last accessed 22.05.2023.
12. Zhou Chengke, Qian Kejun, Allan, M., Zhou Wenjun. Modeling of the Cost of EV Battery Wear Due to V2G Application in Power Systems. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2011, Vol. 26, pp. 1041–1050. DOI: 10.1109/TEC.2011.2159977.
13. Rosenkranz, C., Kohler, U., Liska, J. L. Modern battery systems for plug-in hybrid electric vehicles. *Power*, 2007, Vol. 1, 100. [Electronic resource]: <https://dspace.tul.cz/server/api/core/bitstreams/b7580d40-7453-449d-9200-7601400c6569/content>. Last accessed 22.05.2023.
14. Spiridonov, E. A., Yaroslavl'tsev, M. V. Assessing the efficiency of using energy storage devices in quarry railway transport [*Otsenka effektivnosti primeneniya nakopitelei energii na kariernom zheleznodorozhnom transporte*]. *Gorniy informatsionno-analiticheskiy byulleten*, 2022, Iss. 12/2, pp. 241–256. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_122_0_241.
15. Gallardo-Lozano, J., Romero-Cadaval, E., Milanes-Montero, M. I., Guerrero-Martinez, M. A. Battery equalization active methods. *Journal of power sources*, 2021, Vol. 246, pp. 934–949. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2013.08.026.
16. Xing Yinjiao, Ma Eden, W. M., Tsui Kwok, L., Pecht, M. Battery management systems in electric and hybrid vehicles. *Energies*, 2011, Vol. 4, Iss. 11, pp. 1840–1857. DOI: 10.3390/en4111840.
17. Nema, P., Muthukumar, P., Thangavel, R. Review on Thermal Management System of Li-Ion Battery for Electric Vehicle. In: Sustainable Energy Generation and Storage: Proceedings of NERC 2022, Springer Nature, 2023. pp. 165–184. DOI: 10.1007/978-981-99-2088-4_14.
18. Andryushchenko, A. A., Babkov, Yu. V., Zarifyan, A. A. [et al]. Asynchronous traction drive of locomotives [*Asinkhronniy tyagoviy privod lokomotivov*]. Moscow, TMC for education on railway transport, 2013, 413 p. ISBN 978-5-89035-631-4.
19. Shcherbakov, V. G., Petrushin, A. D., Khomenko, B. I., Sedov, V. I. Traction electric machines [*Tyagovie elektricheskie mashiny*]. Moscow, TMS for education on railway transport, 2016, 641 p. ISBN 978-5-89035-926-1. ●

Information about the author:

Yaroslavl'tsev, M. V., Ph.D. (Eng), Associate Professor at the Department of Electrical Engineering and Automation of Non-profit joint-stock company «Toraighyrov University» (NJSC «Toraighyrov University»), Pavlodar, Republic of Kazakhstan, myaroslavl'tsev@yandex.ru.

Article received 06.06.2023, updated 20.12.2023, approved 26.12.2023, accepted 27.12.2023.



Study of an Asynchronous Traction Motor with Inclined Slot Rotor



Alexander S. ZUEV



Mikhail D. GLUSHCHENKO

Alexander S. Zuev¹, Mikhail D. Glushchenko²

Russian University of Transport, Moscow, Russia.

¹ ORCID 0000-0001-8873-9800; Russian Science

Citation Index Author ID: 836869.

✉ ¹ aleksandr-zuev-1987@mail.ru.

ABSTRACT

Modernisation of railway rolling stock which is quite relevant from the perspective of growing performance of railways can be achieved among other ways through improvement of features of traction drive, namely of traction electric motors, that defined the objective of the study.

The inclined shape of the rotor slots is characteristic of a proposed design of asynchronous traction electric motor with a squirrel-cage rotor winding for a passenger electric locomotive which features are subject to the analysis.

Keywords: railways, asynchronous electric motor, traction electric motor, experiment, physical modelling, energy saving, electricity losses, power losses, optimisation.

The results of experimental and computer modelling confirmed the positive effect of using a rotor with inclined slots in the design of an asynchronous traction motor, which consists in reducing the current in the windings and reducing motor power losses.

The obtained results of improving the technical features of an asynchronous traction motor due to the use of a rotor with inclined slots in its design allow expand recommendation for its use on locomotives.

For citation: Zuev, A. S., Glushchenko, M. D. Study of an Asynchronous Traction Motor with Inclined Slot Rotor. World of Transport and Transportation, 2023, Vol. 21, Iss. 6 (109), pp. 227–231. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-6-7>.

The text of the article originally written in Russian is published in the first part of the issue.
Текст статьи на русском языке публикуется в первой части данного выпуска.

INTRODUCTION

In competition with modern modes of transport, such as road and air transportation, railways invented two centuries ago, requires adoption of new technical solutions to increase its efficiency, reduce capital and operating costs, including those referring to energy consumption. The task of increasing income and investment attractiveness of business in the transportation sector is quite relevant today.

Modernisation of rolling stock can be carried out by improving the characteristics of the traction drive, namely the design of traction motors.

The *objective* of the work was to improve the technical characteristics of traction asynchronous electric motors.

The purposes of the research were to select a technical solution, create a model, experimentally study the effect of the modernisation, develop a model of a locomotive traction motor, and calculate the technical effect using computer modelling.

The work was based on the *methods* of analysis of patents and scientific publications in the field of traction motor designs, an experimental study of an operating electric motor model (based on an experimental installation developed for its testing), computer modelling of electromagnetic processes in a traction motor and its loss calculation.

RESULTS

Statement of the Problem. Selection and Rationale of the Proposed Design of an Asynchronous Motor

An analysis of scientific publications (e.g., [1–3]) and patents [4] revealed the interest of scientists from around the world for development of electric machines with inclined rotor slots. Since currently the issue of adoption of such electric machines for locomotives is open, it was advisable to conduct a study of the characteristics

of such a traction motor and determine the feasibility of its implementation.

Asynchronous traction electric motors with a short-circuited rotor winding (squirrel-cage rotor) are installed on new electric locomotives, electric trains and diesel locomotives of Russian railways. For such a rotor design, in the scientific literature and patents of different years, a technical solution was found that involved the production of rotors not with radial slots (Pic. 1a), but with those with an inclination relative to the radius (Fig. 1b). According to G. K. Gervais, this «squirrel cage» design allows increasing the power of the electric motor [5].

The novelty of this research lies in the fact that the found design of the rotor slots will be studied not from the point of view of increasing power, but from the point of view of reducing power losses in the engine.

Experimental Study

An analysis of the literature showed that physical models of electrical machines had previously been widely used in experimental studies of the Department of Electromechanics of the Moscow Power Engineering Institute [6].

To better solve the tasks of an experimental study of the effect of the inclination of the rotor slots on energy losses in the electric motor, within the framework of this study, a micromodel of a two-phase asynchronous electric motor (Pic. 2) with two rotor options differing in the shape of the slots (Pic. 1) was manufactured under laboratory conditions. One rotor has straight slots, the other rotor has inclined slots. The cross-sectional areas between the slots of the squirrel cage rotor are the same for both options. The prototype is equipped with a unit for specifying and measuring friction load. The load was measured with a dynamometer during a power outage. The stand is also equipped with such measuring instruments as a laser tachometer, wattmeter, ammeter, and voltmeter. The electric motor receives a two-phase sinusoidal power supply from a source with an adjustable voltage level. The value of the selected supply voltage frequency was 182 Hz. This value corresponds to the power supply frequency of the traction motors of EP20 electric locomotive at maximum speed.

During the tests, the motor prototype was launched with a smooth increase in supplied voltage and instrument readings were recorded at rotation speeds of 1200, 1800, 2200 rpm. 20 measurements were made for each of three motor

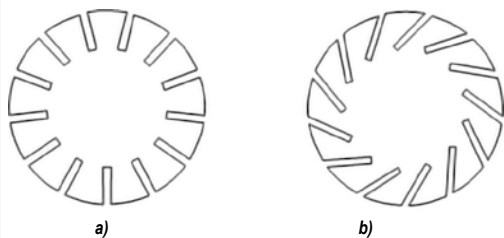
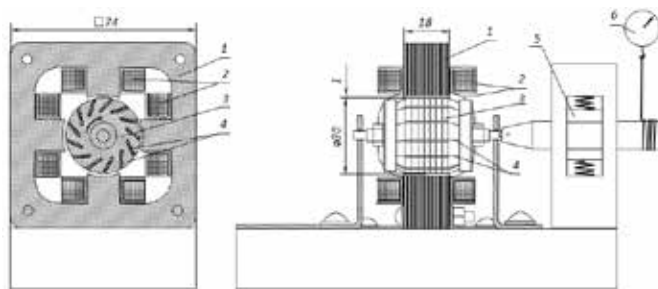


Fig. 1. Comparable rotor slot design options: a – straight slots, b – inclined slots [drawing by the authors].



Pic. 2. Scheme of the experimental installation: 1 – stator; 2 – stator windings; 3 – rotor; 4 – rotor conductors; 5 – adjustable friction load; 6 – dynamometer [drawing by the authors].

Table 1

Test results of a two-phase asynchronous motor prototype with rotors with straight and inclined slots [authors' experimental data]

Direction of rotation	Average values in two directions	forward	backward
Rotor slot shape	straight	inclined	inclined
Rotation speed n , rpm	1579	1574	1613
Torque M , N·m	0,00209	0,00213	0,00212
Motor power P_2 , W	0,341	0,349	0,353
Stator phase current I_{ph1} , A	0,548	0,398	0,627
Stator phase voltage U_{ph1} , V	22,06	13,43	21,41
Power consumption P_1 , W	11,04	8,06	14,04
Power factor $\cos \phi$ (averaged over 20 values)	0,468	0,741	0,517
Losses ΔP , W	10,70	7,71	13,69

Table 2

Analysis of power losses, kW, in traction motors standard and developed designs [data calculated by the authors]

Structural element	Typical design	Developed design with inclined rotor slots
Steel stator package	12,59	13,97
Stator winding	10,62	9,86
Copper rotor cage	0,22	0,20
Steel rotor package	28,04	23,41
Bearings	5,54	5,54

configuration options: straight slots, slots inclined in the direction of rotor rotation, slots inclined against the direction of rotor rotation.

The measurement results are shown in Table 1.

Power factor is determined based on the following ratio [7]:

$$\cos \phi = \frac{P_1}{m U_{ph1} I_{ph1}},$$

where $m = 2$ – number of stator phases of the motor prototype;

P_1 – power consumed by the motor prototype, W;

U_{ph1} – stator phase voltage, V;

I_{ph1} – stator phase current, A.

During testing, a 28 % reduction in power loss ΔP in the electric motor was recorded in the direction of rotation indicated by the arrow in Pic. 2, after installing a rotor with inclined slots at comparable torques and rotation speeds. In this case, in the direction of rotation opposite to that indicated by the arrow in Pic. 2, increased power losses ΔP were recorded.

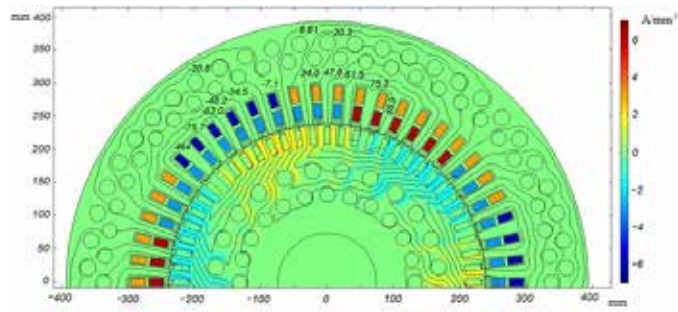
In the prototype of the innovative motor in the forward direction of rotation, a significant increase in the power coefficient $\cos \phi$ by 58 % was recorded compared to the classic version.

Study of an Asynchronous Traction Motor with Inclined Rotor Slots for a Passenger Electric Locomotive

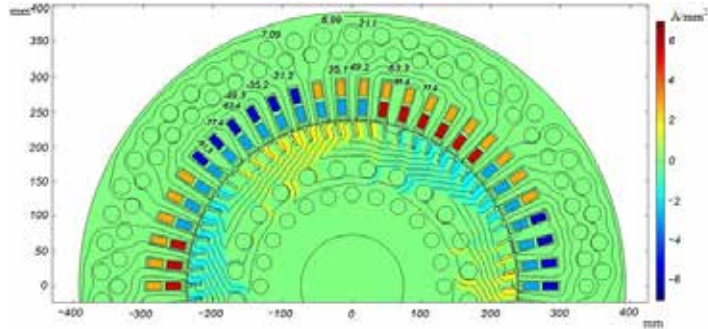
To evaluate the effectiveness of the application of the technical solution found in the technical literature [5] in the design of the DTA-1200A traction motor of the EP20¹ passenger electric locomotive [8], two-dimensional computer modelling of the magnetic field and electromechanical processes was performed using the COMSOL finite element software package, also used in the works [9–11]

¹ TS.085.003 RE3 Mainline electric locomotive EP20. Manual. Book 3. Electric machines. TRTrans LLC, 2012, 21 p.





Pic. 3. Asynchronous traction motor of DTA-1200A model of the EP20 electric locomotive, current distribution and vector potential of the electromagnetic field, mWb/m, in cross section in continuous operation [data calculated by the authors].



Pic. 4. Design of an innovative traction motor, current distribution and vector potential of the electromagnetic field, mWb/m, in cross section in continuous operation [data calculated by the authors].

(to simulate electromagnetic processes, researchers also use the software packages ANSYS Maxwell [12–14], ELCUT [15], ELMEC, FEATool, FEMM [16], Siemens Simcenter MAGNET, Simcenter Motorsolve, JMAG Designer [17], ANSYS Motor-CAD.

In continuous operation at a power of 1100 kW and a rotation speed of 1766 rpm, the minimum power loss in the traction motor corresponds to an inclination angle of the rotor slots of 12° to the radial direction of the rotor. This angle value turned out to be the maximum achievable under the condition of achieving the power balance for the motor mode:

$$mU_{phl} I_{phl} \cos \varphi = P_2 + \Delta P,$$

at the same time, it was necessary to increase the thickness and reduce the height of the teeth by reducing the width and depth of the slots to prevent a decrease in the magnetic flux, the value of which is related to the supply voltage.

Due to this optimisation of the geometry of the motor magnetic circuit from the point of view of long-term operation in one of the directions of rotation in the developed traction electric motor, power losses are reduced by 7 % due to a reduction in power losses in the rotor steel by 17 % (Table 2). The reduction in losses in the stator winding and the copper short-circuited rotor cage is caused by a decrease in current

consumption by 3,8 %, the increase in losses in the stator steel package is caused by an increase in magnetic flux by 3,4 %.

The existing version of the traction motor design with the results of magnetic field modelling is presented in Pic. 3. The developed innovative version of the traction motor with the results of magnetic field modelling is presented in Pic. 4.

CONCLUSION

The study carried out using experimental methods and mathematical simulation, demonstrated the energy-saving effect of using the selected technical solution – the developed design of rotor slots of an asynchronous electric motor, which are inclined to the radial direction of the rotor.

Using computer simulation, the technical effect of using the selected technical solution in the design of the traction asynchronous electric motor of a passenger electric locomotive was calculated, which consists in reducing power losses in the motor by 7 %.

Analysis of the finite element model of the motor revealed a decrease in power losses in most structural elements of the motor: in the steel rotor package by 17 %, in the copper rotor cage by 9 %, in the stator winding by 7 %, with an

increase in power losses in the steel stator package by 11 %.

The proposed motor design allows reducing its power loss by 7 % and current consumption by 3,8 %.

REFERENCES

1. Yang, Yu. Synchronous Machine for Unidirectional Application. Master thesis. Stockholm: Royal Institute of Technology, 2012. [Electronic resource]: <https://studylib.net/doc/18711791/synchronous-machine-for-unidirectional-application?ysclid=ls4osyiv8h214895671>. Last accessed 26.07.2023.
2. Petrov, I., Ponomarev, P., Pyrhönen, J. Asymmetrical Geometries in Electrical Machines. *International Review of Electrical Engineering*, 2016, February, Vol. 11, Iss. 1. DOI: 10.15866/iree.v11i1.7739.
3. Zahangir, T. Analysis of asymmetrical features of an electric machine. Master of Science Thesis. Gothenburg, Chalmers University of Technology, 2018. [Electronic resource]: <https://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/256298/256298.pdf>. Last accessed 26.07.2023.
4. Vinogradov, A. A., Shishov, A. V., Sedov, M. K., Kairov, A. A., Sidorov, A. O. Patent holder Shishov, A. V. Patent RU180432U1 Russian Federation, IPC N02K 99/00. Electric motor with oblique magnetic fields / No. 2017120558; application 14.06.17; publ. 14.06.18, Bulletin No. 17. [Electronic resource]: <https://patents.google.com/patent/RU180432U1/ru>. Last accessed 26.07.2023.
5. Gervais, G. K. Windings of electrical machines [Obmotki elektricheskikh mashin]. Leningrad, Energoatomizdat publ., 1989, 400 p. ISBN: 5-283-04458-0.
6. Ivanov-Smolensky, A. V. Electromagnetic fields and processes in electrical machines and their physical modelling [Elektromagnitnie polya i protsessy v elektricheskikh mashinakh i ikh fizicheskoe modelirovanie]. Moscow, Energia publ., 1969, 304 p.
7. Nakhodkin, M. D., Vasilenko, G. V., Bocharov, V. I., Kozorezov, M. A. Design of traction electric machines [Proektirovanie tyagovykh elektricheskikh mashin]. Moscow, Transport publ., 1976, 624 p.
8. Zarifyan, A. A. Increasing the energy efficiency of passenger electric locomotives with an asynchronous traction drive when powered from a DC network. Abstract of Ph.D. (Eng) thesis [Povyshenie energeticheskoi effektivnosti passazhirskikh elektrozovozov s asinkhronnym tyagovym privodom pri pitanii ot seti postoyannogo toka. Avtoref. diss... kand. tekhn. nauk]. Rostov-on-Don, RSTU publ., 2016, 24 p. [Electronic resource]: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_006653235/. Last accessed 26.07.2023.
9. Avtaikin, I. N., Kvon, A. M. Comparative analysis of the efficiency of using active materials of radial and axial asynchronous electric drive machines of technological installations [Sravnitel'nyi analiz effektivnosti ispol'zovaniya aktivnykh materialov radialnykh i aksialnykh asinkhronnykh mashin elektroprivoda tekhnologicheskikh ustanovok]. *News of higher educational institutions. Food technology*, 2019, Iss. 1 (367), pp. 70–73. EDN: YZILPF.
10. Kazakov, Yu. B., Stulov, A. V., Nikiforov, M. I., Kiselev, M. A. Development and research of a traction synchronous electric motor with magnets incorporated into the rotor for an electric vehicle [Razrabotka i issledovanie tyagovogo sinkhronnogo elektrodvigatelya s inkorporirovannymi v rotor magnetami dlya elektromobilya]. *Issues of electrotechnology*, 2022, Iss. 2 (35), pp. 89–97. EDN: VRBTEM.
11. Chirkov, D. A., Klyuchnikov, A. T., Korotaev, A. D., Timashev, E. O. Comparison of methods for calculating electromagnetic processes using the example of a cylindrical linear valve motor [Sravnenie metodov rascheta elektromagnitnykh protsessov na primere tsilindricheskogo lineinogo ventilnogo dvigatelya]. *Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Electrical engineering, information technology, control systems*, 2018, Iss. 28, pp. 76–91. EDN: VQADWU.
12. Ermolaev, A. I., Gordeev, B. A., Okhulkov, S. N., Titov, D. Yu. Software program for studying magnetic noise and vibration of an asynchronous electric motor. Certificate of registration of the computer program 2022669927, 26.10.2022. Application № 2022669399 dated 21.10.2022. EDN: KNGBEV.
13. Ermolaev, A. I., Erofeev, V. I., Plekhov, A. S., Titov, D. Yu. Study of magnetic vibration of an asynchronous electric motor using FEM modelling [Issledovanie magnitnoi vibratsii asinkhronnogo elektrodvigatelya posredstvom MKE-modelirovaniya]. *Intelligent Electrical Engineering*, 2021, Iss. 3 (15), pp. 37–56. EDN: QZGGPR.
14. Sirotkin, V. V., Pigalev, D. A., Bolshikh, I. V., Chernyaev, S. S. Application of specialized software for calculating the distribution of the magnetic field in the turns of the stator winding of switched reluctance electric motors [Primenenie spetsializirovannogo programmnogo obespecheniya dlya rascheta raspredeleniya magnitnogo polya v vitkakh obmotki statora ventilno-induktornykh elektrodvigatelyei]. *Innovative transport systems and technologies*, 2022, Vol. 8, Iss. 4, pp. 58–73. EDN: RFMZKH.
15. Simakov, A. V., Ognevsky, A. S. Modelling the operating modes of a traction electric motor using the finite element method [Modelirovanie rezhimov raboty tyagovogo elektrodvigatelya metodom konechnykh elementov]. In: Innovative projects and technologies in education, industry and transport. Materials of the scientific conference dedicated to the Day of Russian Science. Omsk, OmGUPS publ., 2019, pp. 196–201. EDN: UZOSKZ.
16. Avdeev, A. I. Automation of calculation of the magnetic field of an asynchronous electric motor in the FEMM program [Avtomatizatsiya rascheta magnitnogo polya asinkhronnogo elektrodvigatelya v programme FEMM]. In: the collection. «Information technologies, energy and economics (electric power, electrical engineering and thermal power engineering, mathematical modeling and information technology in production)». Proceedings of XVIII international scientific and technical conferences of students and Ph.D. students: in 3 volumes. Vol.1. Smolensk, 2021, pp. 121–126. EDN: JXYDOE.
17. Volkov, S. V., Goryachev, O. V., Efromeev, A. G., Stepochkin, A. O. Calculation of the Parameters of a Mathematical Model of an Electric Hybrid Stepper Motor Based on the Analysis of the Magneto Static Field Pattern. *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2019, Vol. 20, Iss. 8, pp. 482–489. <https://doi.org/10.17587/mau.20.482-489>.

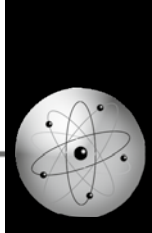
Information about the authors:

Zuev, Alexander S., Ph.D. student at the Department of Electric Trains and Locomotives of Russian University of Transport, Moscow, Russia, aleksandr-zuev-1987@mail.ru.

Glushchenko, Mikhail D., D.Sc. (Eng), Professor at the Department of Electric Trains and Locomotives of Russian University of Transport, Moscow, Russia, mr.glushchenko@mail.ru.

Article received 23.11.2022, approved 27.06.2023, accepted 01.08.2023.





Digitalisation of the Database of Passenger Coach's Elements Using the Example of Wheelset Repair



Dmitry G. EVSEEV



Andrey S. SHINKARUK



Yury M. KULIKOV

Dmitry G. Evseev¹, Andrey S. Shinkaruk², Yury M. Kulikov³

^{1, 3} Russian University of Transport, Moscow, Russia,

² Federal passenger company JSC, Moscow, Russia.

✉ ³ kulikov.ym@mail.ru.

ABSTRACT

Meeting the needs for transporting passengers while ensuring the appropriate level of comfort and safety are always paramount when repairing rolling stock.

The creation of automated systems to support repair and maintenance works allows systemising the repair process itself and clear and timely planning of material and production resources. Digitalisation of the production process makes it possible to achieve a coherent functionality and to link production and economic indicators together to ensure a balanced load on the repair bay, and subsequently on the entire enterprise, while development of a single digital system allows one to unlock the potential for improving the technological base.

Development of software and hardware system of «digital» repair of a wheelset is studied with object-oriented and heuristic methods. The study's subject refers to technological operations and

production processes of reception and repair of a passenger coach's wheelset. The object of the study is the process of organisation of the repair of rolling stock components at the operational stage of the life cycle. The study describes main characteristics of organisation of repair of a passenger coach's wheelset from its reception for maintenance and defect detection to release into operation after current, medium or, respectively, major repairs. Particular attention is paid to the processes of interaction between managers and performers at each stage of repair. The novelty of the research is regarded through the application of a system approach to the use of digital technology in the production process to obtain analytical data and generate economic and production indicators. The main conclusions tend to substantiate creation of a hardware and software system of a «digital twin» of a passenger coach's wheelset repair bay.

Keywords: railways, wheelset, wheelset element, turnover, gearbox, digitalisation, roller bearing.

For citation: Evseev, D. G., Shinkaruk, A. S., Kulikov, Yu. M. Digitalisation of the Database of Passenger Coach's Elements Using the Example of Wheelset Repair. *World of Transport and Transportation*, 2023, Vol. 21, Iss. 6 (109), pp. 232–237. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-6-8>.

The full text of the article in English is published in the second part of the issue.

Полный текст статьи на английском языке публикуется во второй части данного выпуска.

INTRODUCTION

Currently, digitalisation of production processes is the most promising in terms of optimising technological and economic performance indicators [1]. At the same time, this direction is insufficiently studied from a scientific point of view [2; 3]. In the railway passenger sector, serious attention is paid to implementation of the production process as well as to its analysis during intermediate operations [4; 5]. However, issues of improving quality and reducing production costs require constant improvement, and correct implementation of the technological process is always a priority task [6; 7]. To solve it, innovative approaches are applied that ensure more transparent implementation of standard procedures and control of the parameters laid down in the regulatory and technical documentation [8; 9].

The largest number of unscheduled repairs of passenger coaches (52 %) is associated with the presence of defects on the tread of wheelsets (flat spot, spalling, sharp flange, out-of-roundness, etc.) and, to form the necessary working stock of wheelsets, as well as to reduce coach downtime, it is necessary to ensure timely and prompt current repairs. To do this, at maintenance points it is necessary to store and keep the required quantity and range of spare parts and materials, the number and list of which must be adjusted depending on the workload of the production site, traffic intensity and rolling stock series operated.

Currently, there are 21 modifications of passenger wheelsets used for passenger coaches in Russia, which differ from each other in:

- configurations of axle box units (for rolling under a bogie with cradle/cradleless suspension; a separate configuration of axle box units for coaches used in international traffic);
- the distance between the brake discs (depending on the brake system type);
- type of bearing installed in the axle box unit (roller, cassette one);
- type of gearbox (for coaches with a power system of 32 kW and 28 kW, as well as for coaches with 32 kW power system and a disc braking system).

As a result, the measures taken at workshops for timely release of coaches after repair, despite the preventive effect obtained, do not fully eliminate the existing problem to ensure availability of the required working quantity of wheelsets and to balance the «cost – quality»

ratio [6; 7], as well as to minimise coaches' downtime.

To increase the efficiency of managing wheel-roller repair bays, a software algorithm has been created that allows automating the processes of accounting for the turnover of wheelsets in a passenger coaches repair shop, the management process, real-time monitoring of implementation of the production program, the availability and range of spare parts and materials, as well as analysing the economic and production indicators [7; 8; 10].

This system makes it possible to achieve the implementation of the assigned tasks in the following main areas¹ [11]:

- optimisation of repair planning in the wheel-roller repair bay;
- monitoring the repair of wheelsets throughout the entire production process;
- planning of supply of spare parts and materials;
- identification of «bottlenecks» when performing technological operations;
- digitalisation of the accounting and reporting system;
- determination of the cost of repairing wheelsets at the production site;
- integration of a digital model into existing control systems for the technological process of repairing the of components of passenger coaches.

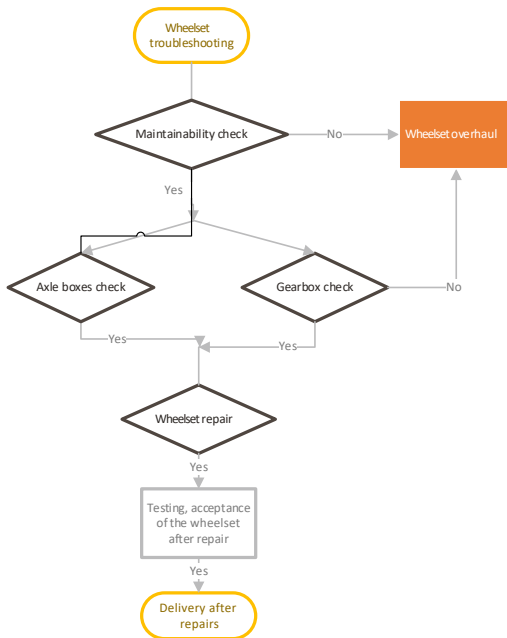
TASK SETTING

The task solved within the framework of the presented study is the analysis of the functionality of the digital software algorithm for the wheelset repair process through providing control and accounting for the main indicators – reception of a wheelset for repair, input and operational control of the repair of the elements of the wheelset. The operational processes include:

- reception of a wheelset;
- wheelset troubleshooting, identification of maintenance/repair works to be done;
- diagnostics;
- repair;
- assembly;
- mounting;
- running tests (diagnosis);
- acceptance and delivery of fault-free wheelset for operation.

¹ On approval of forms of internal primary accounting of JSC Russian Railways for wagon facilities. Order No. 1545/r dated June 21, 2023. Moscow, JSC RZD, 2023.





Pic. 1. Structure of repair of a wheelset using the example of a wheelset wit gearbox [performed by the authors].

The strict sequence and hierarchical structure of data entry makes it possible to eliminate simplification in the execution of the technological process, and it is easier to control the process itself from the workplaces of managers at various production levels, which ultimately increases the entire productivity and quality of coaches' repairs. The structural diagram using the example of repair of a wheelset with gearbox is shown in Pic. 1.

The operation of this hardware and software system is based on the life cycle of the wheelset elements, as well as the corresponding technology

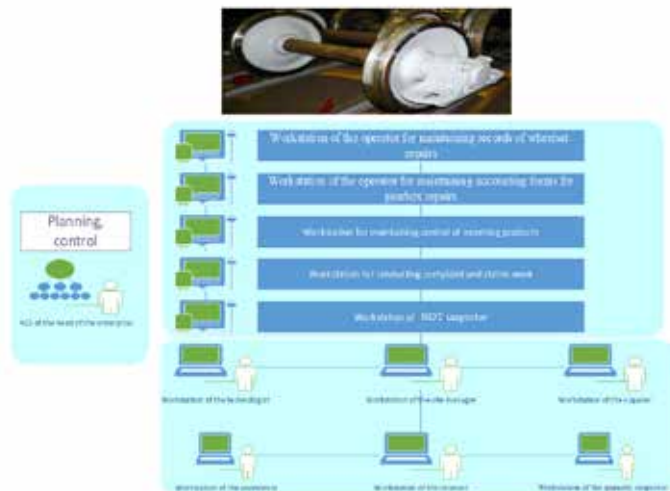
maps (Pic. 2). Within the framework of the above operations, the implementation of workstations (hereinafter referred to as WS) of performers and managers at the production level of the enterprise is provided (Pic. 3):

- WS of the head of the enterprise;
- WS of the repair bay manager;
- WS of the receiver;
- WS of the technologist;
- WS of the operator for records of wheelset repairs and test results;
- WS of the operator for accounting forms for repairs of gearbox of the middle part of the axle and test results;
- WS of the operator (rolling stock repairman) for results of incoming inspection of incoming products;
- WS of the operator for complaint and claims work;
- WS of the NDT inspector;
- WS of the economist;
- WS of the logistics manager;
- WS of the employee of the labour and wages department.

Users' workstations are equipped based on personal and/or wearable (including keyboardless) terminals.

Thus, based on the structure of digital workstations, they can be divided into three main blocks:

- planning and control (managerial level);
- control of the stage-by-stage implementation of technological operations and their acceptance, delivery of the required number of spare parts and elements, accounting of financial and economic indicators (line manager);



Pic. 2. Hierarchical structure of digital workstations of the wheelset repair bay [performed by the authors].



Pic. 4. Structure of digital indicators of operation of the wheel-roller repair workshop [performed by the authors].

elements are not entered, the stage completion button will be inactive, and it will be impossible to proceed to the next stage of technological operations. If data are entered into the automated control system that are not within the permissible controlled range, this element will be identified as faulty and sent either for re-repair or scrap.

RESULTS AND DISCUSSION

The peculiarity of repair of wheelsets of passenger coaches is that their range is much larger than of those used in the carriage complex. To form the necessary technological stock of wheel sets and ensure timely and high-quality repairs, a digital model of the operational process of reception and repair has been implemented, the algorithm of which is shown in Pic. 3. The start time for technological operations is reception of the wheelset for repair and its defect detection; based on the results of the defect detection, the receiver makes a decision on the volume of further repairs (current, medium or major).

After the wheelset is received for repair and after turning, the results are entered into a digital analogue of the registration form VU-53 «Wheelset Repair and Turnover Log»¹. Next, the wheelset is transferred to the flaw detection position, and if inconsistencies or defects are detected on the elements of the wheelset, a corresponding note is made regarding the need for repeated repairs or the wheelset must be rejected. If the decision is positive, the wheelset is accepted and declared fit for further use.

When carrying out defect detection of incoming products (delivery of new spare parts and materials), in case of identified inconsistencies in the elements, primary information is generated on the reasons and quantity of rejected parts for the subsequent drawing up of a complaint report form VU-41¹ and the return of products to the supplier based on initiation of complaint and claim work. If during defect detection the components do not fall under the complaint procedure, they are disposed of.

After defect detection of the wheelset, it is transferred to the disassembly position, where, after dismantling axle box units, they are transferred to the roller unit, the remaining elements are sent for washing and repair and defect detection inspection positions, as well as for non-destructive testing. In the roller department, repairs and subsequent sorting of rollers, separators, outer and inner rings are carried out. After repair and flaw detection, the bearing assemblies are transferred to the mounting unit. At the same time, repair work is carried out on the wheelset and other elements by turning the rolling surface, followed by flaw detection, defect detection and repair of axle box housings. In the mounting unit, bearings are installed on the wheelset, final diagnostics of the wheelset is performed, and final acceptance of the repaired wheelset is carried out.

When repairing a wheelset with a gearbox of the middle part of the axle, after installing the

axle box units, it is sent to the gearbox unit, where standard routine work on repairing the gearbox and testing under load is carried out.

Medium and major repairs of a wheelset follow the same sequence of actions as shown in Pic. 3, after which the wheelset is recognized as suitable and allowed for use. The completion of the repair is assumed to be the time of acceptance of the wheelset.

Thus, digitalisation of the passenger coach's wheelset repair process results in a final report that is generated for the selected period in conformity with economic and technological parameters (Pic. 4). Based on the results of the analysis, it is possible to evaluate such indicators as the actual load, the work performed by each repair bay's employee, the cost per unit of repaired products by type (current, medium and major repairs), the range of spare parts and materials used, the time spent on the corresponding repair of one wheelset.

CONCLUSIONS

The implemented software-analytical model for managing the technological process of repairing a passenger coach's wheelset ensures the step-by-step implementation of technological operations, accounting for the spent time of personnel, spare parts and materials, the structure of damageability of the wheelsets, and is also the key to improving the entire quality of coaches' repairs. This system is a universal platform that allows building technological operations at other workshops of a passenger coaches' repair enterprise, controlling technological discipline at each stage of repair, and monitoring the actual load of equipment, personnel, as well as financial and material resources in real time per each repaired unit.

REFERENCES

1. Belinsky, A. A., Lakin, I. K., Abolmasov, A. A. The principle of «Built-in quality» in the information systems of the locomotive repair complex [Printsip «Vstroennoe kachestvo» v informatsionnykh sistemakh lokomotivoremontnogo kompleksa]. *Bulletin of scientific research results*, 2015, Iss. 3–4 (16–17), pp. 13–28. EDN: VKICUX.
2. Lipa, K. V., Grinenko, V. I., Lyangasov, S. L. [et al]. Automated locomotive dependability management system (ASUNT). TMH-Service concept [Avtomatizirovannaya Sistema upravleniya nadezhnostyu lokomotivov (ASUNT). *Kontseptsiya TMH-Servis*]. Moscow, TMH-Servis publ., 2012, 160 p. ISBN 978-5-9904767-1-4.
3. Lakin, I. K., Semenov, A. P. Use of «digital twin» technology for locomotive's repair management. *Modern technologies. System analysis. Modeling*, 2019, Vol. 63, Iss. 3, pp. 89–98. DOI: 10.26731/1813-9108.2019.3(63).89-98.
4. Digitalisation of railroad cars' service: revolutionary projects of TMH. Website «Production Management». [Electronic resource]: http://www.uppro.ru/library/information_systems/toir/tsifrovizatsiya-servisa-vagonov.html. Last accessed 25.08.2023.
5. Digital factory. MES system of the plant. 2050. In: Proceedings of the conference on digital twins. Integrator. Skolkovo, 2019. [Electronic resource]: <https://2050-integrator.com/digital-factory/?ysclid=lsu9qa6pnr329746644>. Last accessed 25.08.2023.
6. Kulagin, V., Sukharevski, A., Meffert, Yu. Digital@Scale. Handbook on business digitalisation [Nastolnaya kniga po tsifrovizatsii biznesa]. Moscow, Alpina PRO, 2019, 293 p. ISBN 978-5-6042320-7-1.
7. Pustovoy, I. V. Development of an information-dynamic model for managing the service maintenance and repair of locomotives. Ph.D. (Eng) thesis [Razrabotka informatsionno-dinamicheskoi modeli upravleniya servisnym tekhnicheskim obsluzhivaniem i remontom lokomotivov. Diss... kand. tekhn. nauk]. Omsk, OmGUPS publ., 2018, 181 p. [Electronic resource]: https://www.usurt.ru/uploads/main/065/5b97add2b36f8/%D0%94%D0%B8%D1%81%D1%81%D0%B5%D1%80%D1%82%D0%B0%D1%86%D0%B8%D1%8F_%D0%9F%D1%83%D1%81%D1%82%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%B3%D0%BE_%D0%98%D0%BB%D1%8C%D0%B8_%D0%92%D0%BB%D0%B0%D0%B4%D0%B8%D0%BC%D0%B8%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%B8%D1%87%D0%B0.pdf. Last accessed 28.09.2023.
8. Rubtsov, A. A. Production management at factories for repair of railway rolling stock [Upravlenie proizvodstvom na zavodakh po remontu podvizhnogo sostava zheleznykh dorog]. Moscow, Transport publ., 1988, 262 p. ISBN 5-277-00103-4.
9. Sokolov, M. M. Wagon diagnostics [Diagnostirovanie vagonov]. Moscow, Transport publ., 1990, 197 p. ISBN 5-277-00930-2.
10. Shantarenko, S. G. Improving the technological readiness for maintenance and repair of traction rolling stock. Ph.D. (Eng) thesis [Sovershenstvovanie tekhnologicheskoi gotovnosti tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta tyagovogo podvizhnogo sostava. Diss...kand.tekh.nauk]. Omsk, OmGUPS publ., 2006, 419 p.
11. Digital transformation of industries: starting conditions and priorities: report to XXII April international scientific conference on problems of economic and social development, Moscow, April 13–30, 2021. National research University «Higher School of Economics». Moscow, Publishing House of the Higher School of Economics, 2021. 239 p. ISBN 978-5-7598-2270-7 (e-book).

Information about the authors:

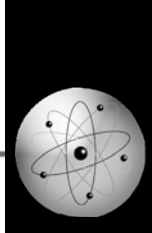
Evseev, Dmitry G., D.Sc. (Eng), Professor at the Department of Transport Mechanical Engineering Technology and Rolling Stock Repair of Russian University of Transport, Moscow, Russia, evseev.dg@gmail.com.

Shinkaruk, Andrey S., Ph.D. (Eng), Chief Auditor for Train Safety of JSC Federal passenger company, Moscow, Russia, Shinkarukas@mail.ru.

Kulikov, Yuri M., Ph.D. student at Russian University of Transport, Moscow, Russia, kulikov.yu@mail.ru.

Article received 03.11.2023, approved 27.12. 2023, accepted 29.12.2023.





ORIGINAL ARTICLE

DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-6-9>

Simulation of the Dynamic Impact of High-Speed Rolling Stock on Buried Structures of the Tunnel Type



Andrey S. VATAEV



Yan S. VATULIN



Vladimir N. KAVKAZSKY

*Andrey S. Vataev*¹, *Yan S. Vatulin*², *Vladimir N. Kavkazsky*³

^{1, 2, 3} *Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia.*

✉ ³ *Kavkazskiy_vn@mail.ru.*

ABSTRACT

The article considers the problem of assessing the rate of influence of the vibrational impact of high-speed rolling stock on the bearing elements of a tunnel-type buried culvert. In particular, it studies the process of formation of a directed impulse of mechanical vibrations emitted by a rail-sleeper grid under the influence of a moving, dynamic load, with the presence of a two-fold phase transition between soil layers with different physical and mechanical properties. Numerical simulation was carried out in the Comsol environment in a non-stationary formulation with

construction of systems of differential equations of motion and their subsequent solution using the finite element method. The study has found the wave nature of distribution of deformations and accelerations in the soil thickness with a tendency to a sharp decrease in the intensity of energy processes within the depths of 5–7 m. For sewers of considerable thickness of the lining, the structure is mostly subject to bending, while a structure with a smaller wall thickness and a larger diameter of the tunnel is subject to high longitudinal and vertical loads.

Keywords: railways, tunnel-type structures, stress-strain state, dynamic study, distribution of modal (effective) mass fractions of the structure.

For citation: Vataev, A. S., Vatulin, Ya. S., Kavkazsky, V. N. Simulation of the Dynamic Impact of High-Speed Rolling Stock on Buried Structures of the Tunnel Type. World of Transport and Transportation, 2023, Vol. 21, Iss. 6 (109), pp. 238–250. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-6-9>.

The text of the article originally written in Russian is published in the first part of the issue.
Текст статьи на русском языке публикуется в первой части данного выпуска.

INTRODUCTION

A significant problem arising in the process of construction and reconstruction of high-speed railways is associated with assessment of operational dependability of the structure at the intersection of tracks with buried tunnel-type objects.

Improvement of design solutions requires a system approach to the analysis and generalisation of data on operational dependability of structural elements considering both man-made and natural factors of external impact.

Direct collection of data on the current state of engineering structures is extremely time consuming and is associated with a risk for safety for experts while they are in the tunnel. The solution to the problem can be found using a numerical experiment based on mathematical modelling.

Modelling of loading modes of tunnel structures was carried out as part of a comprehensive study on engineering and geological conditions while obtaining materials necessary for development of design documentation for reconstruction of the technological site of Obukhovo station in St. Petersburg, on the sites near Fermskoye and Yuzhnoye Highways and Obvodny Canal.

Generally, the article is a presentation of the results of a study of technological sites of several station sites located in the city of St. Petersburg and being reconstructed. The construction of the roadbed and the design of infrastructure elements correspond to the real prototype. Clause 4 of the Technical Regulations of the Customs Union «On the safety of high-speed railway transport» (TR CU 002/2011, as amended on September 14, 2021), as well as GOST R [Russian state standard] 55056–2012 «Railway transport. Basic concepts. Terms and definitions» (Article 39) provide a definition of high-speed rolling stock, namely: «high-speed railway rolling stock» is railway rolling stock consisting of motorised and non-motorised wagons and intended for transportation of passengers and (or) luggage, as well as postal items with a speed of more than 200 km/h». The authors were guided by this definition.

Objective of the work was to analyse the stress-strain state of load-bearing elements of tunnel-type buried structures under the influence of high-speed rolling stock (HSRS) based on finite element modelling techniques.

RESEARCH METHODS

The high-speed traffic is a factor of technogenic seismicity, in which a directed periodic mechanical displacement of the underlying medium under track superstructure is formed, with an oscillatory effect on it from the side of a moving rolling stock. This dynamic study focuses on the forces caused by the relationship between translational and torsional vibrations due to the presence of eccentricity between the centres of mass and rigidity of the structure.

This article understands as the structure a tunnel structure, a sewer. The article mainly focuses on the process of dynamic loading of the sewer, while the elements of the track superstructure are reduced and replaced by an equivalent.

Regarding the sewer, attention should be paid to the design features of the sections, as well as the properties of the material of its constituent elements, which determine the corresponding Young's modulus and the moment of inertia of the current section. The emerging characteristic displacements during oblique bending determine a plane located perpendicular to the neutral line of the section, along which the centre of gravity of the section will move relative to (i.e., with eccentricity) this neutral line¹ (see further Pic. 2).

The functional mathematical model of an object is a kind of «equivalent», consisting of relationships that connect phase variables, i.e., internal, external and output parameters of the system. Practical implementation of the model is based on the finite element method, which makes it possible to formalise in mathematical form the structure of the object, the geometry of the components, the conditions and laws of their interaction with each other and with the environment. This definition is used in the literature, in particular, in².

This paper considers numerical simulation in the Comsol environment in a non-stationary formulation: kinematic and dynamic research with construction of systems of differential equations of motion with subsequent solution, as well as analysis of the stress-strain state of an object using the finite element method.

¹ Belarusian-Russian University. Tutorials. Strength of materials. [Electronic resource]: http://cdo.bru.by/course/distan/PGS/sopromat_6sem_pgdsz/Fail/lekcher_11.pdf

² Shmitko, E. I. Processes and devices in the technology of building materials and products: Study guide: Vol.1 (theory issues). Voronezh, Voronezh state arch.-builds. univ., 2009, 348 p., P. 50.



RESULTS

Any generalised digital model of a researched object is reduced (simplified) in a descriptive sense relative to a real prototype. In this case, the object initiating the force action (rolling stock), as well as the transmission element (the arrangement of the track superstructure), to reduce the dimension of the problem, are replaced by an equivalent in the form of a mechanical excitation emitter, presented as a trace (imprint) of a rail-sleeper grid on the land surface of the soil massif, to which a dynamic train load is applied³.

When the wave front passes through layers of a soil massif with different acoustic rigidity, elastic waves change their direction, wave reflection and refraction phenomena³ arise, because of which the studied object – the sewer – is subjected to mechanical action by the energy of the elastic wave.

This fact is confirmed by the configuration of the diagram of the vector representation of the propagation of the elastic wave front (see further Pic. 9).

The culvert under consideration is a two-component tunnel reinforced with a reinforced concrete jacket, with a reinforced concrete tray and shotcrete of the arch, located at a depth of 11–7,46 m from the day surface of the soil massif.

The massif consists of the ballast layer of the track and the soil. On the day surface of the massif there is a rail-sleeper grid, which is represented by two shaped profile beams (rails), supported by sleepers with a plot of 1840 pcs/km. The rail-sleeper grid is loaded with concentrated forces located at the points of contact of the rolling surface of the rail head and the rim of the wheels of the bogies of the moving rolling stock.

The peculiarities of the problem under consideration include the formation of a directed impulse of mechanical vibrations emitted by a rail-sleeper grid under the influence of a moving, dynamically changing load with the presence of a double phase transition between soil layers with different physical and mechanical properties.

To assess the loading of the roof of the culvert, it is necessary to establish the mechanism for formation of the conditions for interaction between the under-sleeper foundation and the track superstructure, considering the dynamic

load from the rolling stock, the conditions for the transfer of dynamic loads between the ballast layer and the soil, and of the soil with tunnel elements.

To this end, it is necessary to implement the following algorithm:

1. To draw up a calculation scheme for determining the bending of the roof of a culvert tunnel with finite elements using the approaches of the theory of elasticity. The complexity of the analytical solution lies in the fact that the object is a system of interacting media with different elastic-plastic properties, as well as owns a dynamic loading mode.

2. To determine the mechanism of formation of a directed impulse of mechanical vibrations emitted by a rail-sleeper grid under the influence of a dynamic load that occurs during movement of a high-speed train of the Sapsan type (VelaroRus).

3. To establish a mechanism for transferring the directed impulse of mechanical vibrations in the discrete medium of the ballast layer in the under-rail zone, soil and roof of the tunnel structure.

4. To construct a vector surface of the dependence of the pressure distribution over time in the cross section of the «ballast layer–soil–tunnel» system.

5. To determine the values of the buckling of the roof of the tunnel structure.

The kinematic model of the rolling stock (the VelaroRUS high-speed passenger train (EVS1/ EVS2 Sapsan) and the electric cargo locomotive (2ES10) is a combination of reduced mass-dimensional models of rolling stock undercarriages. Depending on the locomotive type and speed, the average value of the vertical wheel load on the rail is adopted in accordance with the requirements of the Rules for calculating the track, GOST R 55513–2013 «Locomotives».

The functional dependence of the loading force of the track superstructure was obtained as a result of kinematic modelling of the oscillatory process of the bolster part of the rolling stock, taking into account the conditions of contact of the wheel rim with the rolling surface of the rail head [1].

To adequately describe the nature of resting of the rail-sleeper grid, it is necessary to consider the characteristics of the resistance of the bed of sleepers. The dependence of the pressure under the sleeper bed on the parameters of the track superstructure was studied by M. F. Verigo [2],

³ The basis is Huygens' principle: each point of the medium involved in wave motion becomes a source of a new wave of radiation of vibration energy into the environment.

A. N. Yashnov [3], M. A. Chernyshev [4], G. M. Shakhuyants [5]. According to the recommendations [5], settlement due to deformations of reinforced concrete sleepers and fastenings is taken to be 5–25 % of the total rail settlement, settlement due to deformations of the ballast layer is to be calculated as 75–95 %. According to the known values of E_{po} , the modulus of elasticity of the ballast layer, E_b , is within the range of 50–400 MPa [3].

The distribution of pressure in the ballast layer, considering the non-uniformity of its transmission through the sleepers along and across the track axis, is determined by solving the Boussinesq problem. For ballast, it is possible to use the concept of «homogeneous soil» (S. N. Popov, [6]). The pressure transfer angle in crushed stone of a fraction of 25–60 mm, which corresponds to GOST 7392–2014, is 45°–50°, which allows using formulas of continuum mechanics and, as a consequence, the finite element method [4; 5; 7] to calculate pressure in the ballast.

The rail is considered as an extended Timoshenko beam exposed to shear deformations. The rigidity of bracing in the longitudinal direction of the track axis is 250 MN/m, in the transverse direction of the track axis – 140 MN/m. The compressive stiffness of the bonds is 110 MN/m (Huan Feng, [8]).

The simulation of the contact of the sleepers with the ballast and the ballast with the soil is carried out with the help of elastic links, which allow the ballast to «slide» along the surface of the roadbed, while the sleepers have a one-way connection with the ballast surface. The refined modelling of the ballast layer was carried out with the help of elastic links («spring» type element) connecting the sleepers and the ballast.

The rails and sleepers are connected at adjacent nodes in the area of pads by elastic connections, the rigidity of which allows the rail to move relative to the sleepers. Longitudinal stiffness of elastic «rail-sleeper» connections with reinforced concrete sleepers was assumed according to the data of experimental studies [9] of KB fastenings as $S_x = 8900$ kN/mm at the standard bolt twisting.

The deformation characteristics of volumetric finite elements used in the modelling of the ballast layer are determined in the works by S. V. Efimov [10], A. N. Yashnov [3], W. DeCorte and Ph. Van Bogaert [11].

Problem Statement

The model of the surface section is a rectangular parallelepiped with dimensions of 60 x 60 or 30 x 30 meters and a height of 15 m. To eliminate the influence of edge effects, the geometric dimensions of the calculated soil massif are five times larger than the cross-sectional dimensions of the tunnel structure. Along the axis of the parallelepiped, there is a model of an embankment in the form of a rectangle 0,4 m high. The railway track is presented as a simplified model, in which there is no detailed display of the rail and sleeper. The dimensions of the sleeper base are 2,7 x 0,3 m. The height of the rail corresponds to type R75. The distance between the axes of the sleepers (0,54 m) corresponds to the plot of 1840 pcs/km. The sewer is considered in the form of a cylinder with an outer diameter of 2094 mm and an inner diameter of 1500 mm. The cross section of the tray is determined in accordance with the technical documentation of the customer. The depth of the tunnel varies in accordance with the terms of reference and ranges from 7,46 (section near Yuzhnoye Highway) to 11 meters (section near Fermskoye Highway) from the daylight surface. When modelling oscillatory processes, two tracks are considered. The first track is laid along the axis of symmetry of the model and is parallel to the X axis. The second one runs parallel to the first one. The distance between the track axes is 6500 mm.

The cases of the passage of HSRS along the main track with a cargo train on the adjacent track, as well as with a free track, are considered.

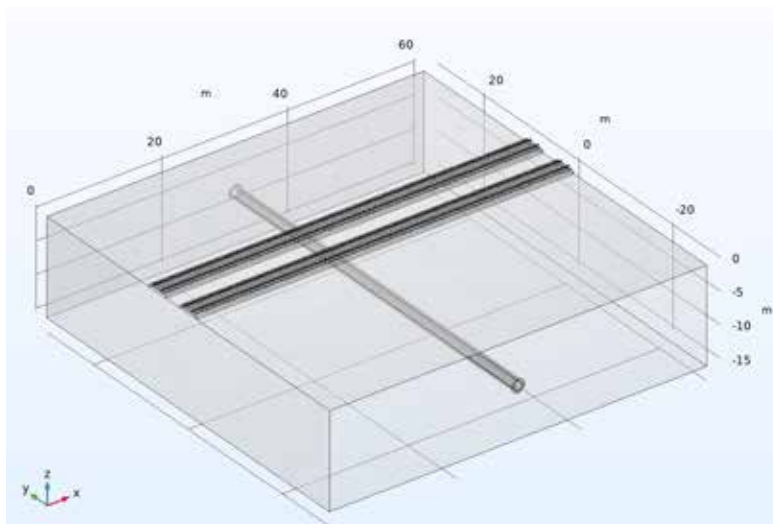
Pic. 1 shows a general view of the design model of the intersection of tracks and the sewer.

When modelling, the following simplifications and assumptions were used:

1. The soil in which the sewer is located is an isotropic medium with constant parameters. The layered structure is not considered. Soil properties are described using the Mohr–Coulomb model with the following parameters: soil density is 1850 kg/m³, Young's modulus is 20 MPa, Poisson's ratio is 0,27, specific cohesion is 29 kPa, internal friction angle is 18° [12].

2. Ballast is an isotropic medium, the properties of which are described using the Mohr–Coulomb model with the following parameters: soil density is 1850 kg/m³, Young's modulus is 18 MPa, Poisson's ratio is 0,3, specific adhesion is 1 kPa, internal friction angle 15° [6].





Pic. 1. General view of the model [developed by the authors].

3. Concrete of the sewer and sleepers is considered as an elastic linear material with a density of 2300 kg/m^3 and elastic properties presented in Table 1.

4. There are no voids between the surface of the sewer and the soil either between sleepers and ballast.

5. The shape of the cross-section of the rail and sleepers has a negligible effect on the oscillatory processes and distribution of stresses in the soil and in the volume of the sewer.

6. The elastic properties of rail fastening are modelled using a thin elastic layer located in the contact zone of the sleeper and rail surface. The rigidity of the rail fastening corresponds to the properties of the ARS-4 fastening [4; 10; 13], namely: along the X and Y axes (horizontal displacement) it is of $346 \cdot 10^6 \text{ N/m}$, along the Z axis (vertical displacement) it is of $37 \cdot 10^6 \text{ N/m}$. This type of fastening was chosen due to its use on high-speed and high-load sections.

Static Analysis of the Stress-Strain State of the Sewer

To preliminarily assess the bearing capacity of the structural elements, the maximum values of stresses in the sewer's concrete along the X , Y and Z axes (see Table 1) from the impact of a static load were determined.

The analysis of the results shows that the maximum stress values are typical for the sewer's section located near Yuzhnoe Highway, which is explained by the shallow depth of the sewer (7,46 m). The result of calculating the sewer

deformations for the indicated section is shown in Pic. 2. It can be seen from the picture that the maximum stresses correspond to the extension of the lower surface of the collector.

The obtained values of stresses and deformations of the sewer from train loads in the static mode are insignificant for all sections and do not significantly affect the state of the structure.

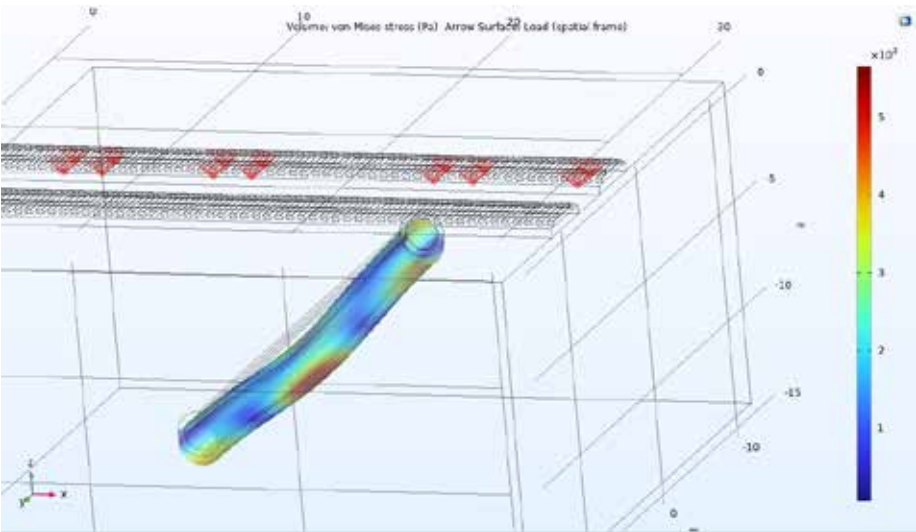
Dynamic Calculation of the Stress-Strain State of the Sewer

The concept of dynamic calculation is well known: «The calculation of a structure considering inertial forces and the resulting vibrations is called dynamic calculation»⁴.

The simulation was performed in the Comsol⁵ software environment in a non-stationary setting. The parameters of the geometric model, grid, as well as the boundary conditions are left unchanged (corresponding to the static calculation). The time range from zero to two seconds is considered, which corresponds to the time of passage of three train wagons along the side track above the sewer [14]. The train moves over the sewer at a speed of 55 m/s. On track 1 there is a cargo electric locomotive at rest. The results of the calculation

⁴ Dynamics of transport structures: Method. Instructions. Compiled by S. A. Galansky, G. R. Mayerov. Samara: SamGUPS, 2016, 48 p.

⁵ COMSOL Multiphysics v 6.0 Reference manual. ComsolInc, 2021, 1742 p. [Electronic resource]: https://doc.comsol.com/6.0/doc/com.comsol.help.comsol/COMSOL_ReferenceManual.pdf. Last accessed 14.03.2023.



Pic. 2. The result of the calculation of sewer deformations in the section near Yuzhnoye Highway under the action of a static train load. The scale of deformations is increased for clarity [performed by the authors].

of static deformations are taken as initial conditions when performing a dynamic calculation [12; 15].

Pic. 3 shows the result of calculating the deformations of the ballast, sewer and rail track at a time slot of 1,8 s. The considered moment of time corresponds to the maximum value of the sewer deformation.

By analogy, the calculation of the maximum values of stresses in the concrete of the sewer along the *X*, *Y* and *Z* axes was carried out for three sections of the sewer under consideration, which differ in the cross-sectional shape, diameter and depth. As an example, the calculation results for the section near Yuzhnoye Highway are presented (Pic. 4).

The analysis of the obtained results revealed the maximum stress values in the concrete lining of the sewer, the amplitude of which does not exceed 45 kPa. Dynamic loads on the sewer, caused by the action of passing trains, have pronounced harmonic components with

a frequency of about 2,5 Hz. It should be noted that for sections of the sewer, which have a significant thickness, higher values (compared to other components) of the stress tensor along the *Y* axis are characteristic. This indicates that the sewer’s structures are subject to bending here. With a decrease in the wall thickness and an increase in the diameter of the tunnel, the moment of resistance to bending decreases, which means that the longitudinal and vertical loads increase (tensor components along the *X* and *Z* axes).

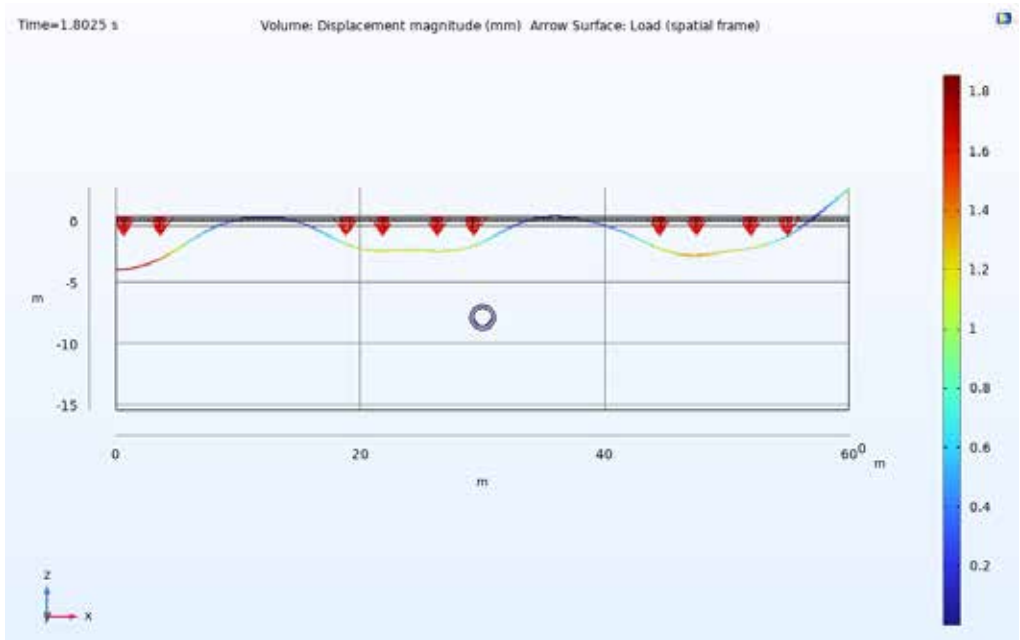
The sewer is under the influence of disturbances from a passing train and performs oscillations of a complex shape, the amplitude of which does not exceed 0,13 mm. As an example, Pic. 5 shows the result of calculating the deformations of the sewer along the *X* axis, calculated on the outer surface of the sewer in the area near Yuzhnoye Highway.

Oscillations have a complex shape, and vertical oscillations (along the *Z* axis) mainly predominate. An increase in oscillations may

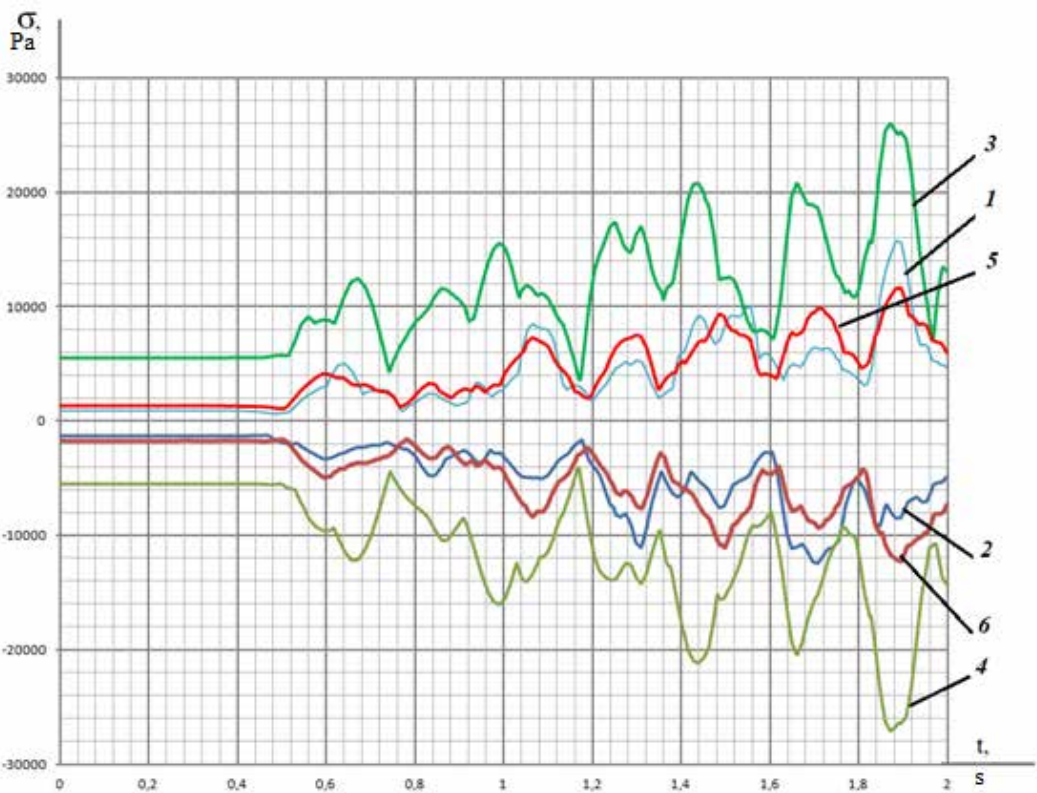
Table 1
Components of the main tensor of maximum stresses in the presence of a train above the sewer, Pa [performed by the authors]

Site	Axis X		Axis Y		Axis Z	
	behaviour in tension	behaviour in compression	behaviour in tension	behaviour in compression	behaviour in tension	behaviour in compression
Fermiskoye Highway	752	-890	2535	-2488	525	-1126
Yuzhnoye Highway	904	-1303	5489	-5499	1347	-1708
Obvodny Canal	3212	-3702	3398	-3358	2840	-3989

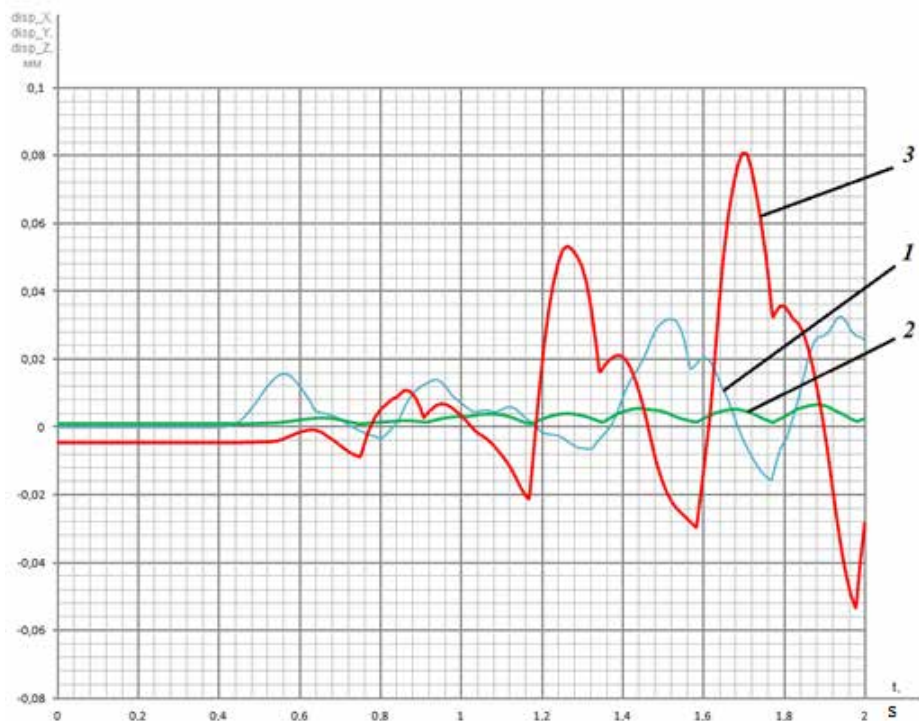




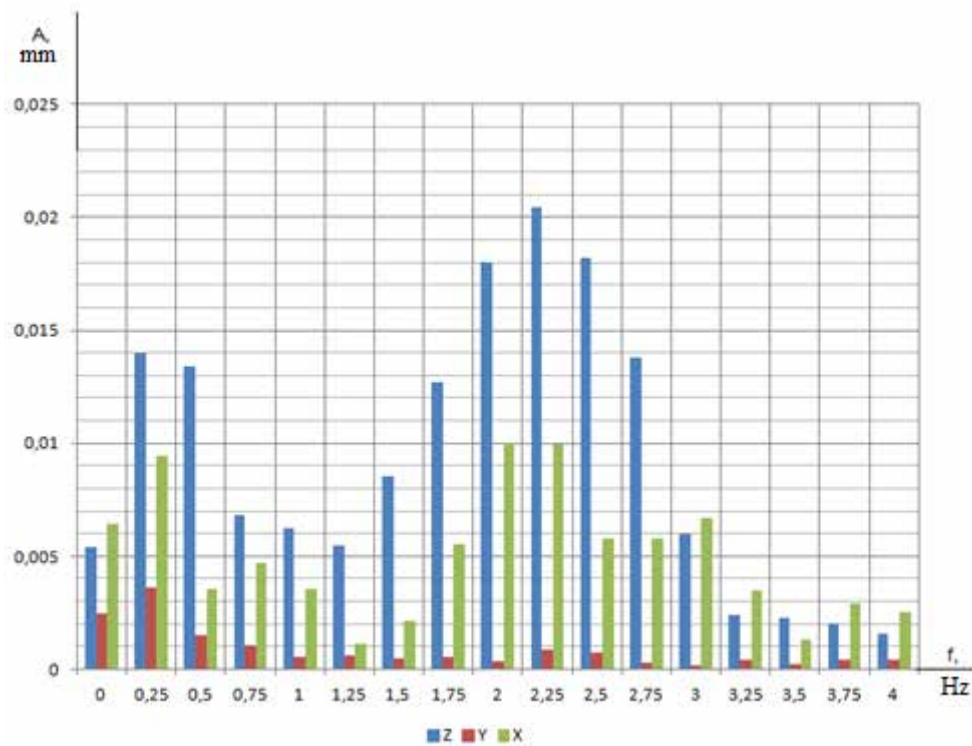
Pic. 3. The result of calculation of deformations of the ballast, sewer and rail track. The values of rail deformations are significantly increased compared to the real ones for the sake of clarity [16] [performed by the authors].



Pic. 4. The results of calculating the maximum values of stresses in the concrete of the sewer along the X, Y and Z axes when the train moves along the side track at a speed of 55 m/s:
 1 – behaviour in tension along the X axis; 2 – the same, but behaviour in compression;
 3 – behaviour in tension along the Y axis; 4 – the same, but behaviour in compression;
 5 – behaviour in tension along the Z axis; 6 – the same, but behaviour in compression [performed by the authors].

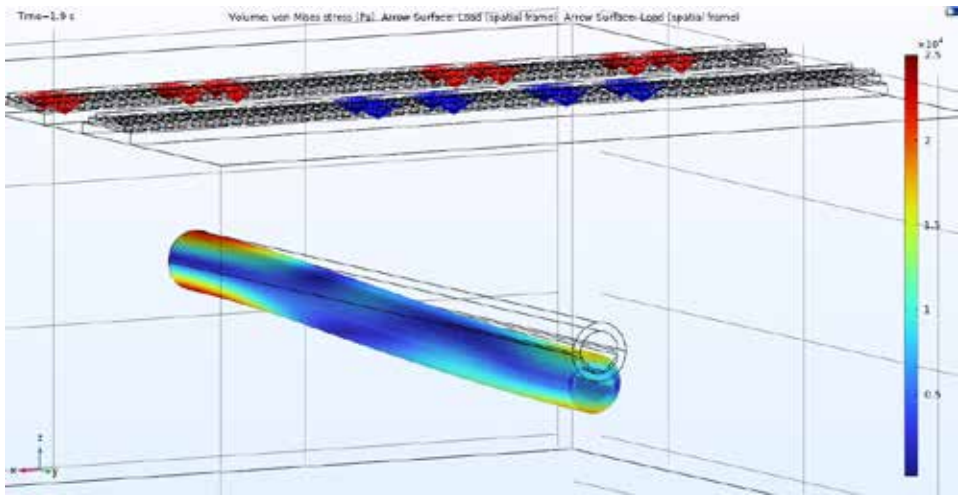


Pic. 5. The result of calculation of deformations of the sewer (displacement along the X axis), calculated on the outer surface of the sewer in the area near Yuzhnoye Highway [performed by the authors].

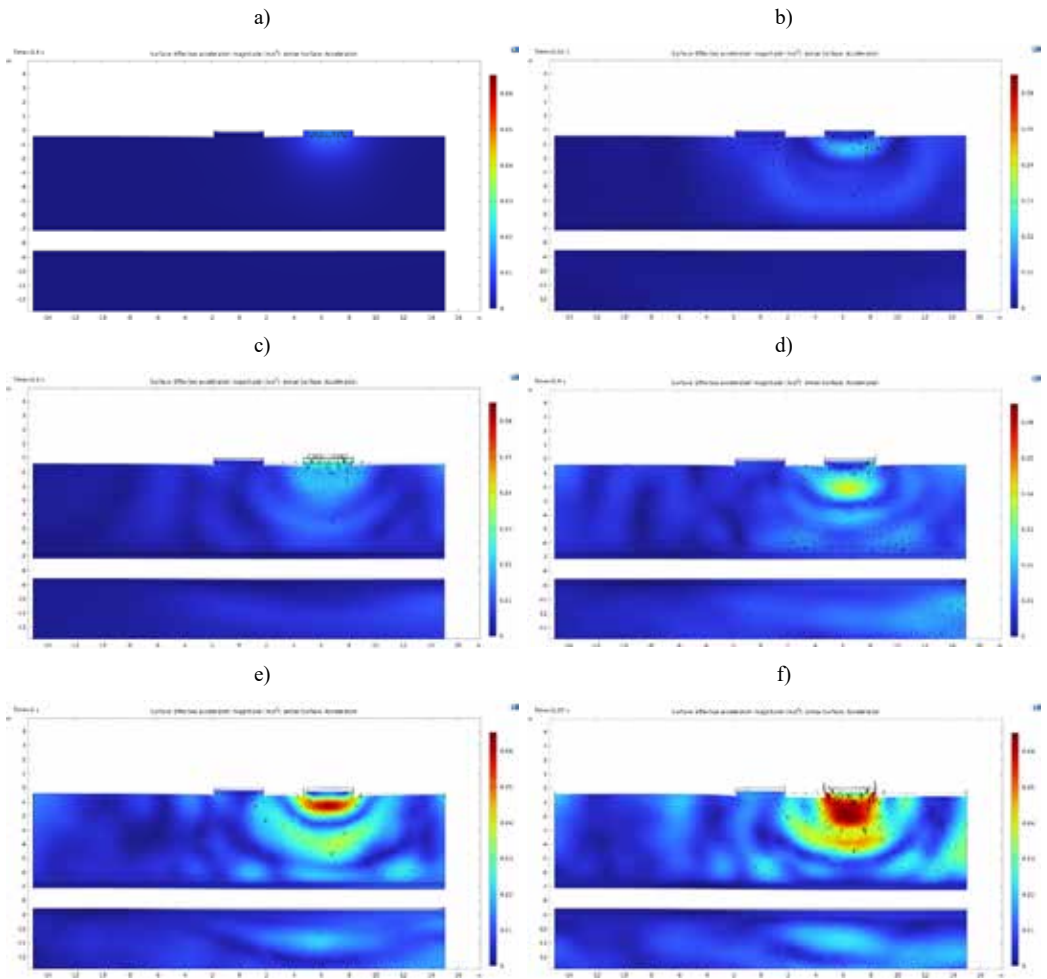


Pic. 6. The results of the spectral analysis of the time dependences of the deformation of the outer surface of the sewer in the area near Yuzhnoye Highway along the X, Y and Z axes [performed by the authors].

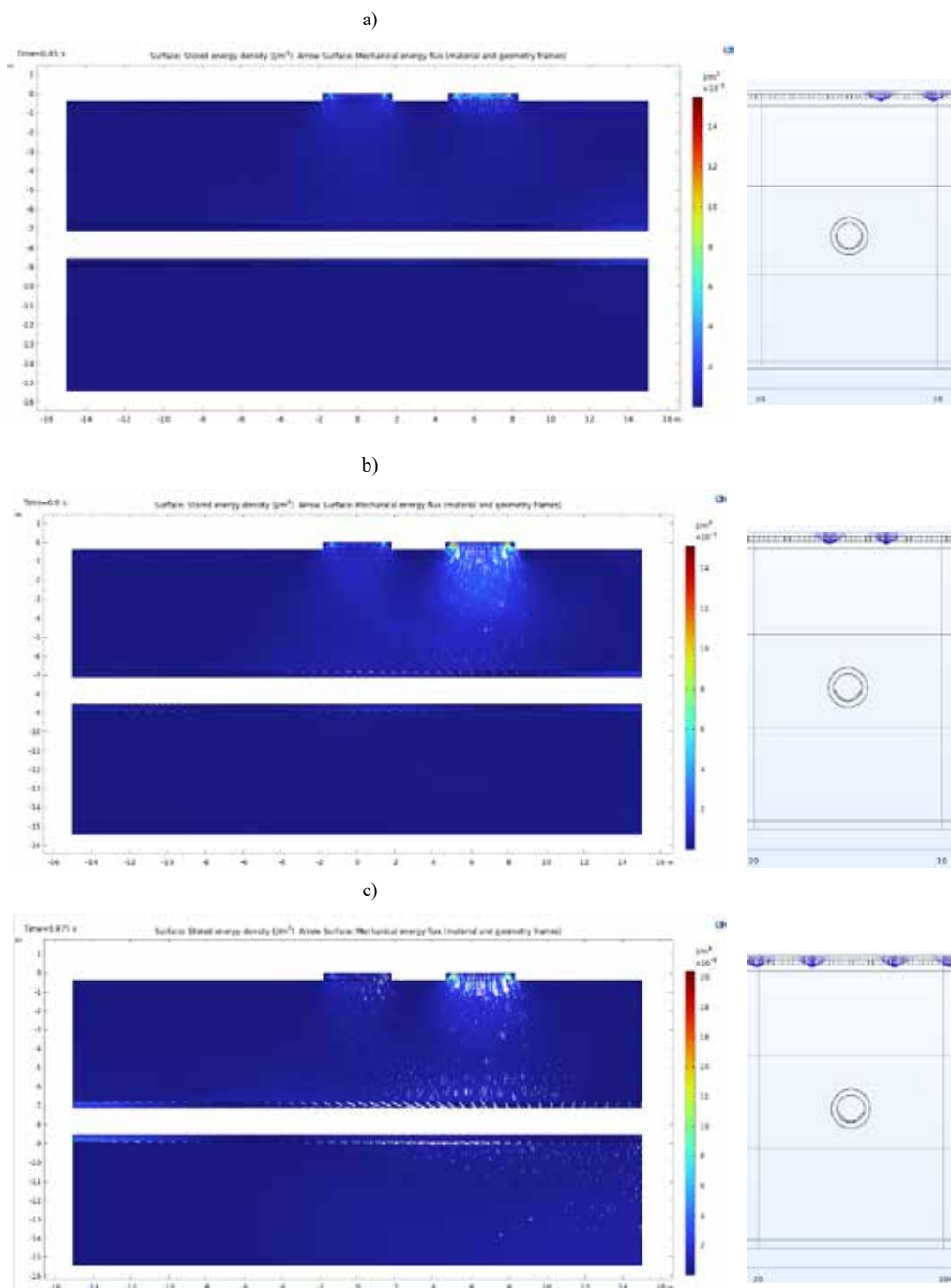




Pic. 7. The stress-strain state (according to Mises) of the sewer in the area near Yuzhnoye Highway at the time (1,9 s) corresponding to the maximum deformation. The scale of deformation is greatly enlarged for the purpose of clarity. The load from a train at rest is shown by red arrows, form a moving one by blue arrows [performed by the authors].



Pic. 8. Phases of the field of distribution of accelerations in the thickness of the soil: a – at the moment of time 0,4 s; b – at the moment of time 0,51 s; c – at the moment of time 0,6 s; d – at the moment of time 0,9 s; e – at the moment of time 1 s; e – at the moment of time 1,07 s. For clarity, the scale of soil deformation is increased by 2000 times [performed by the authors].



Pic. 9. Phases of the field of distribution of energy density in the thickness of the soil during the passage of the second bogie of the head wagon: a – at the moment of time 0,85 s; b – at the moment of time 0,9 s; c – at the moment of time 0,975 s. White arrows and lines show the direction of energy flows [performed by the authors].

indicate, among other things, the presence of resonant phenomena. This circumstance requires performing a frequency analysis and determining the natural frequencies of the structure.

The spectral analysis of the time dependences of the deformation of the outer surface of the sewer was performed along the X, Y, and Z axes (Pic. 6).



Table 2

A summary table of values of mass fractions involved in the oscillatory process at resonant frequencies, the corresponding amplitude values of displacements (μm), and the components of the tensile/compression stresses on the tunnel surface, (MPa) [performed by the authors]

Localisation	Parameter	X	Y	Z
Near Obvodny Canal	Mass participation coefficient, $m_{f,x}$, r. u. at a frequency of 1,9493 Hz	8,59E-10	0,000566	0,79543
	Mass participation coefficient, $m_{f,y}$, r. u. at a frequency of 2,2184 Hz	0,556368	3,2E-10	1,08E-10
	Mass participation coefficient, $m_{f,z}$, r. u. at a frequency of 2,3156 Hz	3,79E-10	0,507095	8,24E-05
	Total value of mass participation, $\sum m_f$	0,644884	0,618909	0,81044
	Amplitude values of displacements at resonant frequencies (μm)	46,7	46,7	45,3
	Tensile/compressive stress components on the tunnel surface, (MPa)	0,042/–0,037	0,024/–0,024	0,037/–0,047
Near Yuzhnove Highway	Mass participation coefficient, $m_{f,x}$, r. u. at a frequency of 1,937 Hz	1,46E-10	0,000765	0,794426
	Mass participation coefficient, $m_{f,x}$, r. u. at a frequency of 2,213 Hz	0,551516	7,7E-11	5,57E-11
	Mass participation coefficient, $m_{f,x}$, r. u. at a frequency of 2,30 Hz	1,78E-10	0,504217	9,24E-05
	Total value of mass participation, $\sum m_f$	0,6474	0,6241	0,8103
	Amplitude values of displacements at resonant frequencies (μm)	45,3	46,7	45,3
	Tensile/compressive stress components on the tunnel surface, (MPa)	0,017/–0,009	0,027/–0,027	0,012/–0,011
Near Fermerskoye Highway	Mass participation coefficient, $m_{f,x}$, r. u. at a frequency of 1,9314 Hz	4,52E-10	0,000356	0,800222
	Mass participation coefficient, $m_{f,x}$, r. u. at a frequency of 2,2158 Hz	0,551564	5,38E-10	5,64E-11
	Mass participation coefficient, $m_{f,x}$, r. u. at a frequency of 2,3651 Hz	7,46E-10	0,460332	0,0001
	Total value of mass participation, $\sum m_f$	0,650512	0,611397	0,812321
	Amplitude values of displacements at resonant frequencies (μm)	45,3	48,3	45,3
	Tensile/compressive stress components on the tunnel surface, (MPa)	0,011/–0,017	0,016/–0,011	0,009/–0,013

The resulting spectrum contains two resonant peaks at frequencies of the order of 0,25 and 2,25 Hz in directions Y and Z, and in direction X, in addition to those indicated, two additional peaks were detected at frequencies of 3 and 3,75 Hz.

The deformed state of the sewer, corresponding to the moment of reaching the maximum deformation (1,9 s), is shown in Pic. 7.

In general, the results of the calculation show that the obtained values of deformations of the sewer's section, due to the action of train loads, are insignificant and cannot have a significant impact on the state of the structure.

The initial stage of the oscillatory process of the soil under the influence of displacements of

the track superstructure, corresponding to the passage of the first bogie over the sewer, is shown in Pic. 8.

The wave nature of the distribution of accelerations in the thickness of the soil is revealed. The acceleration value decays significantly as the distance from the railway track increases. The maximum values of accelerations in the thickness of the soil were found near the roadbed at the moments of time corresponding to the passage of the wheel over the axis of symmetry of the sewer.

The result of calculating the distribution of the specific energy of the system is shown in Pic. 9, that considers the process that accompanies

the passage of the wheel over the axis of symmetry of the sewer. The position of the load on the rail relative to the sewer axis is shown on the right.

The following moments of time are considered: 0,85 s – approach of the wheelset of the second bogie of the head wagon; 0,9 s – the axis of symmetry of the second bogie is located above the axis of symmetry of the sewer; 0,975 s – approach of the bogie of the second wagon; 1,015 s – the axis of the wheelset of the first bogie of the second wagon is above the axis of symmetry of the sewer; 1,04 s – the axis of symmetry of the first bogie of the second wagon is located above the axis of symmetry of the sewer; 1,1 s – distancing of the first bogie of the second wagon from the sewer’s symmetry axis.

Based on the results of studying the distribution of the specific energy of the system, it can be concluded that there is a tendency for a sharp decrease in the intensity of energy processes for a depth level within 5–7 m. Thus, the effect of dynamic train loads and vibration of the track superstructure on the object under consideration is insignificant.

Calculation of Natural Frequencies of Oscillatory Processes of Sewer’s Sections

To assess the dependability of a structure, the distribution of modal (effective) mass fractions of the structure involved in the oscillatory process at resonant frequencies is sufficiently informative. The calculation is made in the Comsol environment using the Eigenfrequency tool. As a result of the calculation, the masses involved in the oscillatory process in directions X , Y and Z , m_{ex} , m_{ey} , m_{ez} , respectively, were determined. The obtained values were correlated with the total mass of the oscillatory system under consideration.

The total values of the components of the coefficient of mass participation of structural elements of the structure according to the directions of the basis vector (X , Y , Z) show the achievement of resonant frequencies within the seventh iteration (more than 50–60 % of the mass participation of the structure is involved in the oscillatory process [7]), which allows us to consider the resonant frequencies achieved, and the results of the dynamic study reliable.

The relative values of the mass fractions involved in the oscillatory process for the corresponding values of the modal frequency values are presented in the summary Table 2.

CONCLUSIONS

Modelling the stress-strain state of the sewer under the action of static and dynamic loads from the train load (with an axial load of 25 tons) made it possible to establish the wave nature of distribution of deformations and accelerations in the soil with pronounced harmonic components. The frequency spectrum of the oscillatory process is generally identical for all sections of the sewer and contains two resonant peaks at frequencies of the order of 0,25 and 2,25 Hz along directions Y and Z , while along direction X (along the axis of the tunnel), in addition to those indicated, two additional peaks were detected at frequencies 3 and 3,75 Hz. The frequency of the perturbing forces is close to the resonant one, however, due to the smallness of the oscillation amplitudes, this phenomenon is not dangerous.

The sections of the sewer with a significant lining thickness are characterised by higher values of the stress tensor components along the Y axis (within 45 kPa), which confirms the fact that the sewer’s structure is subject mainly to bending. A structure with a smaller wall thickness and a larger tunnel diameter (respectively, a lower bending resistance moment) is characterised by relatively high longitudinal and vertical loads (components along the X and Z axes).

As a result of the study of the process of distribution of the specific energy of the system over the massif, a tendency was revealed for a sharp decrease in the intensity of energy processes within the depths of 5–7 m.

REFERENCES

1. Chemezov, D. A. Harmonic analysis of a statically indeterminate frame [*Garmonicheskiy analiz strategicheski neopredelimoj ramy*]. *Molodoi ucheniy*, 2014, Iss. 12 (71), pp. 122–127. [Electronic resource]: <https://moluch.ru/archive/71/12203>. Last accessed 14.03.2023.
2. Verigo, M. F., Kogan, A. Ya. Interaction of track and rolling stock [*Vzaimodeystvie puti i podvizhnogo sostava*]. Ed. by M. F. Verigo. Moscow, Transport publ., 1986, 559 p. [Electronic resource]: <https://lokomotiv.ru/zheleznodorozhnyy-put/vzaimodeystvie-puti-i-sostava.html>. Last accessed 14.03.2023.
3. Vlasov, G. M., Shirokov, Yu. M., Yashnov, A. N. Methodology and some results of experimental studies of the work of the slab of the ballast container of reinforced concrete span structures [*Metodika i nekotorye rezultaty eksperimentalnykh issledovaniy raboty plity ballastnogo koryta zhelezobetonnykh proletnykh stroenii*]. Improving reliability and efficiency of railway transport. Abstracts of reports. Novosibirsk, Novosibirsk Institute of Railway Engineers, 1988, pp. 5–11.
4. Chernyshev, M. A. Practical methods for track calculation [*Prakticheskie metody rascheta puti*]. Moscow,



Transport publ., 1967, 235 p. [Electronic resource]: https://rusneb.ru/catalog/000200_000018_rc_4792595/. Last accessed 14.03.2023.

5. Shakhunyan, G. M. Railway track [*Zheleznodorozhnyi put*]. Moscow, Transport publ., 1987, 479 p. [Electronic resource]: <https://vtome.ru/knigi/tehnika/453305-zheleznodorozhnyi-put-1987.html>. Last accessed 14.03.2023.

6. Popov, S. N. Ballast layer of a railway track [*Ballastnyi sloi zheleznodorozhnogo puti*]. Moscow, Transport publ., 1965, 183 p. [Electronic resource]: <https://www.fractr.one/file/1469391/>. Last accessed 14.03.2023.

7. Laird, G. Finite element analysis for everyone. Part 2. Translated in Russian [Electronic resource]: <http://sapr.ru/article/21944>. Last accessed 14.03.2023.

8. Feng, Huan. 3D models of Railway Track for Dynamic Analysis. Master Degree Project. Stockholm, 2011. [Electronic resource]: <http://kth.diva-portal.org/smash/get/diva2:467217/FULLTEXT01.pdf>. Last accessed 14.03.2023.

9. Darensky, A. N., Vitolberg, V. G. Resistance of intermediate fasteners KB and KPP-5 to rail displacements in the longitudinal plane [*Soprotivlenie promezhutochnykh skreplenii KB i KPP-5 peremescheniyam relsov v prodolnoi ploskosti*]. In: *Collection of scientific works of DonI ZhT*, 2008, Iss. 14, pp. 142–152. [Electronic resource]: <https://cyberleninka.ru/article/n/soprotivlenie-promezhutochnykh-skreplenii-kb-i-kpp-5-peremescheniyam-relsov-v-prodolnoy-ploskosti/viewer>. Last accessed 14.03.2023. Здесь эта статья есть...Находятся похожие, но не эта.

10. Efimov, S. V. Laboratory testing of longitudinal boards of ballast containers plate of reinforced concrete superstructure with riding on the ballast on the effect of

horizontal load. In: *Transport: science, education, production (Transport-2016)*. Rostov-on-Don, RGUPS publ., 2016, pp. 44–48. [Electronic resource]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28342638>. Last accessed 14.03.2023.

11. De Corte, W., Van Bogaert, Ph. The use of continuous high-frequency strain gauge measurements for the assessment of the role of ballast in stress reduction on steel railway bridge decks. *Insight – Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 2006, Vol. 48, No. 6, pp. 352–356. DOI: 10.1784/insi.2006.48.6.352.

12. Suiker, A. S. J. The Mechanical Behaviour of Ballasted Railway Tracks. Delft University Press, 2002, 236 p. ISBN 90-407-2307-9.

13. Omarov, A. D., Nusupbekov, S. I. Evaluation of reliability of rail fastenings [*Otsenka nadezhnosti relsovykh skreplenii*]. *Vestnik Natsionalnoi inzhenernoi akademii RK*, 2008, Iss. 2 (28), pp. 93–97. [Electronic resource]: http://www.elibrary.kz/download/zhurnal_st/st2049.pdf. Last accessed 14.03.2023.

14. Bonifacio, C., Ribeiro, D., Calçada, R., Delgado, R. Dynamic Behaviour of a Short Span Filler-Beam Railway Bridge under High Speed Traffic. In: J. Pombo, (Editor), *Proceedings of the Second International Conference on Railway Technology: Research, Development and Maintenance*, Civil-Comp Press, Stirlingshire, UK, Paper 79, 2014. DOI: 10.4203/ccp.104.79.

15. Shih, Jou-Yi, Thompson, D., Zervos, A. Assessment of track-ground coupled vibration induced by high-speed trains. In: *The 21st International Congress on Sound and Vibration*, 13–17 July 2014, Beijing, China. [Electronic resource]: <http://eprints.hud.ac.uk/id/eprint/29165/>. Last accessed 14.03.2023.

Information about the authors:

Vataev, Andrey S., Ph.D. (Eng), Associate Professor at the Department of Electrical Engineering and Heat Power Engineering of Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia, avataev@yandex.ru.

Vatulin, Yan S., Ph.D. (Eng), Associate Professor at the Department of Ground Transportation and Technological Systems of Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia, yan-roos@yandex.ru.

Kavkazsky, Vladimir N., Ph.D. (Eng), Associate Professor at the Department of Tunnels and Metro of Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia, Kavkazskiy_vn@mail.ru.

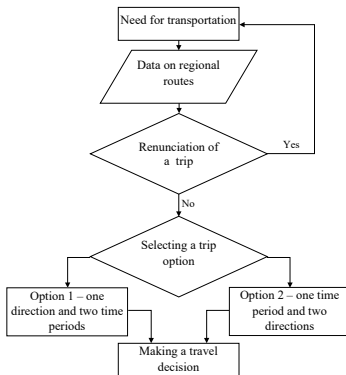
Article received 22.02.2023, approved 27.12.2023, accepted 27.12.2023.

Editorial note. The paper that presents from the authors' perspective a new approach to the statement and solution of the considered problem, caused several questions from behalf of the reviewers. The authors have suggested feedback and clarifications to some questions and counterarguments to others. The editorial board, understanding debatable contents of the article, novelty and and complexity of the problem stated within the topic under consideration, deemed possible to suggest the article for readers' consideration as a step towards wider discussion.

Positively highlighting practical and scientific value of the authors' conclusions on the wave character of distribution of deformations and accelerations within the soil massif with pronounced harmonic components, the reviewers have noted a logical inconsistency between statement of the problem as that of assessment of rate of influence of oscillatory impact of high-speed rolling stock on the bearing elements of buried tunnel-type culvert, problem as assessment of operational dependability of the structure, the objective as analysis of strain-stress state of bearing elements of buried structures and the conclusions. Editorial board notes also certain inconsistency between the declared objective and sufficiently substantiated particular conclusion.

The authors from their part note absence of discrepancy outlined by reviewers between stated analysis of dynamic impact and static analysis described in the article. The authors are well aware that with the increase in speed of rolling stock dynamic impact on track and infrastructure also increases. That with that purpose that the static calculation of tunnel structure was performed along with dynamic calculation regarding movement of high-speed train. According to authors' opinion, the results described in the paper demonstrate just the character of changes in stress and strain deformations in tunnel structure in dynamic mode, and that is testified by time dependencies of changes in tensor components and maximum values of deformations; tensor's components in static mode are quoted for comparison; it was clearly revealed that loads in dynamic mode are higher than in static one.

In any case, in editorial board's opinion, only further discussion can help to reconcile controversial opinions that arose during preparation of the article for publication.



AIR TRANSPORT 252

Relationships in the regional air transportation market are focused on passengers.

LOCOMOTIVE DEPOT 261

Increasing capacity with technical and organisational improvements: possible contents and prioritisation.

TRANSPORT CYBER-PHYSICAL SYSTEMS 268

Transport information, railway information, cybersecurity.



SEA TRANSPORT 275

Modern approaches to diagnostics of ship engines: wavelet neural network, technical vision, programmable logic circuits.

PIGGYBACK SYSTEMS 283

Is it possible to reveal advantages considering multitude of factors?

TRANSPORT COSTS 295

Transportation of coal: optimisation of container operations.

MANAGEMENT, CONTROL AND ECONOMICS



ORIGINAL ARTICLE

DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-6-10>World of Transport and Transportation, 2023,
Vol. 21, Iss. 6 (109), pp. 252–260

Interaction Model of Regional Air Transportation Market Participants under the Conditions of Limited Competition



Alexander V. BANDURIN



Sergey V. MATYUKHA

*Alexander V. Bandurin¹, Sergey V. Matyukha²*¹ Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russia.² ANO HE «International Institute of Management and Law», Moscow, Russia.¹ ORCID 0000-0002-3608-4168; Web of Science Researcher ID: C-9406-2015; Scopus Author ID: 56527389700; Russian Science Citation Index SPIN-code: 4988-2805.² ORCID 0009-0009-5717-809X; Russian Science Citation Index SPIN-code: 8674-7605.✉ ¹ abander@mail.ru.✉ ² m-83@bk.ru.

ABSTRACT

The objective of the article is to build a model of interaction between participants in the regional air transportation market, considering the peculiarities of internal competition in Russia.

The paper discusses the main parameters of the consumer behaviour model in the regional air transportation market, suggests options for the dependencies of consumer decisions depending on the cost, geography of the route network, flight

schedules and the total transportation capacity in specific directions.

Also, a model of the behaviour of the air carrier is proposed, that includes the parameters of the costs of transportation, additional costs for paying for the services of auxiliary and supporting participants. Functions are formed that describe the interaction of participants based on an effective combination of behaviour models and a possible conflict of interest.

Keywords: air transport, regional transportation market, consumer behaviour model, airline behaviour model, limited competition, interaction between participants in the air transportation market.

For citation: Bandurin, A. V., Matyukha, S. V. Interaction Model of Regional Air Transportation Market Participants under the Conditions of Limited Competition. World of Transport and Transportation, 2023, Vol. 21, Iss. 6 (109), pp. 252–260. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-6-10>.

The text of the article originally written in Russian is published in the first part of the issue.
Текст статьи на русском языке публикуется в первой части данного выпуска.

INTRODUCTION

Interaction in the regional air transportation market is carried out under a three-sector scheme. The main sectors of air transportation as of a market product are:

- 1) Participants in the process of producing air transportation as a product (manufacturers of the product).
- 2) Consumers of the air transportation product, which include passengers (for passenger air transportation) and cargo owners (for air cargo transportation).
- 3) Auxiliary and supporting market participants who are not directly involved in air transportation but create the necessary conditions for smooth functioning of the market.

We propose to include, for example, airlines, airports, air traffic control and air navigation services in the list of the main participants in the process of producing air transportation as a product. Then the auxiliary and supporting market participants are maintenance and repair factories, catering businesses, divisions providing services to passengers and visitors of the transport infrastructure (meeting and assisting personnel, public and personal transport, etc.), transport security services, cleaning services, etc. Accordingly, on the other side of the product is the consumer.

Obviously, in a broader interpretation of the air transportation market, it is also necessary to consider the state as a regulator and controller of the activities of market participants, the population, which is exposed to various factors that arise during the process of product manufacturing, as well as other interested parties, including aircraft manufacturers, civil engineering (construction) organisations, etc. However, the key market participants are the sectors discussed earlier. From the point of view of interaction zones, the diagram of air transportation as a product has the shape of a triangle, the vertices of which are groups of participants, and the sides represent emerging relationships (Pic. 1).

It is important to understand here that not only economic relations exist in such a scheme. In addition to the product «purchase-sale» relationship, social relationships arise between sectors, for example, in the form of brand loyalty, as well as stable links between specific companies in terms of involvement in regular and one-time actions, co-branding initiatives aimed at promoting a brand in an unusual area of consumption.

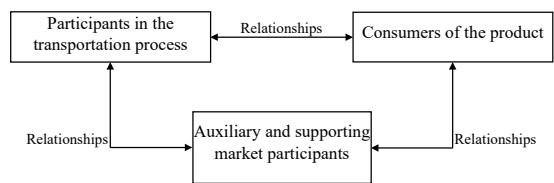
The objective requirement for a balance of economic activity assumes that all market participants strive to establish a mutually beneficial equilibrium, when air transportation on a specific route uses such a volume of resources (aircraft, infrastructure, personnel) that allows them to fully satisfy effective demand. In this situation, the most important guideline for establishing strategic priorities for market development is correct identification of the set of consumers.

Thus, the issues discussed in the article are of high relevance in the Russian transport sector and can be applied in other countries. Therefore, the main *objective* of the article is to develop a methodology for correctly assessing the quantity and quality of potential passengers who are motivated to purchase products on the regional air transportation market, which will improve the management efficiency of this sector of the transport industry. Due to the high capital intensity of business and the low level of capital productivity of participants in the air transportation market, the issue of improving the quality of forecasts of potential demand becomes extremely important.

The main research *methodology* includes the apparatus of set theory, theories of mathematical modelling, decision-making theories, principles of utility, graphical and tabular methods.

LITERATURE REVIEW

The issues of analysing air transportation markets of various sizes are quite often considered by modern authors. For example, among recent



Pic. 1. Main sectors of relationships in the process of consumption of air transportation as a product [performed by the authors].



publications, works [1–6] should be noted. However, most analytical works tend to consider general statistical indicators of the entire market conditions without dividing the market into individual segments. This approach does not allow us to assess trends in fluctuations in consumer preferences, as well as the problems of carriers.

Mechanisms and models of relations between various groups of stakeholders in the air transportation market are discussed in works [7–12]. It should be pointed out here that in most works there is no analysis of the interaction mechanism, the target indications of stakeholders in the decision-making process are not considered, therefore, in the process of making marketing decisions, the main source of interests is the air carrier. Also, under modern conditions, it is necessary to consider the change in the nature of the market and the transformation of relations within the «buyer's market» paradigm.

The economic basis for functioning of the air transportation market is considered by the authors of such works as [13–19]. However, most works in this subject area do not consider the realities of the post-Covid and further transformation of the air transportation market, and that significantly reduces the range of analysed risks and sources of threats to the domestic regional air transportation market.

MAIN RESEARCH RESULTS

In our studies, we have examined in some detail passenger transportation and the structure of consumption of this product [20–22]. As we stated earlier, a consumer is an individual, household, or group of individuals with common interests who chooses and implements a plan for consuming a particular product. When choosing and implementing his consumption plan, any consumer is guided by the existing objective restrictions on choice and by subjective selection criteria. In our opinion, there are two main types of constraints:

1) «A priori constraints, for example, geographical preferences or the time period of product consumption» [21].

2) Consumer budget as the amount of funds initially allocated by the consumer for the purchase of a product.

We believe that, other things being equal, the total cost of a consumer plan should not exceed the consumer's budget. Thus, the imposition of all constraints leads to the fact that the consumer

gets a single consumption plan. Let's consider the possibilities of assessing the interaction pattern between participants from the consumer's point of view [21].

Let the number m be fixed (m is a positive integer), characterising the number of consumers in the regional air transportation market. Each consumer receives an index i : $i = 1, \dots, m$. Each consumer has his own consumption plan, which is described by element x_i , which is a regional route included in a predetermined product space R^l . We call this product space a regional route network. Moreover, for the i -th consumer, a specific consumption plan x_i is either acceptable or unacceptable.

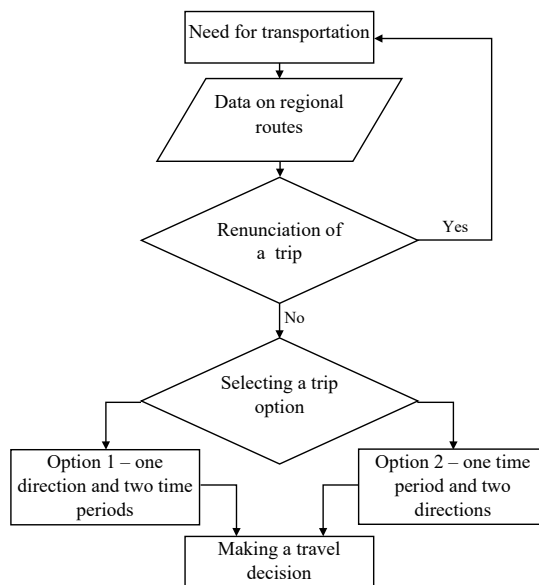
Then for the i -th consumer, a consumer set X_i can be formed, including all routes acceptable for this consumer. Let x be the demand of the i -th consumer, described by a point in the product space. If all consumers are given consumption

plans x_i , the vector $x = \sum_{i=1}^m x_i$ describes aggregate consumption or aggregate demand in a given regional air transportation market. Then $X = \sum_{i=1}^m X_i$ this is the total consumer set.

Here it is important to use certain generalisations, which are illustrated by examples. We propose to fix a local agreement on the signs of variables. Let all numbers describing the inputs of a particular consumer have a *positive* sign, and all outputs are negative numbers. For example, the inputs for any consumer are the products of the regional air transportation market, that is, existing and available regional routes. Then let us suppose that the outputs for the consumer will be the various types of labour he performs.

It is also necessary to understand that each consumer can choose from all the options available to him in the market. In turn, the market supply consists of the production plans of all manufacturers. That is, if the consumer's input is the h -th product, its smallest value is 0, for example when the product is not available in the market. At the same time, this same h -th product is an output for the manufacturer (air carrier). It is obvious that for a given amount of labour there is a corresponding maximum value of product. Options for a specific consumer to choose various consumer plans are shown in Pic. 2.

In fact, in the regional air transportation market, the i -th consumer cannot reach the saturation point. That is, whatever his initial choice from the consumer set X_i may be, it is



Pic. 2. Flowchart of consumer travel decision making [performed by the authors].

always possible to form an alternative consumption that the consumer will prefer to the original one. Thus, the first function is introduced to describe consumer behaviour in the regional air transportation market. As «a measure of the quantitative preference of the i -th consumer from a set of regional routes x_i , let us use the utility function u_i » [21]. This function characterises the quantitative meaning of the degree of satisfaction with choice x_i for the i -th consumer.

Further, the budgetary constraint regarding a particular consumer begins to play an important role in the selection process. We adhere to the principles of classical economics, therefore, in the categories of set theory, this limitation is described as follows: let a set of prices p and consumption x_i be given, then the direct costs of the i -th consumer will be p^*x_i . At the same time, costs cannot exceed the budget of a particular consumer w_i .

Then, «for a given price system p on the regional air transportation market and for a given budget w_i , the costs of the i -th consumer p^*x_i for their consumption (regional route) x_i from their own consumer set X_i satisfy the budget constraint $p^*x_i \leq w_i$ » [21]. In this case, the budget distribution $w = (w_i)$ is described by a single element of the set of admissible budgets R^m . Then the typical pair «price – budget» is an element (p, w) of the set R^{l+m} .

We believe that in some cases, after choosing the pair (p, w_i) , the set of consumer plans x_i will be empty. Therefore, it is advisable to select a set S_p , which includes only those «price – budget»

pairs (p, w_i) , when choosing which the set of consumer plans contains at least one element. Then for each pair (p, w_i) from the set S_i there exists a non-empty set $\gamma_i(p, w) = \{x_i \in X_i \mid p^*x_i \leq w_i\}$ of admissible consumer plans that satisfy the budget constraint specifically for the selected pair (p, w) . That is, there is a uniquely defined mapping of γ_i from S_i to X_i .

This display must be presented in such a way that the individual demands of different consumers can be summed up. Then, using the utility function u_i to evaluate regional routes, any consumer in the regional air transportation market will choose the best element in accordance with his preference, that is, the option with the maximum value of the function u_i on $\gamma_i(p, w)$, or the feasible consumer plan that is optimal with regard for constraints imposed by his budget.

Moreover, any single-factor demand functions fit correctly into this model of demand on the regional air transportation market. «Curves of the form $y_i = f_i(Z)$ corresponding to these functions are called Engel curves» [23]. In our opinion, regional air transportation is not an essential product, so demand arises only after the consumer reaches a minimum threshold of his own income. On the other hand, regional air transportation is not a luxury item either. Consequently, regional air transportation is a non-essential (durable) good, «the demand for which is described by the Tornquist function» [24]. For durable goods, «the function has the following form:



$$D = a * (I_1 - I_2) / (I + b),$$

where I – income, if $I_1 \geq I_2$, a, b – parameters of the model» [21].

Typically, the usefulness of such products is assessed only by consumers who have reached the required income threshold. Moreover, the saturation of demand for such a category of products always has an asymptotic character and cannot be limited in advance.

The prerequisites for the developed model of functioning of the regional air transportation market were models of aggregated and disaggregated demand. In particular, in aggregated models, the accuracy of some dependencies is insufficient, therefore, to absorb the accumulative error and describe dependencies that are unimportant for the purposes of the study, appropriate variables are included in the equation. Then the demand function has the following form:

$$Y = F(X) + \varepsilon,$$

where Y – demand;

X – vector of arguments influencing the demand;

$F(X)$ – form of dependence;

ε – parameter to consider the influence of accumulated error and minor variables.

In turn, disaggregated (behavioural) models of demand for transport services are based on the results of an analysis of consumer parameters that form the consumer plan. For example, one type of disaggregated model is discrete choice models. In such models, the decision-making consumer n always has a set of discrete alternatives $j = 1, \dots, J$, from which he chooses the option that maximises the utility of the choice. The function looks like:

$$U_{jn} = V(z_{jn}, s_n; \beta) + \varepsilon_{jn},$$

where $V()$ – type of systematic utility function;

z_{jn} – vector of alternative solutions;

s_n – vector of consumer characteristics;

β – vector of unknown parameters;

ε – unobservable utility component.

Regardless of the chosen type of model, it is necessary to predict the values of the aggregated quantities that make up the set of independent variables of a particular demand equation. In particular, for the air transportation market, such variables are the size of the total passenger traffic on a particular route or the total passenger traffic between specific travel points. The task of assessing the impact of each variable on a model requires that the variable be explicitly included in the model.

Thus, to collect the necessary information, it is necessary to change the forms of statistical accounting in air transport. For example, panel data, which is easy to collect in the air transportation system, is quite informative for generalisation. Moreover, panel data allows one to analyse the dynamics of behaviour and the factors of choice of any sample of consumers in the regional air transportation market, not only at a given point in time, but also over several periods, providing the necessary reliability and the ability to analyse seasonality. Panel data provides the opportunity for its verification during the formation of all the topological sets described above.

In addition to consumers, product manufacturers also participate in the air transportation market. In our opinion, «a manufacturer in the regional air transportation market is a specialised enterprise that has passed a qualifying selection and is endowed by the state authorities of the Russian Federation with the legal right to carry out activities for the transportation of passengers by air, confirmed by the presence of a Commercial Aviation Operator Certificate» [21]. For simplicity, we will call such a manufacturer «airline». In fact, the manufacturer in the regional air transportation market is an economic agent that forms and implements its own production plan by offering consumers a set of air transportation options as its main product.

Let the number of manufacturers in the regional air transportation market be given by the number n (n is a positive integer), and each manufacturer is assigned an index $j: j = 1, \dots, n$. Then the totality of products as individual elements y constitutes the production plan of any manufacturer. Moreover, y_j is a regional route included in the product space R^l , i.e., the airline's regional route network.

For the j -th airline, a specific production plan y_j is either technologically acceptable or technologically unacceptable, for example, due to the lack of aircraft of a certain type, the inability to fly to a given range or to airfields of certain classes. Then the production set of the j -th airline is the set Y_j of all its production plans, that is, feasible regional routes.

The offer of the j -th airline is represented by element y_j , which is a point in the space of products offered by the j -th airline in the regional air transportation market. If the production plan y_j is fixed, then the sum of the form $y = \sum_{j=1}^n y_j$ is called total production or total supply of the airline.

A set $Y = \sum_{j=1}^n Y_j$ is a set of total production possibilities. Therefore, if $y_j \in Y_j$ for all $j = 1, \dots, n$, then $y \in Y$. Moreover, the power of the set of production capabilities of the regional air transportation market is clearly greater than the power of the set of R^l products.

Based on the listed parameters and sets, a system of consumer plans and production plans of airlines, quantitative estimates of input and output are formed, and the total quantity of each product available to participants in the regional air transportation market is estimated. The result is an estimate of the total amount of resources of the market under consideration (total resources) ψ .

Here it is also necessary to agree on signs. Let negative numbers describe all the inputs of a particular manufacturer, then all its outputs are positive numbers. Let's consider regional routes of a regional route network as outputs of a manufacturer on a given market. Here, each type of product not only certainly contains the corresponding characteristics and price but is also the single one. That is, the consumer always chooses a specific regional route as the most useful product for himself.

The interaction between the airline and the airport is also described by set theory. The airport is not a producer in the regional air transportation market, since it does not create an independent product consumed in this market. Therefore, the airline is the only type of producer when building set of producers in the regional air transportation market, since only the airline produces the product the consumer needs.

At the input, any airline receives the resources necessary for its operation: aircraft technical resources, aviation fuel, aircraft take-off and landing control services, air traffic control services, meteorological services, airline employee labour, etc. Moreover, the airline's production plan is chosen so as to maximise profit at given product prices, that is, the difference between the cost of the airline's output and the cost of providing input.

Let us consider in more detail the individual properties of the regional air transportation market model. The first property is additivity. Let the j -th airline have two different regional routes y_j^1 and y_j^2 – by definition, non-empty sets of admissible production plans, then the sum

$y_j^1 + y_j^2$
is also a valid production plan, that is:

$$(Y_j^1 + Y_j^2) \subset Y_j.$$

Indeed, if it is possible for an airline to operate flights on two independent regional routes (two production plans are separately admissible), then their sum is also an admissible production plan. One consequence of product additivity is cost additivity.

Another property is multiplicativity, that is, the possibility of multiplying the set y_j by a non-negative number t . For the airline, this means the ability to change the scale of its operations. If $t > 1$, the scale of the airline's operations increases. If $t < 1$, the scale of the airline's activities decreases accordingly. Thus, if it is possible to increase the scale of an airline's operations within the production plan y_j , this indicates that non-diminishing returns to scale have emerged.

Accordingly, if it is possible to reduce the scale of the airline's activities within the framework of the production plan y_j , then we can talk about the formation of non-increasing returns to scale. Let's consider the situation for the j -th airline. If there are two independent production plans y_j^1 and y_j^2 , then there is a weighted average $t * y_j^1 + (1 - t) * y_j^2$ for any t ($0 \leq t \leq 1$).

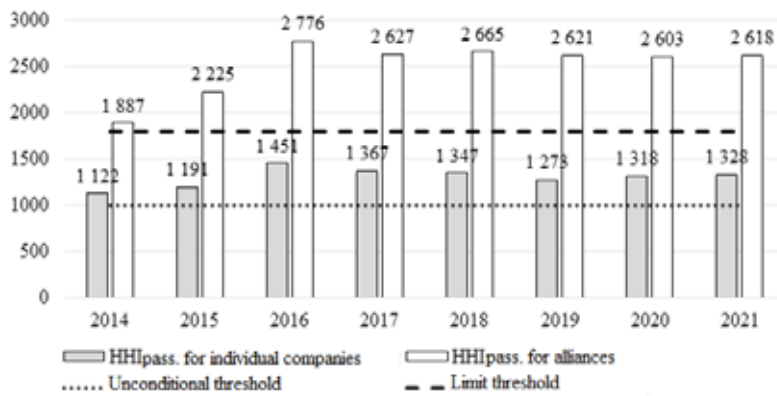
This is how the nonincreasing returns to scale described above manifest themselves. This particular case of a mathematical description clearly explains the possibility of using the considered theory of the local air transportation market for the civil aviation of the entire country.

The price system p was introduced above. Then, if the price system p (the final price of an air transportation unit for a specific consumer x_i) and the cost of the production plan y_j (the cost of flying on a regional route y_j) are known, then the income of the j -th airline is $p * y_j$, and its total income is calculated as $p * y$.

In market conditions, any airline acts to maximise its own profits. In accordance with this assumption, the choice of a production plan by each j -th airline as a certain set of regional routes from the available production set Y_j means that the airline will maximise its profit on each regional route.

Since the total maximum profit may not exist for an arbitrary p , then there is a set T_j of elements p from R^l for which the profit is maximum. Also, in the entire set of routes, there is always a certain number of regional routes that generate maximum profit for the airline. Let us take as an axiom the fulfilment of the inequality $p * y_j > 0$ in a strict form, that is, the impossibility of the existence of both a «cornucopia» and a «perpetual motion machine» for an airline.





Pic. 3. Dynamics of Herfindahl-Hirschman index values for individual companies and airline alliances [performed by the authors based on their own calculations].

Then for each price system p included in the set T'_j , there is a non-empty set $\eta_j(p)$ of feasible production plans, under which the airline generates maximum profit. That is, in the space of products of the regional air transportation market that make up the regional route network R^l , each j -th airline has production sets Y_j , which represent the entire set of regional routes of the airline in question, and only some of them are the set $\eta_j(p)$, bringing airline profit at price level p . This price system p , maximising the airline's profit, constitutes the set T'_j . That is, the regional route network of each airline includes obviously profitable and unprofitable routes.

Let us consider the profit function of the j -th airline. The profit function of the j -th airline is a function π_j on the set of prices p ($\pi_j(p)$), for which there is a maximum profit in the price system p from the set of prices of regional routes T'_j within the regional route network R^l . Mathematically, this means that a maximum profit exists in a given price system p for $j = 1, \dots, n$, if $p \in \bigcap_{j=1}^n T'_j$, and the function π from $\bigcap_{j=1}^n T'_j$ is a function of total profit.

The analysis of the structure of the Russian air transportation market shows that this market is currently highly concentrated. Pic. 3 presents data on the value of the Herfindahl-Hirschman index (HHI), the values of which were calculated both for individual airlines and for airline alliances using panel statistics on the number of passengers carried in 2014–2021.

As can be seen from Pic. 3, currently there is a high concentration in the Russian market for air passenger transportation, which reduces the level of market competition. An analysis of the dynamics of structural changes in market segments shows that the number of airlines

offering routes at the local, regional and interregional levels, with non-constrained passenger traffic, is clearly insufficient under the current conditions.

The models proposed above for describing the main participants in the air transportation market allow us to form a single model of the system of relations between them as a description of the general state of the regional air transportation market E . Let each consumer be characterised by a consumer set X_p and each manufacturer – by a production set Y_j . Moreover, the specific actions of economic agents – consumers and airlines – determine the current state of the regional air transportation market E .

Then, to describe the state of the market E , it is necessary to use a set of elements (x_p, y_j) in the space R^l , of size $(m + n)$. Let any element $(x-y)$ describing the result of pairwise interaction of all agents be pure demand. By definition, net demand $x-y$ is an element of the set $X-Y$. Then excess demand is the actual excess of the net aggregate demand of all agents over the resources of the regional air transportation market $(x-y-\psi)$, which is denoted by z . Excess demand constitutes set Z .

By market equilibrium we will understand the state of the regional air transportation market when excess demand is equal to 0. From the definition of equilibrium, it is clear that the net demand of all agents corresponds to the total resources, that is: $x-y = \psi$. Moreover, the state of market equilibrium, by definition, is not unique.

For example, any specific state (x_p, y_j) of the economy E of the regional air transportation market is acceptable if there is an infinitely large set of combinations of demand for regional routes, a desired price system has been

established, there are no consumer budget constraints, regional routes have been developed that can be operated by the airline in the desired price system at absence of excess demand. Let us denote the set of market equilibria of the economy E of the regional air transportation market by M .

The manufacturer of the product in the regional air transportation market is the airline. Each airline has beneficiaries interested in making a profit in proportion to the airline's share of capital ownership. Then δ_j is the share of capital of the j -th airline owned by a specific beneficiary.

Accordingly, the profit shares of the j -th airline can be written as $\delta_1, \dots, \delta_n$, where $j \in [1, n]$, and δ_j are real numbers ($\delta_j \geq 0$, $\sum_{j=1}^n \delta_j = 1$ for each j). The symbol j in share δ refers it to a specific airline but does not identify the owners of the capital. The profit function of the j -th airline was described earlier. The profit arising in the economy E of the regional air transportation market is the sum of all products of the profit of the j -th airline by the share of δ_j : $\sum_{j=1}^n \delta_j * \pi_j(p)$. The profit of the j -th airline is always contained in the budget of the i -th consumer. Therefore, the mathematical description of the budget of the i -th consumer is as follows:

$$w_i = p * \psi_i + \sum_{j=1}^n \delta_j * \pi_j(p).$$

We believe that in the established price system, in the process of the consumer choosing the offer of the j -th airline (x_j, y_j), the budget constraint will have the form of a non-strict inequality:

$$p * x_i \leq p * \psi_i + \sum_{j=1}^n \delta_j * p * y_j \text{ for each } i.$$

Summing for all i , we get:

$$p * x \leq p * \psi + p * y.$$

Here the economic meaning of equilibrium in the regional air transportation market becomes clear, which is the goal of managing the industry on any scale. In our opinion, the task of regulation is to balance the elements p_i of the set of prices P_i of the consumer and the elements p_j of the set of prices P_j of the airline. Then the target control function is to minimise the difference between the sets P_j and P_i , that is, to eliminate the complement of the set P_i to the set P_j , which is denoted by L_{ji} :

$$L_{ji} = P_j / P_i = \{p_j \in P_j \mid p_j \notin P_i\}.$$

In fact, air travel promotions at any market size are deliberate actions by decision makers to increase demand by increasing market resources, decreasing budget constraints, and reducing airline entry costs.

CONCLUSIONS

The economy of the regional air transportation market E is closed in nature, therefore, if the conditions described above are met, a market equilibrium can be ensured that is beneficial for all market participants. It is necessary to ensure a situation where consumer demand is satisfied from a set of regional routes, there is always a specific regional route feasible for air travel, the airline provides a regional route from its production plan.

In the absence of excess demand, the establishment of market equilibrium is the result of the choice of a pairwise connection by both agents of the regional air transportation market. Therefore, the price system must be such that both economic agents of the market do not strive to make a different choice. Equilibrium is achievable if, under the chosen price system, no consumer can change the transportation budget without increasing its costs, and no airline can increase its profit.

On an intuitive level, it is clear that if the consumer's budget for air transportation on a regional route is exceeded, it is necessary to introduce a regulatory mechanism to compensate for the airline's losses. It is this conclusion that is fundamental when considering the economics of the regional air transportation market in a quasi-open private property economy.

REFERENCES

1. Aladyev, A. A. Global air transportation market: current state, trends, history and development prospects [*Mirovoi ryok aviaperevozok: sovremennoe sostoyanie, tendentsii, istoriya i perspektivy razvitiya*]. *Colloquium-Journal*, 2019, Iss. 13–10 (37), pp. 220–222. EDN: AORPGF.
2. Gubenko, A. V., Rastova, Yu. I., Pankratova, A. R. Current state and prospects for development of the passenger air transportation market in Russia [*Sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya rynka passazhirskikh aviaperevozok v Rossii*]. *Scientific journal of NRU ITMO. Series: Economics and environmental management*, 2019, Iss. 2, pp. 82–90. EDN: KLMXDX.
3. Klochkov, V. V., Rozhdestvenskaya, S. M. Analysis of the prerequisites for formation of markets for supersonic passenger air transportation and aircraft [*Analiz predposylok formirovaniya rynkov sverkhzvukovykh passazhirskikh aviaperevozok i samoletov*]. *Innovatsii*, 2019, Iss. 8 (250), pp. 60–66. EDN: OMXZSV.
4. Stradomsky, O. Yu., Samoilov, I. A., Lesnichiy, I. V. [et al]. Monitoring of the air transportation market and aircraft fleet of Russian airlines [*Monitoring rynka aviaperevozok i parka vozdukhnykh sudov rossiiskikh aviakompanii*]. *Scientific Bulletin of the State Research Institute of Civil Aviation*, 2020, Iss. 32, pp. 17–28. EDN: YREDOE.
5. Nikolishvili, D. Z. International air transportation market in the global economic system [*Mezhdunarodniy ryok aviaperevozok v globalnoi ekonomicheskoi sisteme*]. *Informatsiya i innovatsii*, 2022, Vol. 17, Iss. 1, pp. 38–43. EDN: ZVOMLS.



6. Orlova, L. V., Gimatdinova, E. M., Kondratskiy, E. O. Analysis of the consequences of the COVID-19 pandemic on the state of the global air transportation market [Analiz posledstviy pandemii COVID-19 na sostoyanie mirovogo rynka aviaperevozok]. *Trends in development of science and education*, 2020, Iss. 67–4, pp. 137–140. EDN: AOOUNN.
7. Belenov, O. N., Shurchkova, Yu. V. Features of the comprehensive marketing in the international passenger air transportation market [Osobennosti kompleksa marketinga na mezhdunarodnom rynke passazhirskikh aviaperevozok]. *Bulletin of Voronezh State University. Series: Economics and management*, 2020, Iss. 1, pp. 141–148. EDN: LHRQMD.
8. Vanzhula, A. V. Prospects for development of low-cost airlines in the Russian air transportation market [Perspektivy razvitiya loukosterov na rossiiskom rynke aviaperevozok]. In: *Gagarin Readings – 2020: Collection of abstracts of reports, Moscow, December 27, 2019 – April 17, 2020*. Moscow, MAI (national research university), 2020, pp. 1392–1394. EDN: ZGTDNO.
9. Guseva, V. I., Aidarova, K. R. Competition in the market of passenger air transportation services in the Kyrgyz Republic at the present stage [Konkurentsii na rynke uslug passazhirskikh aviaperevozok v Kyrgyzskoi Respublike na sovremennom etape]. *Bulletin of Kyrgyz-Russian Slavic University*, 2020, Vol. 20, Iss. 7, pp. 16–20. EDN: OKUORK.
10. Kulikova, O. M., Pak, V. V. Analysis of the Russian passenger air transportation market [Analiz rynka passazhirskikh aviaperevozok Rossii]. *Innovative economics: prospects for development and improvement*, 2020, Iss. 8 (50), pp. 56–61. EDN: KCZXKZ.
11. Rublev, V. V. Prospects for the development of the market for low-cost passenger air transportation in the Republic of Kazakhstan [Perspektivy razvitiya rynka byudzhetnykh passazhirskikh aviaperevozok v Respublike Kazakhstan]. *Bulletin of Astrakhan State Technical University. Series: Economics*, 2020, Iss. 2, pp. 70–80. EDN: JATSBW.
12. Kharchenko, O. A., Shumovskaya, N. E. Trends in development of the world market for international air transportation [Tendentsii razvitiya mirovogo rynka mezhdunarodnykh aviaperevozok]. *Research. Innovation. Practice*, 2022, Iss. 5 (5), pp. 32–36. EDN: TAEUWE.
13. Makashin, A. E. Trends in development of business aviation services in the modern Russian air transportation market [Tendentsii razvitiya servisnykh uslug sfery biznes-aviatsii na sovremennom rossiiskom rynke aviaperevozok]. *Molodoi ucheniy*, 2021, Iss. 6 (348), pp. 347–348. EDN: RLZUTL.
14. Perevoznyuk, S. V., Sharaborina, A. D. Models and methods for researching the Russian market of international passenger air transportation [Modeli i metody issledovaniya rossiiskogo rynka mezhdunarodnykh passazhirskikh aviaperevozok]. *Scientific electronic journal Meridian*, 2020, Iss. 9 (43), pp. 571–573. EDN: QBFWWK.
15. Saranin, I. I. Pricing in the air transportation market [Tsenoobrazovanie na rynke aviaperevozok]. *Research Center «Technical Innovations»*, 2022, Iss. 9–1, pp. 188–191. EDN: GEJLHK.
16. Safronchuk, M. V., Vikulova, D. A. Price discrimination and pricing methods in the passenger air transportation market [Tsenovaya diskriminatsiya i metody tsenoobrazovaniya na rynke passazhirskikh aviaperevozok]. *Economics and management: problems, solutions*, 2019, Vol. 9, Iss. 1, pp. 4–9. EDN: ASZIWO.
17. Sklyar, A. I., Kupryukhin, A. A. Factors influencing the current state of the air cargo transportation market [Faktory, vliyayushchie na sovremennoe sostoyanie rynka gruzovykh aviaperevozok]. *Current issues of modern economics*, 2022, Iss. 4, pp. 33–39. EDN: OJDXAU.
18. Skryleva, E. V. On discrete competition in the Russian passenger air transportation market [O diskretnoi konkurentsii na rossiiskom rynke passazhirskikh aviaperevozok]. *Transportnoe delo Rossii*, 2019, Iss. 1, pp. 231–233. EDN: YSWDQK.
19. Yaskevich, D. I., Karlova, T. V. Analysis of statistical data on the quality of air transportation in the Russian Federation and prospects for their development in logistics markets [Analiz statisticheskikh dannykh po kachestvu aviaperevozok v RF i perspektiv ikh razvitiya na logisticheskikh rynkakh]. *Quality. Innovation. Education*, 2019, Iss. 3 (161), pp. 51–57. EDN: KFWWMQ.
20. Matyukha, S. V. Development of a regional air transportation market model: regulatory impact of the state [Razvitie modeli rynka regionalnykh aviaperevozok: regulatorynoe vozdeistvie gosudarstva]. *Creative Economy*, 2023, Vol. 17, Iss. 1, pp. 257–276. EDN: SBJOWQ.
21. Matyukha, S. V. Formation of an organizational and economic mechanism for development of regional aviation in Russia. D.Sc. (Economics) thesis [Formirovaniye organizatsionno – ekonomicheskogo mekhanizma razvitiya regionalnoi aviatsii Rossii. Diss....dokt.ekon.nauk]. Moscow, State University of Management, 2023, 311 p. [Electronic resource]: https://guu.ru/files/dissertations/2023/02/matyuha_s_v/dissertation.pdf. Last accessed 25.06.2023.
22. Bandurin, A. V., Shilin, A. N., Dyakov, M. M. Passenger transport in densely populated cities: problems, limitations and solutions [Passazhirskiy transport v gustomasennykh gorodakh: problemy, ogranicheniya i resheniya]. *Transportnoe delo Rossii*, 2014, Iss. 1, pp. 191–194. EDN: SDVTDZ.
23. Haiman, D. N. Modern microeconomics: analysis and application [Sovremennaya mikroekonomika: analiz i primeneniye]. In 2 Vol. Vol.1. Moscow, Finansy i statistika, 1992, 362 p. ISBN 5-279-01135-5.
24. Balashov, V. V., Smirnov, A. V. Model for assessing demand for passenger air transportation paid by passengers from their own funds [Model otsenki sprosa na passazhirskie aviaperevozki, oplachivaemie passazhirami iz sobstvennykh sredstv]. *Scientific Bulletin of Moscow State Technical University of Civil Aviation*, 2006, Iss. 104, pp. 24–31. EDN: KPHDBX.

Information about the authors:

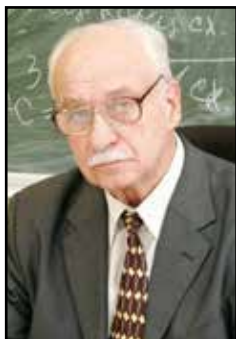
Bandurin, Alexander V., D.Sc. (Economics), Professor at the Faculty of Social Sciences and Mass Communications of the Department of Psychology and Human Capital Development of the Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russia, abander@mail.ru.

Matyukha, Sergey V., Ph.D. (Chemistry), Associate Professor at the department of Economics and Management of ANO HE «International Institute of Management and Law», Moscow, Russia, m-83@bk.ru.

Article received 14.04.2023, updated 05.10.2023, approved 21.11.2023, accepted 22.11.2023.



Increasing the Capacity of a Locomotive Depot by Prioritising Organisational and Technical Measures



Georgy V. GOGRICHIANI



Natalia V. KORNIENKO

Georgy V. Gogrichiani¹, Natalia V. Kornienko²

^{1,2} JSC Scientific Research Institute of Railway
Transport (JSC VNIIZhT), Moscow, Russia.

¹ ORCID 0000-0001-8586-8068; Russian Science
Citation Index Author ID: 762111.

² ORCID 0000-0002-1375-2071; Russian Science
Citation Index Author ID: 1080941.

✉ ² kemcity78@mail.ru.

ABSTRACT

One of the key elements affecting the capacity of the technical station with locomotive turnover points and the entire segment of railway network is an insufficient technical equipment of locomotive maintenance points (LMP), which is a «threshold» that prevents the stability of loaded trains' traffic.

To eliminate such threshold in a particular depot and the losses associated with unproductive downtime of transiting trains, as well as to increase the efficiency of LMP operation, it is necessary to provide for a series of organisational and technical measures. Such measures may be numerous and the task to determine their priority becomes rather difficult. This complexity is explained through different significance (impact on the process) and differentiated dimensions of the criteria necessary to make decision on correct prioritisation once those criteria are compared.

The article proposes to use a special method, tested on a wide variety of practical problems, which allows selecting the best solution from the options under consideration or determining their priority (usefulness) to increase the capacity of a locomotive depot without

limiting the number of decision-making criteria when considering possible organisational and technical measures.

The work proposes most promising sequence of the organisational and technical measures to be considered to improve the efficiency of LMP using the method of expert assessments based on multi-criteria assessment, which involves the information necessary to solve the problem, converting it into a dimensionless form, which allows operating the corresponding initial data regardless of their size. The transformation of information is carried out according to a deterministic algorithm and does not depend on the person that makes computations, which indicates the objectivity of the obtained result of solving the problem.

The proposed method for selecting the best option from those considered, as well as for choosing the sequence of their implementation, can also be used to solve similar problems in the absence or insufficiency of statistical data without carrying out complex economic calculations.

Keywords: railways, freight train traffic, segment of railway network, significance factor, method of expert assessments, locomotive depot's capacity, locomotive maintenance point, LMP performance.

For citation: Gogrichiani, G. V., Kornienko, N. V. Increasing the Capacity of a Locomotive Depot by Prioritising Organisational and Technical Measures. World of Transport and Transportation, 2023, Vol. 21, Iss. 6 (109), pp. 261–267. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-6-11>.

**The text of the article originally written in Russian is published in the first part of the issue.
Текст статьи на русском языке публикуется в первой части данного выпуска.**

INTRODUCTION

In modern conditions, traffic control on Russian railways is characterised by a transition from regional principles of organising operational work to technology based on the traffic control over dedicated segments of railway network [«polygon technology»]. However, in practice, it is not always possible to fully implement the principle of end-to-end control because of constraints on capacity of railway lines due to the presence of bottlenecks, which, among other things, are the stations where electrical systems change. From the point of view of traction services, the Russian railway network is a sort of «patchwork quilt», at the junctions of which there are currently 25 technical stations where types of electric current change, or thresholds that limit movement of loaded trains' traffic.

Stations where types of electric current change are also stations where locomotives intended for circulation at certain sections also change. One of the so called «indicators» that determine the insufficient capacity of the station and of the entire segment of railway network, is the insufficient technical equipment of the locomotive maintenance point (LMP).

A LMP at technical stations is a system of mass maintenance of locomotives. The available capacity of the locomotive circulation area is determined among other kinds of equipment by availability of spots for performing technical maintenance of TO-2 type [further referred to as TM-2]. The size of the locomotive fleet is inextricably linked with the capacity of devices available in the depot.

The *objective* of the work is to develop solutions to increase the capacity of the locomotive depot, which, as is well known in railway transport, is one of the main possible conditions of increase in transportation productivity. The theory on which the solution to the problem is based refers to the theory of decision making that is widely used in world practice. At JSC «VNIIZhT» this theory is successfully used to solve practical problems in many areas [1–4].

MATERIALS AND METHODS

The authors use the method of expert assessments based on multi-criteria assessment and involvement of experts. The method is based on their opinion regarding the task at hand and the use of decision-making criteria.

The essence of the problem is based on mathematical processing of the values of decision criteria.

RESULTS

Identification of the Limiting Element

The circulation of locomotives at a technical station «includes such elements as «from arrival to control post (CP)», «from CP to TM-2», «carrying out TM-2», «from TM-2 to CP» and «from CP to departure»» [5]. As a rule, according to statistical data, the circulation of a locomotive at a station is limited by such an element as «from CP to TM-2», where the average statistical value of waiting for the locomotive to be moved to the inspection pit is more than one hour. This is mainly due to the insufficient track development of LMP (insufficient number of tracks for carrying out TM-2 of locomotives and their low capacity) and insufficient number of spots for carrying out TM-2.

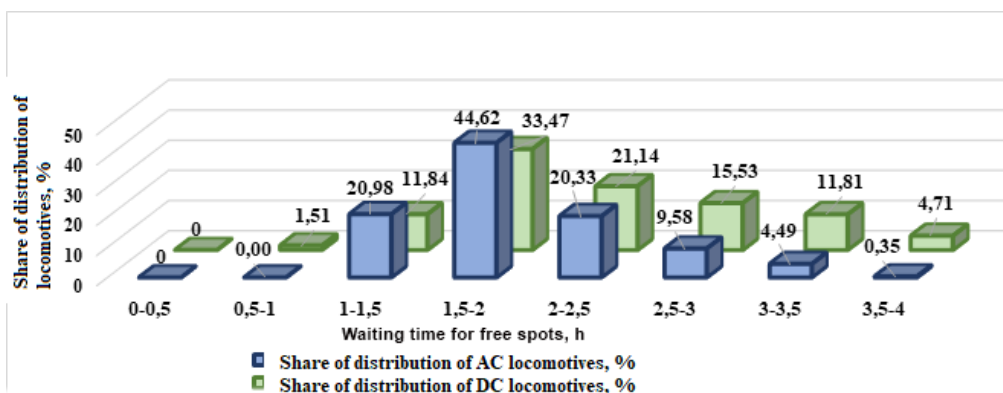
The research conducted by the authors allows us to assert (Karymskaya station of Trans-Baikal Railway, Babaevo station of Oktyabrskaya Railway) that at technical stations one of the «indicators» that determine the insufficient capacity of a station or a segment of railway network is the insufficient technical equipment of LMP.

According to statistics [5], in 2017 at Karymskaya station, 73,53 % of electric locomotives waited more than 0,5 hours for free maintenance spots, and 45,2 % of locomotives waited more than one hour. The average downtime of electric locomotives during the period under review was one hour. At Babaevo station, at the end of 2020, the share of electric locomotives arriving with trains and subject to TM-2 is 30 %, while the share of such an element as the passage by a locomotive of the control point before moving to inspection pit for TM-2 in the overall circulation of a locomotive at the station is 40 % (Pic. 1).

According to the analysis, for most of both electric AC and DC locomotives waiting time for free spots for TM-2 starts from one hour or more, while the waiting time for DC locomotives is longer and is from two to four hours.

Selection of Organisational and Technical Measures

To eliminate losses associated with unproductive downtime of transiting trains without processing while waiting for the train



Pic. 1. Analysis of downtime of DC and AC locomotives on the stage from CP to TM-2 at Babaevo station, 2020 [performed by the authors].

locomotive and delays of trains at the approaches to the station due to locomotives waiting for free TM-2 spots, as well as to increase the efficiency of LMP operation, it is advisable to provide for the following organisational and technical measures R:

1. To increase the number of inspection pits R_1 on existing LMP tracks.

2. To increase the number of tracks and inspection pits R_2 on the territory of LMP.

3. If it is impossible to develop the existing LMP territory, to consider options to place LMP with a more technically developed track system directly at the train arrival/departure yards to reduce the loss of time associated with movement of locomotives to the depot territory – R_3 .

4. To switch from rigid specialisation of inspection pits to «floating, flexible» specialisation and technology (any AC or DC locomotive of any series can use any of the pits) – R_4 .

5. To switch from rigid specialisation of inspection pits to «floating, flexible» specialisation due to the transition to dual-system electric locomotives – R_5 .

6. To stipulate a minimum fixed time for occupation of maintenance and repair spots (revision of existing time standards) – R_6 .

7. Reduction of standard time for maintenance of locomotives by increasing the number of employees (staff) of LMP – R_7 .

The proposed measures will increase the capacity of locomotive depots located at technical stations of cargo-intensive sections of the Russian Railways network, which, in turn, will lead to an increase in the capacity of the stations themselves and the adjacent railway sections by reducing the time spent by loaded trains ready for departure (transit without

processing) while waiting for the train locomotive, as well as to an increase in speed on the sections at the approaches to technical stations.

To solve the problem and to determine the best organisational and technical measures, decision-making criteria K were adopted [6; 8]:

1. Percentage of increase in the capacity of technical station, K_1 – the higher is the percentage, the better.

2. Percentage of increase in the capacity of railway sections adjacent to the technical stations, K_2 – the higher is the percentage, the better.

3. Percentage of reduction in idle time of trains ready to depart while waiting for train locomotive, K_3 – the higher is the percentage, the better.

4. Percentage of reduction in the required working fleet of locomotives, K_4 – the higher is the percentage, the better.

5. Percentage of reduction in the number of locomotives reserved for technological reasons, K_5 – the higher is the percentage, the better.

6. Percentage of reduction in duration of works, K_6 – the higher is the percentage, the better.

7. Economic effect, K_7 , mln rub. /year – the higher, the better.

8. Cost of work, K_8 , mln rub. – the less, the better.

9. Costs associated with completed organisational and technical measures, K_9 , mln rub. /year – the less, the better.

Decision-making criteria are proposed by qualified specialists (in this case, by experts).

An example of numerical values of criteria $K_1, \dots, K_9$ for making a decision for each of the activities $R_1, \dots, R_7$ is given in Table 1.



Table 1

Decision-making criteria values [performed by the authors]

Criteria	Organisational and technical measures						
	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	R ₅	R ₆	R ₇
K ₁ , %	15	25	10	25	30	20	25
K ₂ , %	15	25	10	25	30	20	25
K ₃ , %	15	25	10	25	30	20	25
K ₄ , %	10	20	10	10	20	15	20
K ₅ , %	10	20	5	10	20	15	20
K ₆ , %	0	0	0	0	0	20	30
K ₇ , mln rub. /year	1	1,5	1,5	0,8	1	0,9	1
K ₈ , mln rub.	0,5	0,8	3	0,3	3	0,2	0
K ₉ , mln rub. /year	0,5	0,8	0	0	1	0,2	1

Prioritisation of Organisational and Technical Measures with the Method of Expert Assessments

According to the data in Table 1, it is advisable to give an assessment of the significance (importance for the process under consideration) of each K_i indicator (that is, to give a score ranking from 1 to 7 to each indicator separately for each horizontal line).

This process consists of four stages:

First stage

According to the digital values of the decision-making criteria indicated in Table 1, we determine the places of the measures under consideration from 1 to 7 (Table 2), with the best location corresponding to a larger number. The process of assigning places begins with a higher number (in our case, 7). In a particular case, within the same criterion, places for different measures may coincide.

In Table 2 places of measures $R_1... R_5$ according to criterion K_6 (percentage of reduction in work duration) are marked with the lowest figure due to the complete absence of this reduction.

Second stage

Let us clarify the results obtained by using linear interpolation (we will determine the refined locations of each measure according to specific criteria). «Linear interpolation is the simplest and most commonly used type of interpolation. It consists in the fact that given points with coordinates x_i, y_i for $i = 0, 1, 2, \dots, n$ are connected by straight line segments, and the function $y(x)$ can be approximately represented as a broken line. The equations of each segment of the broken line are generally different. Since there are n

intervals (x_{i-1}, x_i) , then for each of them the equation of a straight line passing through two points is used as the equation of the interpolation polynomial: for the i -th interval, in general, it is possible to write the equation of a straight line passing through the points (x_{i-1}, y_{i-1}) and (x_i, y_i) » [9]:

$$\frac{y - y_{i-1}}{y_i - y_{i-1}} = \frac{x - x_{i-1}}{x_i - x_{i-1}}. \quad (1)$$

In the case under consideration, we take that $x, x_i, x_{i-1} \rightarrow \mu, \mu_i, \mu_{i-1}$, где μ, μ_i, μ_{i-1} – places of the criterion K_i .

In this case μ – the place being specified, μ_i, μ_{i-1} – the highest and the lowest places, respectively, $y, y_i, y_{i-1} \rightarrow h$, where h, h_i, h_{i-1} – values of the criterion K_i . In this case h – value of the criterion K_i for the specified place, h_i, h_{i-1} – values of the criterion K_i for the highest and the lowest places, respectively.

Let us determine the specified places for R of each of the criteria.

For example, here we will clarify the places for criterion K_7 (economic effect) when increasing number of inspection pits on existing LMP tracks (R_7). When carrying out calculations, clarification of the lowest and highest places is not required, all other intermediate places are clarified, then formula (1) for the case under consideration takes the following form:

$$\frac{h_i - h_7}{h_7 - h_7^1} = \frac{\mu_i - \mu_7^1}{\mu_7^2 - \mu_7^1}. \quad (2)$$

With an increase in the number of inspection pits on existing tracks of LMP (R_7) the criterion K_7 has the value $x = \mu_7^1 = 1$ (Table 1), in terms of its significance it is in the 6th place, $y = h_7^1 = 6$ (Table 2).

Values according to Tables 1, 2 for:

- the lowest place $x_{i-1} = \mu_7^4 = 4, y_{i-1} = h_7^4 = 0,8$;
- the highest place $x_i = \mu_7^2 = 7, y_i = h_7^2 = 1,5$.

Table 2

**Distribution of places assigned to measures according to the information in Table 1
[performed by the authors]**

Criteria	Organisational and technical measures						
	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	R ₅	R ₆	R ₇
K ₁	4	6	3	6	7	5	6
K ₂	4	6	3	6	7	5	6
K ₃	4	6	3	6	7	5	6
K ₄	5	7	5	5	7	6	7
K ₅	5	7	4	5	7	6	7
K ₆	0	0	0	0	0	6	7
K ₇	6	7	7	4	6	5	6
K ₈	4	3	2	5	2	6	7
K ₉	5	4	7	7	3	6	3

Table 3

**Refined distribution of the proposed criteria for selecting the most promising option of
organisational and technical measures in order of significance (specified places)
[performed by the authors]**

Criteria	Organisational and technical measures						
	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	R ₅	R ₆	R ₇
K ₁	4	6	3	6	7	5	6
K ₂	4	6	3	6	7	5	6
K ₃	4	6	3	6	7	5	6
K ₄	5	7	5	5	7	6	7
K ₅	5	7	4	5	7	6	7
K ₆	0	0	0	0	0	6	7
K ₇	4,86	7	7	4	4,86	4,43	4,86
K ₈	6,17	5,67	2	6,50	2	6,67	7
K ₉	5	3,8	7	7	3	6,2	3

Then $\frac{1-0,8}{1,5-0,8} = \frac{\mu_7^1-4}{7-4}$, where $\mu_7^1 = 4,86$.

Thus, we find that criterion K_7 during performing the organisational and technical measure R_i for its significance will be located not in the 6th place, but in the 4,86th place. Similarly, we clarify the places for each of the criteria under consideration and summarise the results in the Table 3. To more strictly determine the specified places, we do not round the obtained values, but leave them with the numbers after the decimal point¹.

Third stage

It is necessary to determine the significance factor for each criterion based on expert assessments. «The expert approach allows us to solve problems that cannot be solved in a conventional analytical way, including:

¹ To more accurately distribute places of measures, it is possible to use a nonlinear approximation (Lagrange polynomial). The refinement regarding the examples given can reach 2–2,5 %.

- choosing the best solution option among the available ones;
- searching for possible solutions to complex problems;
- receiving recommendations from specialists with knowledge and experience in a certain field» [9].

To solve the problem, independent experts in the field of the issue under study are involved (an odd number of people). «The members of the expert group are unknown to each other; interaction between group members when filling out questionnaires is completely excluded. Experts must have experience in areas relevant to the tasks being solved. When selecting experts, in general, one should consider the moment of personal interest, which can become a significant obstacle to obtaining an objective judgment» [9; 10]. This problem is not considered in this work.

Methods for obtaining individual opinions of members of an expert group are based on



Table 4

Criteria significance factors (0–1) [performed by the authors]

	K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	K_6	K_7	K_8	K_9
Expert 1	1	1	0,5	0,5	0,1	0,2	0,3	0,5	0,3
Expert 2	1	0,9	0,8	0,8	0,2	0,3	0,7	0,8	0,6
Expert 3	1	1	0,6	0,6	0,2	0,2	0,7	0,6	0,4
Average value	1	0,97	0,63	0,63	0,17	0,23	0,57	0,63	0,43

obtaining information from experts interviewed independently of each other, with subsequent processing of the received data². The main advantages of the individual expert assessment method are their efficiency, the ability to fully use the individual abilities of the expert, the absence of pressure from authorities and the low cost of expertise³.

Experts are tasked with determining the significance factors of each of the considered decision-making criteria for the most promising option of organisational and technical measures from 0 to 1 (in this case, several criteria can have the same priority, the higher is the value, the better).

Based on this assessment, Table 4 is compiled and the average value of the significance factor is calculated for each of the decision-making criteria [11; 12].

Fourth stage

After obtaining the weighted average value of the significance factor, we once again clarify the distribution of the proposed decision-making criteria to determine the most promising option for organisational and technical

measures according to their priority (specified places) by multiplying the corresponding place of the desired criterion (Table 3) and the resulting weighted average significance factors (Table 4). The results obtained are shown in Table 5.

According to Table 5, by adding the numbers separately for each vertical column, it is possible to obtain the recommended priority for carrying out measures $R_1, \dots, R_7$ according to the criteria $K_1, \dots, K_9$ when solving the problem of increasing the efficiency of LMP. A larger sum of numbers will correspond to the best organisational and technical measure according to a number of criteria under consideration [13–15].

As it can be seen, the best is measure R_7 – reducing the standard time for carrying out cyclic maintenance operations of locomotives by increasing the number of employees (staff) of LMP.

The best option for an organisational and technical measure was obtained by comparing these measures according to a set of criteria, taking into account the significance of these criteria among themselves.

CONCLUSION AND DISCUSSION

The work proposes to determine the most promising sequence of organisational and technical measures under consideration to

Table 5

Refined distribution of proposed decision-making criteria when choosing the most promising option for organisational and technical measures, taking into account the significance factor of the criteria [performed by the authors]

Criteria	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6	R_7
K_1	4,00	6,00	3,00	6,00	7,00	5,00	6,00
K_2	3,88	5,82	2,91	5,82	6,79	4,85	5,82
K_3	2,52	3,78	1,89	3,78	4,41	3,15	3,78
K_4	3,15	4,41	3,15	3,15	4,41	3,78	4,41
K_5	0,85	1,19	0,68	0,85	1,19	1,02	1,19
K_6	0	0	0	0	0	1,38	1,61
K_7	2,77	3,99	3,99	2,28	2,77	2,53	2,77
K_8	3,89	3,57	1,26	4,095	1,26	4,20	4,41
K_9	2,15	1,63	3,01	3,01	1,29	2,67	1,29
Sum of values	23,21	30,39	19,89	28,99	29,12	28,58	31,28

increase the LMP capacity using the method of expert assessments when solving a multi-criteria problem.

It should be noted that when solving the problem of increasing the capacity of the locomotive depot, the best measure turned out to be a growth of LMP staff. The obtained result can also be justified by the fact that carrying out other measures, for example, such as increasing the number of inspection pits on existing LMP tracks, increasing the number of tracks and inspection pits on the territory of LMP, etc. require significant financial and time expenditures. Such decisions in conditions of shortage of capacity, especially on cargo-intensive routes, when the issue needs to be resolved «here and now», may not always be rational, which was confirmed by the study.

The proposed method for selecting the best option from those under consideration, as well as the sequence of their rational implementation according to many criteria, based on expert assessments, can be used to solve problems similar in formulation of the question, when it is necessary to obtain an objectively best solution from those under consideration.

REFERENCES

1. Gogrichiani, G. V. Objective determination based on the results of comparisons (tests) of a promising object with an unlimited number of conflicting criteria under consideration [Obektivnoe opredelenie po rezul'tatam sravnenii (ispytanii) perspektivnogo obekta pri neogranichenom mnozhestve rassmatrivaemykh protivorechivyykh kriteriev]. *Vestnik VNIIZhT*, 2006, Iss. 6, pp. 14–15. EDN: HYOKXV.

2. Gogrichiani, G. V., Lyashenko, A. N. Regular method for solving problems of finding the best option from those considered in relation to the transport complex [Regulyarniy metod resheniya zadach po nakhozheniyu luchshego varianta iz rassmatrivaemykh primenitelno k transportnomu kompleksu]. *Proceedings of I International Scientific and Practical Conference «Science 1520 VNIIZhT: Look beyond the horizon»*. Moscow, JSC VNIIZhT, 2021, pp. 83–86. EDN: YFFVLU.

3. Gogrichiani, G. V., Kazarinova, D. A. Selection of a promising anti-skid device from a considered set based on contradictory criteria [Vybor perspektivnogo protivoyuznogo ustroystva iz rassmatrivaemykh po sovopnosty protivorechivyykh kriteriev]. *Vestnik VNIIZhT*, 2014, Iss. 6, pp. 26–32. EDN: TOLHNF.

4. Macheret, D. A., Gogrichiani, G. V., Syrodovets, T. I. Economic and mathematical approach to issues of movement of personnel in railway transport organisations [Ekonomiko-matematicheskiy podkhod k voprosam kadrovyykh peremeshchenii v organizatsiyakh zheleznodorozhnogo transporta]. *Ekonomika zheleznyykh dorog*, 2015, Iss.37, pp. 68–76. EDN: UAECKN.

5. Mekhedov, M. I., Kornienko, N. V. The influence of technical and technological equipment of a locomotive maintenance point on the capacity of a railway line [Vliyaniye tekhnicheskogo i tekhnologicheskogo osnashcheniya punkta tekhnicheskogo obsluzhivaniya lokomotivov na propusknyuyu sposobnost zheleznodorozhnoi linii]. *Vestnik VNIIZhT*, 2021, Vol. 80, Iss. 4, pp. 225–232. EDN: DDAGDB.

6. Kini, R. L., Raifa, H. Decision-Making under Various Criteria: Preferences and Substitutions. [Russian edition] Ed. by I. F. Shakhnov; transl. from English by V. V. Podinovskiy et al. Moscow, Radio i svyaz publ., 1981, 560 p.

7. Kotenko, A. G. Methodology for risk-based planning of quality indicators of railway operational performance. D.Sc. (Eng) thesis [Metodologiya risk-orientirovannogo planirovaniya kachestvennykh pokazatelei ekspluatatsionnoi rabotyi zheleznyykh dorog. Diss...dok.tekh.nauk]. St.Petersburg, PGUPS publ., 2014, 330 p. EDN: ZPKMED.

8. Kotenko, A. G. On approaches to reducing the computational complexity of logical problems of risk analysis [O podkhodakh k snizheniyu vychislitel'noy slozhnosti logicheskikh zadach analiza riska]. *News of St. Petersburg State Transport University*, 2011, Iss. 1 (26), pp. 180–188. EDN: NTZCGJ.

9. Danelyan, T. Ya. Formal methods of expert assessments [Formal'nye metody ekspertnykh otsenok]. *Economics, statistics and computer science*, 2015, Iss. 1, pp. 183–187. EDN: TQJPJL.

10. Orlov, A. I. Expert assessments [Ekspertnye otsenki]. *Zavodskaya laboratoriya*, 1996, Vol. 62, Iss. 1, pp. 54–60. [Electronic resource]: <http://orlovs.pp.ru/stat/s3p8exp.zip>. Last accessed 25.04.2023.

11. Emelyanov, S. V., Larionov, O. I. Multicriteria methods of decision making [Mnogokriterialnye metody prinyatiya reshenii]. Moscow, Znanie publ., 1985, 32 p.

12. Larichev, O. I. Decision making as a scientific area: methodological problems. Systems research. Methodological problems. Yearbook [Prinyatie reshenii kak nauchnoye napravlenie: metodologicheskie problemy. Sistemnye issledovaniya. Metodologicheskie problemy. Ezhegodnik]. Ed. by D. M. Gvishiani, V. N. Sadovsky. Moscow, Nauka publ., Iss. 14, 1982, pp. 227–243. [Electronic resource]: https://raai.robofob.ru/about/persons/larichev/papers/text/Larichev_1982.pdf. Last accessed 25.04.2023.

13. Aven, T. Misconceptions of Risk. John Wiley and sons Inc., 2010, 264 p. ISBN 978-0-470-68388-0.

14. Aven, T. Risk Analysis: Assessing Uncertainties Beyond Expected Values and Probabilities. John Wiley and Sons Inc., 2008, 208 p. ISBN 978-0-470-69443-5.

15. Aven, T., Vinnem, J. E. Risk Management: With Application from the Offshore Petroleum Industry. Springer, 2007, 211 p. ISBN 978-1-84628-652-0.

Information about the authors:
Gogrichiani, Georgy V. D.Sc. (Eng), Senior Researcher at JSC Scientific Research Institute of Railway Transport (JSC VNIIZhT), Moscow, Russia, gogrichiani.g@vniizht.ru.
Kornienko, Natalia V., Leading technologist at the Research Centre of Digital Transportation Models and Energy Saving Technologies of JSC Scientific Research Institute of Railway Transport (JSC VNIIZhT), Moscow, Russia, korniyenko.natalia@vniizht.ru.

Article received 19.05.2023, approved 10.09.2023, accepted 15.09.2023.



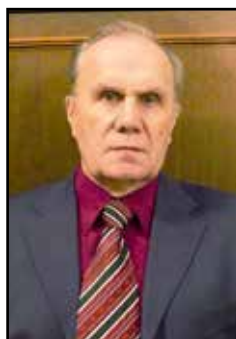
ORIGINAL ARTICLE

DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-6-12>World of Transport and Transportation, 2023,
Vol. 21, Iss. 6 (109), pp. 268–274

Transport Cybersecurity



Evgeny A. NESTEROV



Viktor Ya. TSVETKOV

Evgeny A. Nesterov¹, Viktor Ya. Tsvetkov²^{1,2} Russian University of Transport, Moscow, Russia.¹ ORCID 0009-0009-9100-3410; Web of Science Researcher ID: JUF-4957-2023; Scopus Author ID: 58707809100; Russian Science Citation Index SPIN-code: 9008-0780, Russian Science Citation Index Author ID: 1119794.² ORCID 0000-0003-1359-9799; Web of Science Researcher ID: J-5446-2013; Scopus Author ID: 000313599799; Russian Science Citation Index Author ID: 1399061.✉ ² cvj2@mail.ru.

ABSTRACT

A feature of the digital transformation of the transport industry is the trend to increased number of cyberattacks that are among the information threats. Transport cybersecurity is a broader phenomenon compared to cyberattacks and information security. It includes organisational security and other types of security that are not found purely in the information field.

The relevance of transport cybersecurity is additionally due to the widespread use of information and computer networks and information space. Cyberspace in the transport sector can be interpreted as an aggregate of networks, information space, communication and real environment. The inclusion of real environment in transport cyberspace is a distinctive feature of transport cyberspace.

The growth of information threats occurs regardless of development of transport cyberspace. It is due to digitalisation of

society, including the transport sector. Cyberspace creates the preconditions for cyberthreats of a new quality, and for new cyberthreats, previous methods of information security become ineffective. The emergence of information threats is dictated not so much by digitalisation, but rather by the openness of information and communication technology. Multimodal transportation as a relationship between many organisations also contributes to the growth of cyberthreats and a decrease in information security.

The article provides an analysis of the state and approaches used in transport cybersecurity based on the review of publications on the topic, suggests a taxonomy of threats and risks to transport cybersecurity, introduces the concepts of «railway information» and «transport information», describes the vulnerabilities of transport cyberspace.

Keywords: transport, transport cyberspace, transport cybersecurity, cyber-physical systems, network systems, digital risks, cyber-physical threats.

For citation: Nesterov, E. A., Tsvetkov, V. Ya. Transport Cybersecurity. World of Transport and Transportation, 2023, Vol. 21, Iss. 6 (109), pp. 268–274. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-6-12>.

The text of the article originally written in Russian is published in the first part of the issue.
Текст статьи на русском языке публикуется в первой части данного выпуска.

INTRODUCTION

Digitalisation is transforming railways around the world. One of the features of digital transformation of any industry, including railways, is increased susceptibility to cyberattacks [1–3]. The railway industry is vulnerable to such attacks because of the growing number of digital elements, as well as of interfaces between digital and physical components in railway systems. The increase in the number of elements and interfaces requires new structures, concepts and architectures to ensure the resilience of the railway system to cybersecurity challenges such as lack of proactiveness, lack of a holistic approach and aging security systems exposed to future cyberthreats.

Railway transport is an important industry. Currently, in the field of transport, there is cyberspace as an industrial cluster, including integration of information systems, intelligent transport systems, Internet of Things technology, transport cyber-physical systems, telecommunication networks, digital railway [4] and so on. A transport cybersecurity breach can create many critical situations. Modern transport systems do not operate in isolation but use different networks to improve business processes. These developments have as consequences an increased exposure to cyber threats.

The *objective* of the study offered in the article was the analysis of the state of transport cybersecurity and of the applied approaches, described in research papers, of taxonomy of threats and risks to transport cybersecurity, of vulnerabilities of transport cyberspace.

RESULTS

Causes of Cyberthreats

Railway cyberspace includes communication lines and access points, as well as transport control points. Corporate business is widely practiced in railway transport. This is especially noticeable in multimodal transportation. Many organisations and individuals are involved in this business. Many participants in a corporate business create multiple connections in which there are many access points. Connections grow in cubic progression. Connections and access points create the opportunity for unauthorised persons to access cyberspace, that is, it creates cyberthreats. These threats should be classified as external threats.

In addition, a large number of different software programs operate in cyberspace, which

are not always properly coordinated. Software mismatch creates additional threats proportional to the size of the network in cyberspace. The specifics of communications in transport require the introduction of the concept of «transport information». In the field of railway transport, transport information (TI) becomes railway information (RI). This information is divided into control and descriptive RI. Unauthorised access to any of this information poses a threat.

An additional source of cyberthreats are organisational or regulatory threats. Many regulatory documents of different industries and organisations are not fully harmonised. Mismatch of regulatory documentation serves as a source of internal threats to functioning of the transport system. The peculiarity of TI and RI is that they are organised into blocks that have the property of integrity and consistency. Possible violation of information integrity also poses a threat. Thus, regulations, communication lines, access points, and information blocks create external and internal cyberthreats.

Railway infrastructure is increasingly moving towards smart and cyber-physical systems, which creates new risks and opportunities for cybercrime.

There are problems in operation of transport infrastructure, problems referring to Big data [5] have their own specifics regarding railways [6], law on transport cybersecurity is missing.

Measures to counteract cyberattacks on railway transport are under development. There is an ongoing process of systematising the risks and their consequences that should be avoided. For instance, these risks are systematised in [7]. From the standpoint of categorical analysis, the concept of risk category or risk categories can be introduced. Risk categories comprise traffic delays; «anthropentropy»; collisions; track damage; acts of terrorism; human casualties; man-made factors; loss of competitiveness; leakage of valuable information.

Abnormal situations periodically occur at transport infrastructure facilities, some of which are described in [1]. These cases are due to development of IT technologies and to a possibility of intentional or unintentional access to communication channels and of interference in transport control channels.

At the same time, access to confidential information can be not only direct, but also indirect. For example, information transmitted by email is open at no less than seven points at



different transmission nodes. Here we should note such a threat as the transfer of proprietary information or information about proprietary information in personal email messages. To prevent this threat, for example, in the UK it is prohibited to use business email to transmit personal information or to private addresses of individuals.

Shift2Rail.

The study [8] examined several European projects, devoted to cybersecurity, from the perspective of Shift2Rail.

In the framework of five phases of Shift2Rail project, several work packages have been implemented (IP2 Technical Demonstrators. Advanced Traffic Management and Control Systems¹), the fifth phase been finalised in October 2023.

To improve the security of the cyberspace, standardisation methods and ISO standards are also used. The standardisation method and standards are divided into four groups: international, national, industry and within a specific enterprise.

Dominants in Cybersecurity

Among many security technologies for the cyberspace of transport infrastructure, based on analysis and generalisation, the dominant or most important technologies for the transport industry were identified [10]. These technologies are called security dominants. Among them, we should highlight standard ones, such as access control, and special ones, such as reduction of entry points. In addition, we can note cognitive information technologies such as «handshake» technology, unified security centre technology, etc. [11].

Access control security

Access control security is a fundamental issue for ensuring the security of any control system or technical system. A typical approach to implementing access is to use an access control list (ACL), role-based access control (RBAC) [12], task-based access control (TBAC) [13]. Access control technologies are divided into four categories: team-based (TMAC), spatial [14], cognitive (CAC), context-based (CBAC) [15] access control. Spatial control is associated with

actions in real space and requires organisation of physical protection. TMAC requires communication, information and cryptographic protection. Cognitive access control requires the analysis of cognitive models and the use of cognitive logic. Context-based access control requires the use of semantic analysis and latent analysis of transmitted TI and RI. In addition, for security purposes, client identity authentication, single sign-on methodology, etc. are used. Requirements for access control are summarised in [16].

One method is to use a safe data list. An incorrect safe list creates incorrect access control. This can lead to dangerous scenarios where incorrect data can be used to weaken the security of the infrastructure.

Security of Information Transmission

An important factor in cyberspace is the security of information transmission. Enterprise Service Bus (ESB) technology is used to understand multiple systems sharing data and services on a railway information exchange platform.

Security of Information and Resource Storage

Ensuring reliable storage of information, models and resources is an important task for the security of RI and TI. Databases are a weak link in this problem because they widely use standard query and search methods, and most importantly, standard and simple data structures. Databases are focused on simplicity and accessibility, while security technologies require access restrictions and unique forms of stored information. Cloud processing and cloud storage partially solve this problem. However, the use of cloud and fog technologies complicates the information management structure. This entails an increase in threats to cybersecurity in information management technologies. Simple control technology carries less risk. Complex information management technology carries greater risks and a greater number of emergency situations. The problem is also solved by the technology of specialised data warehouses.

Security management centre [11]

These functions are performed by situation centres. Centralisation of security management is an effective organisational measure that eliminates minor and accidental penetrations of

¹ [Electronic resource]: https://projects.shift2rail.org/s2r_ip_TD_r.aspx?ip=2&td=1bccaf76-7915-4283-8b52-36afdb1bdf42.



confidential information. Situation centres create a single protection system and an easily manageable security system. They allow accumulating experience of threats and penetration attempts. On this basis, with involvement of intelligent systems such as artificial neural networks, unique protection systems are created for each transport infrastructure facility. A centralised security system creates an internal cyberspace security system as a self-organising system. This is very important against the backdrop of constantly growing and changing external threats.

Cybersecurity Threats to Railways

There are several threats associated with railway cybersecurity. The predominant operational challenge for the railway sector is threats to identity, privacy and data systems. The most important ones should be highlighted [2].

Motivated Risks and Threats

This class of threats is not aimed at destroying, damaging or stealing information, but at damaging the reputation of an organisation, corporation, intermediary company, or government. The main reason for a motivated attack on the system is competition, which is aimed at loss of clientele and subsequent damage.

Quite often, these threats use an «agent-based» approach that uses individual and group algorithms. An agent, like a virus, can adapt to its environment and has polyformity, that is, the

ability to change shape when detected. This type of threat is also called «political».

Pragmatic Threats

They involve the use of intermediaries and third parties who may have financial information or information about financial information or information about persons with access to financial information.

Communication threats

They are associated with the weakness of communications and the presence of weak points in them. They include not only the theft of information, but also damage to information and even its substitution to harm technology and transportation.

Data Retrieval

This threat involves the use of attributes of IT technologies for the subsequent illegal use of already important information. This data may be subject to bargaining or blackmail.

Database Threats

A database is an information storage system and an information processing system. Initially, DB were created for a wide range of consumers and their concept was and remains ease of use. There are standard or generic database formats, which greatly simplify access to such systems. A method of protection can be storing data in a DB not in a «pure»



form, but in the form of fragments of structures or in encoded form.

Mirroring and Redundancy

These technologies are neighbouring but have differences. When mirroring, information and information images or clusters are practically cloned. When making a backup (which is also based on copying), it is possible to exclude unimportant information to save physical memory. The weak point of both technologies is that mirrors and backups are not stored with the same care as the original. The security system for copies is usually much weaker than for the original information. Therefore, it is recommended to maintain the same security policy for copies as for the originals.

Server Threats

It is customary to divide servers into main ones and application servers. It is common practice to protect core servers more carefully than application servers. The danger is that through a weakly protected application server it becomes possible to access the main server with valuable information.

Administrators' Threats

This specific type of threat is man-made and is based on the psychological characteristics of any person, which includes a system administrator. Because of this, the type of threats has got this name. The threat is implemented through communication between an attacker and a system administrator under conditions of information uncertainty. The attacker impersonates another person and, in the end, receives a fragment or all the necessary information to enter the protected system. This entry mechanism is acceptable for any security system employee. But administrators represent the greatest information value.

A threat closely related to this one is «emergency» entry. In case of a failure or power failure of the information system, the security system is disabled for seconds. This is enough for attackers to penetrate the system and then log in after the failure is eliminated.

System Violation

The consistency of data and processing algorithms includes completeness, integrity, structure, and complementarity. Security systems prioritise privacy. Secondly, an integrity analysis is carried out. As for data

modification, this is the third priority task. One of the security tools in this part is logging. But it records events, leaving the content of events without attention. It can be noted that many algorithms are an analogue of the system. Many algorithms are modelled after prototype algorithms. Knowing the prototype of an algorithm gives knowledge about the modified algorithm and gives knowledge to modify the current algorithm.

It refers to data as well. Their formats and structure are based on prototypes. Knowing the prototype structure provides knowledge about the current data structure. Thus, modification of the algorithm and modification of the data format entail destructive consequences.

For security systems and the systems they protect, there are a large number of attacks, which are divided into distributed, cognitive and targeted (vector) ones. Systems for repelling attacks are arranged commensurately.

There are groups of stochastic threats. They are most often associated with the influence of the external environment and the stochasticity of the operating environment of the control system or controlled transport system.

Insider threats are similar to malicious acts, but come from within the organisation.

Cybersecurity of Transport Cyber-Physical Systems

Cyber-physical systems comprise among others transport cyber-physical systems (TCPS) [18]. These systems replace ITS and serve as the basis for digital transport management. The increasing use of TCPS to connect various components of the rail industry and increased connectivity through communications technologies have also led to cyberthreats against TCPS. TCPS implementations require that risks be proactively identified, clearly defined, and secured. To improve operational safety and efficiency, an increasing number of physical railway components are connected through various TCPSs via communications, creating a new paradigm of the «Railway Internet of Things». The trend towards TCPS integration has also led to the ever-increasing dependence of the railway industry on cyber- and IoT technologies, which increases the dangers of cyberthreats. The railway industry is exposed to cyber risks inherent in TCPS deployments. Unfortunately, TCPS components provide not only the desired connection, but also opportunities

Table 1

TCPS Threat Taxonomy

Parts of railway cyber-physical system	Possible threats
New generation train control systems (for example, ERTMS, ETCS, PTC, CBTC)	Multiple attacks including electromagnetic interference, jamming, denial of service (DoS), message modification and unauthorised access, etc.
	Brute force attacks, unauthorised network access and message modification
	Passive eavesdropping, active relinquishment of control and taking control
Traditional railway signalling systems	Unauthorised network access, denial of service (DoS) and message modification
	Electromagnetic interference
Balise data transfer	Violation of availability or integrity of data balises [eurobalises], jamming, electromagnetic interference
Railway traction divisions, electric power supply systems	False data injection attacks, message modification and unauthorised network access
Human-machine interface	Multiple attacks including denial of service, message modification, unauthorised access, etc.
Public address (PA) or public information display systems	Unauthorised intrusions
Railway track infrastructure	Both physical and cyber intrusion

for attackers to achieve malicious goals. Table 1 [19] provides a taxonomy of threats to TCPS.

Common cyber technologies [19] are frequently used across industries, and their underlying security designs are well understood through technical iterations and IT research.

CONCLUSION

Cyberspace is interpreted in a narrow and broad sense. In a narrow sense, this is the information space of digital twins and cyber-physical systems, the information space of unmanned vehicles, as well as Internet of Things technology. In a broad sense, cyberspace includes the open networks, and all means of communication associated with management of transport systems, information systems and intelligent systems. For all types of these spaces, there are cyberthreats or threats in cyberspace.

There are several reasons for the rise in cyberthreats. The first reason is the growth of open networks and systems.

The second reason is globalisation, which increases society’s access to technologies and systems.

The third reason is convergence or universalisation. Universal remote controls are produced that control the TV and the vehicle. Smartphones are produced that can not only make telephone calls, but also control the TV and create interference or control a vehicle.

The fourth reason is the increase in volumes of information, which provokes a person to have the opposite reaction to simplify information.

The growing volume of information is not accompanied by the growth of the use and sophistication of passwords as means of protection. It becomes easier for everyone to crack passwords using stereotypes.

The fifth reason is the growing complexity of technical and information systems. This growth also creates a trend towards making such systems easier to work with. Simplifying work entails reducing information security.

The sixth reason is the growth of information asymmetry between the requirements of technical and information systems and the real ability of a person to manage these systems. There is an advance in the growth of the complexity of systems in relation to the growth of the abilities and capabilities of the human manager.

The seventh reason is the growing digital inequality². This is the inequality in IT skills between countries and between people. Some advanced IT specialists oppose themselves to society and commit destructive actions to demonstrate superiority. The digital divide is growing in the «leader–performer» system. As a rule, a manager understands less about IT technologies than an ordinary employee and even less than an expert. This misunderstanding is expressed in the inhibition of innovative IT developments. Such a manager gives preference to simple, but more understandable security

² See, e.g., DiMaggio, P., Hargittai, E. From the ‘Digital Divide’ to ‘Digital Inequality’: Studying Internet Use as Penetration Increases. Princeton University, Woodrow Wilson School of Public and International Affairs, Center for Arts and Cultural Policy Studies, Working Papers. 2001.



systems, without paying attention to their weak security. Such a leader rejects complex and incomprehensible to him, but well-protecting security systems.

The eighth reason is the emergence of cyberspace as a tool for managing an open system.

The ninth reason for the growth of cyberthreats is due to the use of large networks, most of which are open.

There is a growing tendency to differentiate cybersecurity research, rather than writing a general theory. The need to develop an integrated framework for solving many cybersecurity problems remains urgent. Analysis [2] shows that most cybersecurity research conducted on railways is still conceptual in nature and lags in the application of artificial intelligence (AI)-based security. As in other industries, it is very important that railways also follow the latest security technologies,

REFERENCES

1. Thaduri, A., Aljumaili, M., Kour, R., Karim, R. Cybersecurity for eMaintenance in railway infrastructure: risks and consequences. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, 2019, Vol. 10, Iss. 6, pp. 149–159. DOI: 10.1007/s13198-019-00778-w.
2. Kour, R., Thaduri, A., Karim, R. A review on cybersecurity in railways. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 2023, Vol. 237, Iss. 1, pp. 3–20. DOI: 10.1177/09544097221089389.
3. Wang, Z., Liu, X. Cyber security of railway cyber-physical system (CPS) – A risk management methodology. *Communications in Transportation Research*, 2022, Vol. 2, Iss. 4, 100078. <https://doi.org/10.1016/j.commtr.2022.100078>.
4. Lyovin, B. A., Tsvetkov, V. Ya. Digital Railway: Principles and Technologies. *World of Transport and Transportation*, 2018, Vol. 16, Iss. 3 (76), pp. 50–61. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2018-16-3-5>.
5. Lyovin, B. A., Tsvetkov, V. Ya. Information Processes in Big Data Environment. *World of Transport and Transportation*, 2017, Vol. 15, Iss. 6 (73), pp. 20–30. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2017-15-6-2>.
6. Hashem, I. A. T., Yaqoob, I., Anuar, N. B., Mokhtar, S., Gani, A., Khan, S. U. The rise of «big data» on cloud computing: review and open research issues. *Information Systems Journal*, 2015, Vol. 47, pp. 98–115. DOI: 10.1016/j.is.2014.07.006.
7. Bloomfield, R., Bendele, M., Bishop, P., Stroud, R., Tonks, S. The Risk Assessment of ERTMS-based Railway Systems from a Cyber Security Perspective: Methodology and Lessons Learned. In: International Conference on Reliability, Safety and Security of Railway Systems. Springer, 2016, pp 3–19. DOI: 10.1007/978-3-319-33951-1_1.
8. Masson, É., Gransart, C. Cyber Security for Railways – A Huge Challenge – Shift2Rail Perspective. In: International workshop on communication technologies for vehicles. Springer, Cham, 2017, Vol. 10222, pp. 97–104. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-56880-5_10 [restricted access].
9. Álvarez, A., Ioannidis, S., Schlehuber, C., Rodríguez, F., Vallerio, V. CIPSEC Project [Online]. 2017. [Electronic resource]: <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/106378>. Last accessed 14.11.2023.
10. Cao, N., Wang, C., Li, M., Ren, K., Lou, W. Privacy-Preserving Multi-Keyword Ranked Search over Encrypted Cloud Data. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2014, Vol. 25, Iss. 1, pp. 222–233. DOI: 10.1109/TPDS.2013.45.
11. Shi, H. Railway Information Sharing Platform Security Requirements Analysis. In: ICLEM 2014: System Planning, Supply Chain Management, and Safety. 2014, pp 1116–1121. DOI: <https://doi.org/10.1061/9780784413753.169>.
12. Edwards, W. K. Policies and Roles in Collaborative Applications. In: Proceedings of the 1996 ACM conference on Computer supported cooperative work 1996. ACM, pp 11–20. [Electronic resource]: <https://faculty.cc.gatech.edu/~keith/pubs/policy.pdf>. Last accessed 14.11.2023.
13. Thomas, R. K., Sandhu, R. S. Task-based authorization controls (TBAC): a family of models for active and enterprise-oriented authorization management. Database security XI. Springer, Berlin, 1998, pp 166–181. DOI: 10.1007/978-0-387-35285-5_10.
14. Bullock, A. SPACE: spatial access control for collaborative virtual environments. Doctoral dissertation, University of Nottingham, 1999. 183 p. [Electronic resource]: <http://www.adrianbullock.com/documents/thesis.pdf>. Last accessed 14.11.2023.
15. Covington, M. J., Long, W., Srinivasan, S., DEV, A. K., Ahamad, M., Abowd, G. D. Securing Context-Aware Applications Using Environment Roles. In: Proceedings of the sixth ACM symposium on access control models and technologies 2001. ACM, pp 10–20. DOI: <https://doi.org/10.1145/373256.373258> [restricted access].
16. Tolone, W., Ahn, G., Pai, T., Hong, S. Access Control in Collaborative Systems. ACM Computing Surveys (CSUR), 2005, Vol. 37, Iss. 1, pp. 29–41. DOI: 10.1145/1057977.1057979.
17. ENISA (2015) Cyber Security and Resilience of Intelligent Public Transport. Good practices and recommendations, European Union Agency for Network and Information Security. [Electronic resource]: <https://www.enisa.europa.eu/publications/good-practices-recommendations>. Last accessed 14.11.2023.
18. Tsetkov, V. Ya. Control using cyber-physical systems [Upravlenie s primeneniem kiber-fizicheskikh sistem]. *Perspectives of science and education*, 2017, Iss. 3 (27), pp. 55–60. [Electronic resource]: https://pnojournal.files.wordpress.com/2017/04/pdf_170310.pdf. Last accessed 14.11.2023.
19. Knowles, W., Prince, D., Hutchison, D. [et al]. A survey of cyber security management in industrial control systems. *International journal of critical infrastructure protection*, 2015, Vol. 9, pp. 52–80. DOI: 10.1016/j.ijcip.2015.02.002 [restricted access].

Information about the authors:

Nesterov, Evgeny A., Ph.D. (Law), Associate Professor, Director of the Law Institute of Russian University of Transport, Moscow, Russia, jnesterov@yandex.ru.

Tsvetkov, Viktor Ya., D.Sc. (Eng), Professor, Deputy Director of the Law Institute of Russian University of Transport, Moscow, Russia, cvj2@mail.ru.

Article received 22.09.2023, approved 19.12.2023, accepted 23.12.2023.



Diagnostics of Ship Engines Based on Wavelet Neural Network and Image Scanning Using Programmable Logic Circuit



Alexey I. EPIKHIN



Sergey I. KONDRATIEV



Evgeny V. KHEKERT

Alexey I. Epikhin¹, Sergey I. Kondratiev², Evgeny V. Khekert³

^{1,2,3} Admiral Ushakov Maritime State University, Novorossiysk, Russia.

¹ ORCID 0000-0001-8086-536X; Web of Science Researcher ID: X-2415-2018; Scopus ID: 57321825100; Russian Science Citation Index Author ID: 830732.

² ORCID 0000-0001-6145-8718; Web of Science Researcher ID: AAL-1619-2021; Scopus ID: 57321941300; Russian Science Citation Index Author ID: 751295.

³ ORCID 0000-0003-0953-3949; Web of Science Researcher ID: AAL-1290-2021; Scopus ID: 57320865700; Russian Science Citation Index Author ID: 765031.

✉ ¹ bsmbeton@mail.ru.

ABSTRACT

The article is devoted to a diagnostic system for ship engines based on a wavelet neural network and image scanning using a programmable logic circuit and considers a method for analysing multifractal wavelet models.

The combination of wavelet neural networks with a programmable PLIC-based (programmable logic integrated circuit) real-time image processing platform has a significant potential for the purposes of non-destructive testing, which makes it possible to accurately diagnose faults and take effective measures for predictive maintenance, which in turn makes it possible to effectively increase safety and reliability of equipment and reduce maintenance costs.

The article proposes an improved approach to the diagnosis of ship engines, which is based on a wavelet neural network and image scanning using a programmable logic circuit. Wavelet packet decomposition is a method for local time and frequency analysis. It gradually refines the signal at multiple scales through scaling and conversion operations, and it can automatically adapt to the requirements of time-frequency signal analysis to focus on any detail of the signal. It has the advantage of good diagnostic accuracy for information with different noise levels, as well as high reliability since image data from multiple engine signals is used.

Keywords: water transport, ships, engine, wavelet transform, image, network, predictive maintenance.

For citation: Epikhin, A. I., Kondratiev, S. I., Khekert, E. V. Diagnostics of Ship Engines Based on Wavelet Neural Network and Image Scanning Using Programmable Logic Circuit. World of Transport and Transportation, 2023, Vol. 21, Iss. 6 (109), pp. 275–282. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-6-13>.

**The text of the article originally written in Russian is published in the first part of the issue.
Текст статьи на русском языке публикуется в первой части данного выпуска.**

INTRODUCTION

In recent years, the method of analysing multifractal wavelet models has become increasingly widespread since its main function is the function of activation, formation of a neuron, combining mutual advantages, establishing automatic expansion and broadcasting. Due to these properties, multifractal wavelet models are effectively used for the analysis of non-stationary random noise, which allows them to be considered as a useful tool for signal processing in the field of fault diagnosis of various technical mechanisms and equipment, such as a ship engine.

The potential of predictive maintenance using wavelet neural networks has been widely studied for various types of sensors such as vibration, temperature, current, voltage, and imaging sensors. As part of the ongoing experiments, special attention of researchers in the field of prognosis, condition monitoring and control of the condition of complex technical systems is attracted by image analytics due to variety of information they provide [1; 2].

In the context of the above, for non-destructive testing purposes, the combination of wavelet neural networks with an PLIC-based (programmable logic integrated circuit) real-time image processing platform has a significant potential. This platform provides a powerful vision processor for a variety of high-speed, computationally intensive online image recognition and classification applications.

However, despite a wide range of works that analyse the use of images for monitoring/diagnostics of the condition of equipment and units, there is a limited number of studies that address prediction issues based on multi-signal image streams.

The indicated circumstances predetermine the choice of topic for this article.

METHODOLOGY AND OBJECTIVE OF THE RESEARCH

Many authors have worked at different times on development of methods for diagnosing faults in internal combustion engines using discrete wavelet transform and neural networks. Examples of numerous publications include works [3–8].

A number of works were devoted to engines of various modes of transport, to development and rationale of an approach to predicting equipment reliability based on graphical information, which consists of modelling streams

of degradation images as a spatiotemporal process and using its parameters to estimate the time between failures of the system [9–14].

At the same time, while highly appreciating the results available to date, it should be noted that development of the theory of intelligent fault diagnosis has not yet been completed, so several difficulties and limitations arise in terms of its direct use in testing. In addition, a more in-depth analysis requires a methodology that allows one to effectively combine measurements and fault analysis, data collection, interface displays and diagnostic algorithms to make a final decision about the condition of a technical device [15–16].

Thus, *the objective* of the article is to consider the possibilities of diagnosing ship engines based on a wavelet neural network and image scanning using a programmable logic circuit.

RESEARCH RESULTS

The ship engine fault diagnosis system being considered in this study is based on information collected from various sensors, a wavelet neural network and an image processing platform, which together makes it possible to analyse the data flow, signal shape and, finally, achieve the goal of diagnosing the breakdowns that have occurred and damage [17–18]. Pic. 1 shows a general diagram of the system.

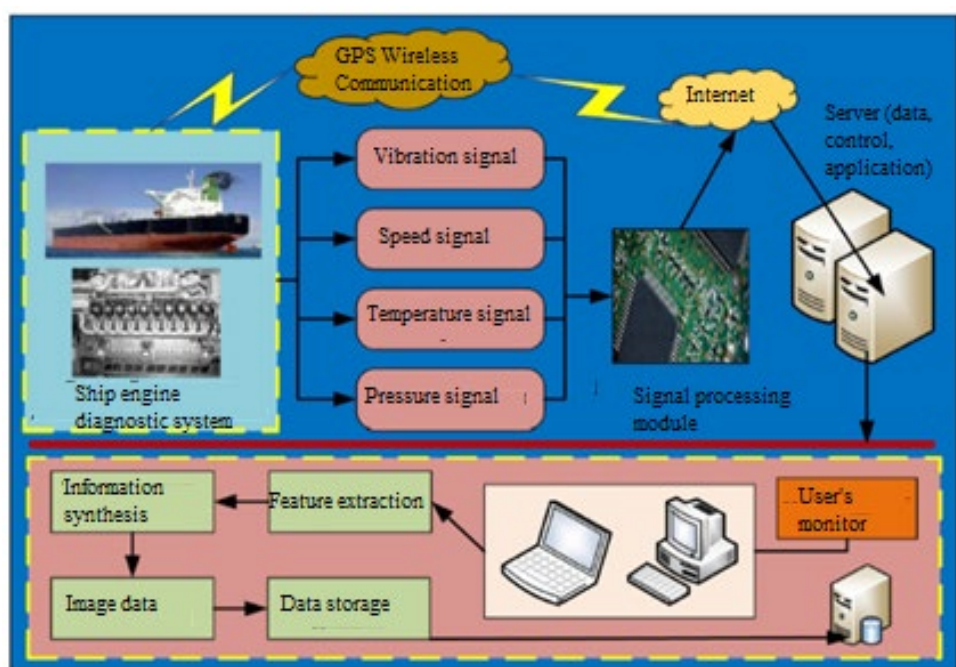
The most informative, from a structural point of view, are parameters that follow:

1. Cooling water temperature.
2. Oil pressure, temperature and consumption.
3. Gas pressure in the crankcase and at the outlet of cylinders.
4. Diesel engine load.
5. Rotational speed of the crankshaft and turbocharger rotor.
6. Fuel supply to cylinders of a diesel engine.
7. Charge air pressure.

These parameters are closely related to failures in such engine systems and mechanisms as the gas distribution mechanism, crank mechanism, fuel system, lubrication system, cooling system.

Ship internal combustion engines operate in areas with different meteorological conditions, with a changing technical condition of the main components and parts.

During operation, the technical conditions of elements of the high-pressure fuel system, cylinder-piston group, boost pressure units, diesel exhaust system and other components, parts and systems deteriorate. Deterioration of



Pic. 1. Schematic diagram of a ship engine diagnostic system [18].

the technical condition leads to a malfunction of the diesel engine (failure), expressed in a change in the values of its operating parameters beyond the limits regulated by regulatory and technical documents, or to its complete stop.

As a result of influence of operational factors the mass of air participating in the combustion process decreases; the process of fuel atomisation, mixture formation and combustion, as designed by the manufacturer, is disrupted; losses of the working fluid increase due to leaks in the parts of the cylinder-piston group on the expansion line.

Control parameters for assessing the technical condition can be:

- characteristics of the processes of fuel supply, compression and combustion in the internal combustion engine cylinder;
- pressure and temperature of air at the inlet and outlet of the turbocharger;
- vibroacoustic characteristics;
- content of wear products in the lubrication system or in exhaust gases.

The most optimal would be a mixed control method, referring to the above characteristics.

As shown in Pic. 1, the diagnostic system is composed of engine hardware platform, signal conditioning circuit, signal acquisition board and PC terminal. The engine hardware platform includes the engine and sensors (Pic. 2). Thanks

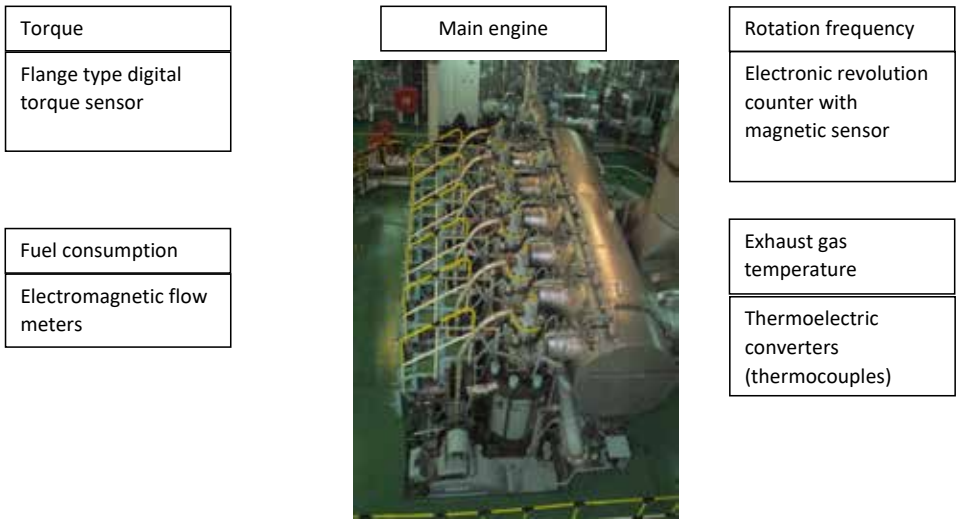
to the data acquisition board, information coming from the sensors is accumulated. The PC terminal includes LabVIEW data storage and display tools, MATLAB feature extraction and information fusion tools [19–20].

In the context of monitoring the condition of a ship engine, it is proposed to use several types of neural networks to analyse the parameters of various systems. To do this, it is possible to divide the analysis into several stages (Pic. 3). The first stage consists of filtering signals from interference and noise to isolate the real signal. This allows working with cleaner data and improves the accuracy of the analysis.

The second stage includes a direct analysis of the measured parameters, their comparison with the standard, determination of the current state and prediction of the residual life of the system elements. At this stage, various data analysis methods and machine learning algorithms can be applied to obtain more accurate results.

An important step in development of a parameter diagnostic system using neural networks is filtering of signals received by sensors and subject to various interferences and noise. Such distorted analog signals, such as acoustic or vibration signals, require the extraction of useful information. To do this, it is proposed to use neural networks for pattern recognition, such as DAE





Pic. 2. Parameters for monitoring the technical condition of a ship engine [performed by the authors].

(Denoising Auto Encoder) networks [21], ARM networks and RBF networks. These neural networks can process signals and remove unwanted distortions, allowing obtain a clean and useful signal for further analysis and diagnostics.

The decision made by the diagnostic system can be based on data in the time domain or in other domains, for example, frequency, time-frequency or scale-time domains [22–23]. Given the task of combining a wavelet neural network with a PLIC-based image processing platform, the shape of the input signal to the neural network is critical to obtain reliable data. As shown in Pic. 4, either a single motor signal or multiple motor signals obtained from the areas noted above can be used as the input signal.

According to Pic. 4 in case of single-signal models, the input signal can have one of the following forms:

- single-signal single-channel input, where the motor signal is used as a discrete one-dimensional vector or a single grayscale image, as shown in Pic. 4 a;
- single-signal multi-channel input, which uses colour images from 3 or 4 colour channels, as shown in Pic. 4 b.

For the case of multi-signal models, input data can be presented in one of the following forms:

1. multi-signal single-channel input, where all signals are either:
 - placed in one picture (folded vertically), forming a large single-channel image (see Pic. 4 c);

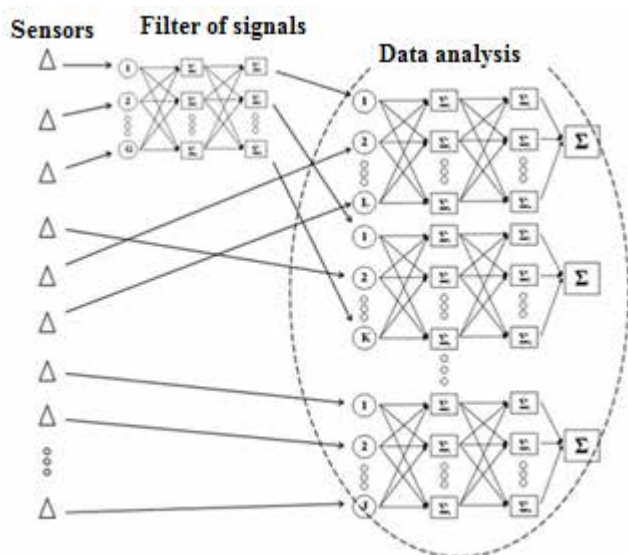
– stored as individual images but are used with multimodal networks with different convolution and subsequent smoothing paths for each signal, requiring subsequent fusion (see Pic. 4 d).

2. multi-channel input of several signals – each signal image is displayed in one channel, and then all the images are added to form a three-dimensional matrix, as shown in Pic. 4 e.

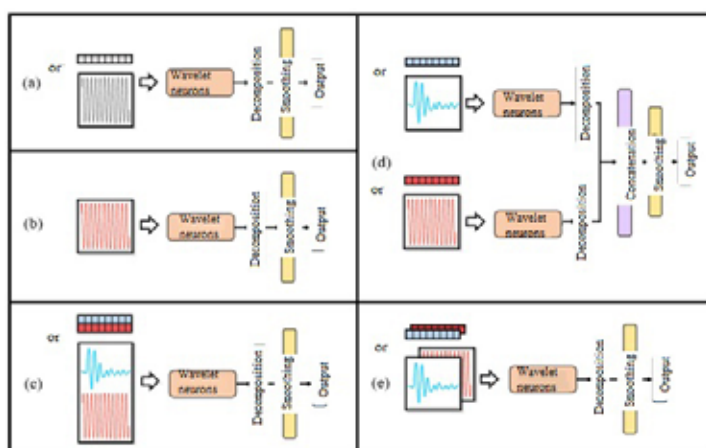
As it is known, the basic idea of wavelet neural network is to use wavelet neurons instead of traditional neurons, and then decompose the signal using multi-resolution wavelet analysis [24]. Next, it is possible to use a neural network to approximate any function, and it seems possible to use a wavelet transform and a neural network connected to each other. The wavelet neural network combines the good ability of the wavelet transform for time-frequency localisation and the ability of the neural network to self-learn and approximate functions. Due to the use of wavelet scale factors and transfer coefficients during wavelet transformations, the series after all modifications becomes more flexible and can have effective function approximation and pattern recognition capabilities.

For the wavelet generation formula $\psi(t)$, if the function $x(t)$ satisfies quadratic integrability, then the continuous wavelet transform (WT) is defined as:

$$C_{\psi}(f_s, f_t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi(t|f_s, f_t) dt, \quad (1)$$



Pic. 3. Stages of preparing data for analysis by a neural network [performed by the authors].



Pic. 4. Various forms of input data for wavelet neural network [16].

in turn:

$$\psi\left(t\left|f_s, f_t\right.\right)=\frac{1}{\sqrt{f_s}} \psi\left(\frac{t-f_s}{f_t}\right), \quad (2)$$

where $\psi\left(t\left|f_s, f_t\right.\right)$ – wavelet function; f_s, f_t – scaling coefficient and transfer coefficient respectively.

A sequence of input signals $x(n)$ of length N is sampled to obtain a discrete wavelet transform:

$$A\left(n\left|j, k\right.\right)=D S\left[\sum_n x(n) l_j^*(n-2^j k)\right], \quad (3)$$

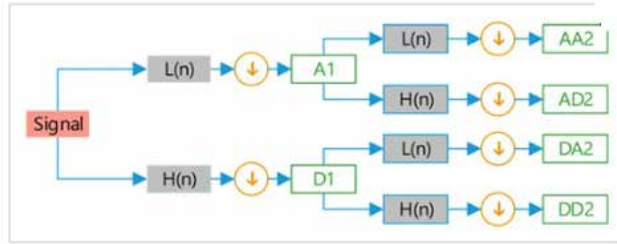
$$D\left(n\left|j, k\right.\right)=D S\left[\sum_n x(n) h_j^*(n-2^j k)\right], \quad (4)$$

where A – low frequency coefficient; D – high-frequency coefficient; $l(n)$ and $h(n)$ – low-pass and high-pass filters, respectively; $l^*(n)$ and

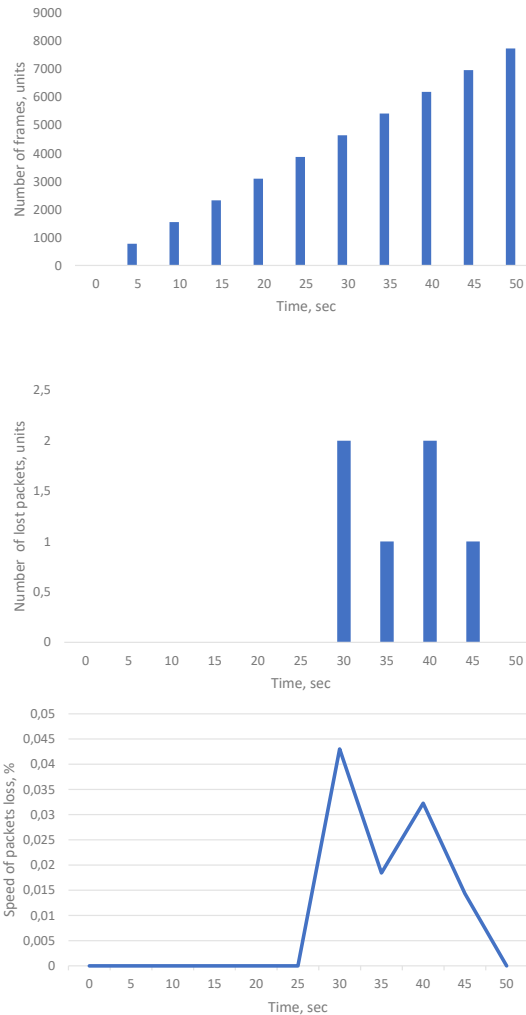
$h^*(n)$ – conjugate functions $l(n)$ and $h(n)$ respectively; j and k – scaling coefficient and transfer coefficient respectively; DS – downsampling.

After decomposing the input signal into high-frequency and low-frequency sub-bands using the above process, the resulting low-frequency sub-band can be used as an input signal, after which wavelet decomposition is performed to obtain the next level of high-frequency and low-frequency sub-bands, etc. As the progression of wavelet decomposition increases, the resolution in the frequency domain also increases.





Pic. 5. Schematic diagram of a two-layer wavelet packet decomposition [26].

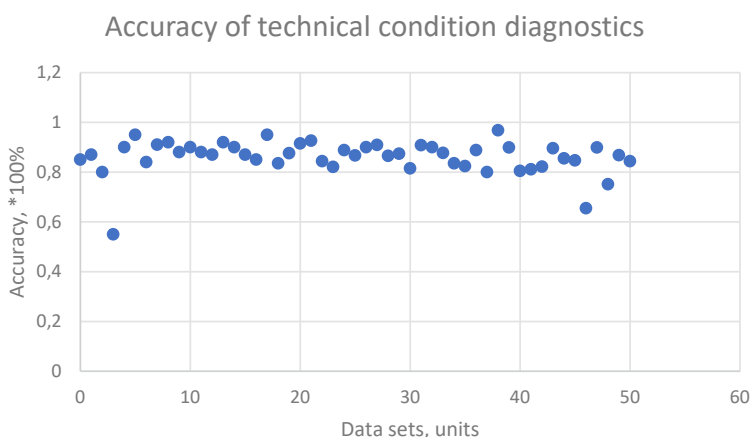


Pic. 6. Performance test at 1024 * 768 pixels [performed by the authors].

For the case of multi-signal models (Pic. 4 c, d, e), the discrete wavelet packet transform (DWPT) is used. It is essentially an extension and optimisation of the discrete wavelet transform (DWT). In contrast to DWT, at each level of the signal decomposition process, not only further decomposition of the low-frequency sub-band occurs, but also of the high-frequency sub-band

[25]. DWPT calculates the optimal signal decomposition path by minimising the cost function that decomposes the signal transmitted in the input channel. Pic. 5 shows a two-layer wavelet packet decomposition.

So, in the process of testing the proposed ship engine diagnostic system, setting different image pixel values and setting 7 test times using a timer,



Pic. 7. Results of diagnostics of a ship engine [performed by the authors].

the system's image capture speed and frame loss rate were analysed and checked. In Pic. 6 it can be seen that with image pixels 1024 * 768 with increasing testing time difference, starting from 30 s there is loss of image data packets. At this time, the total number of collected frames is 7750, considering the number of packets lost per packet, the packet loss rate is 0,043 %. As the test time increases further, the total number of frames increases, the frame loss rate begins to decrease, and the system's maximum capture rate reaches 168 frames per second.

To further validate the actual application of the diagnostic system in the field, 50 sets of engine power curves over the past six months, including all failure modes, were obtained from the ship's microcomputer monitoring system. The diagnostic results using an adaptive wavelet neural network model and a real-time image processing platform are presented in Pic. 7.

As shown in Pic. 7, 39 sets of power curves were correctly classified as faults by the diagnostic system, and one set was scored incorrectly.

CONCLUSIONS

Summarising the results obtained, we note that to improve the accuracy of diagnostics of ship engine faults, the article proposes an approach that is based on a combination of wavelet neural network technology with multi-information image synthesis using a programmable logic circuit. Wavelet packet decomposition is a method for local time and frequency analysis. It gradually refines the signal at multiple scales through scaling and transfer

operations, and it can automatically adapt to the requirements of time-frequency signal analysis, allowing us to focus on any detail of the signal.

The diagnostic results show that the efficiency of recognising breakdowns and failures of a ship engine can meet the real operational requirements of the object and be implemented.

REFERENCES

1. Tianlong Lu, Zhen Lu, Yuchuan Gao, Lei Shi, Huaiyin Wang, Tianyou Wang. Investigation on suitable swirl ratio and spray angle of a large-bore marine diesel engine using genetic algorithm. *Fuel*, 2023, Vol. 345, 128187. DOI: 10.1016/j.fuel.2023.128187.
2. Epikhin, A. I. Fuzzy clustering approach in distributed information systems for marine engines. *Marine intellectual technologies*, 2023, Iss. 2–1 (60), pp. 75–79. DOI: 10.37220/MIT.2023.60.2.008.
3. Marko, K. A., Bryant, B., Soderborg, N. Neural network application to comprehensive engine diagnostics. In: IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, Chicago, IL, 1992, pp. 1016–1022.
4. Glushkov, S. P., Zhidkikh, V. O. Selection of a wavelet-generating function for analysing the dynamic characteristics of an internal combustion engine signal [*Vybor veivlet-obrazuyushchei funktsii dlya analiza dinamicheskikh kharakteristik signala dvigatelya vnutrennego sgoraniya*]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya*, 2017, Iss. 1 (40), pp. 51–56. [Electronic resource]: http://www.stu.ru/particular/get_teamwox_file.php?id=28121&ext=.pdf [full text of the issue]. Last accessed 20.11.2023.
5. Shatnawi, Y., Al-Khassaweneh, M. Fault Diagnosis in Internal Combustion Engines Using Extension Neural Network. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2014, Vol. 61, Iss. 3, pp. 1434–1443. DOI: 10.1109/TIE.2013.2261033 [restricted access].
6. Ravikumar, K. N., Madhusudana, C. K., Kumar, H., Gangadharan, K. V. Classification of gear faults in internal combustion (IC) engine gearbox using discrete wavelet transform features and K star algorithm. *Engineering Science and Technology*, 2022, Vol. 30, 101048. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jestech.2021.08.005>.
7. Ghaedi, A., Pour, E. S., Hosseinzadeh, F. Application of the discrete wavelet transform and probabilistic neural



- networks in IC engine fault diagnostics. *Indian Journal of Fundamental and Applied Life Sciences*, 2015, Vol. 5 (S1), pp. 1587–1592. [Electronic resource]: www.cibtech.org/sp.ed/jls/2015/01/jls.htm (online). Last accessed 27.11.2023.
8. Czech, P., Wojnar, G., Burdzik, R., Konieczny, L., Warczek, J. Application of the discrete wavelet transform and probabilistic neural networks in IC engine fault diagnostics. *Journal of Vibroengineering*, 2014, Vol. 16, Iss. 4, 1268, pp. 1619–1639. [Electronic resource]: <https://www.extrica.com/article/15251>. Last accessed 27.11.2023.
9. Kirillov, A. V., Desta, A. B., Dubessa, M. H., Akulu, Y. A. Application of neural networks for diagnosing and preventing sensor failures of a turbojet bypass engine. *Prospects for Science*, 2021, Iss. 11 (146), pp. 35–37. EDN: ZBQMDY
10. Enchev, S. V., Tovkach, S. S. Wavelet analysis of parameters of automatic control systems of the aircraft engines. *Civil Aviation High Technologies*, 2014, Iss. 204, pp. 90–96. [Electronic resource]: <https://avia.mstuca.ru/jour/article/view/593>. Last accessed 27.11.2023.
11. Monday, H. N., Li, J., Nneji, G. U. [et al]. A wavelet convolutional capsule network with modified super resolution generative adversarial network for fault diagnosis and classification. *Complex and Intelligent Systems*, 2022, pp. 4831–4847. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40747-022-00733-6>.
12. Wenliao Du, Jianfeng Tao, Yanming Li, Chengliang Liu. Wavelet leaders multifractal features based fault diagnosis of rotating mechanism. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2014, Vol. 43, Iss. 1–2, pp. 57–75. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2013.09.003>.
13. Dong, D. W., Hopfield, J. J., Unnikrishnan, K. P. Neural Networks for Engine Fault Diagnostics. In: Proceedings of the 1997 IEEE Workshop, 1997, pp. 636–644.
14. Kobayashi, T., Simon, D. L. A Hybrid Neural Network-Genetic Algorithm Technique for Aircraft Engine Performance Diagnostics. In: Proceedings of the 37th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, Salt Lake City, Utah, 2001, paper no. AIAA-2001-3763.
15. Sadollah, A., Travieso-Gonzalez, C. M. [Eds]. Recent Trends in Artificial Neural Networks: from Training to Prediction. London, IntechOpen, 2020, 150 p. ISBN 978-1-78985-420-6.
16. Luo, Qiwu; Yigang, He; Sun, Yichuang. Time-efficient fault detection and diagnosis system for analog circuits. *Automatika*, 2018, Vol. 59, pp. 303–311. DOI: 10.1080/00051144.2018.1541644.
17. Ma, Y., Han, R., Wang, W. Prediction-Based Portfolio Optimization Models Using Deep Neural Networks. *IEEE access*, 2020, Vol. 8, pp. 115393–115405. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3003819.
18. Song, J., Xue, G., Pan, X., Ma, Y., Li, H. Hourly Heat Load Prediction Model Based on Temporal Convolutional Neural Network. *IEEE access*, 2020, Vol. 8, pp. 16726–16741. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2968536.
19. Yüce, A., Nur Deniz, F., Tan, N. Interactive Analysis of Integer Order Approximation Methods in LabVIEW Environment. 1st International Mediterranean Science and Engineering Congress (IMSEC 2016), Çukurova University, Congress Center, October 26–28, 2016, Adana / TURKEY, paper ID 686, pp. 2357–2365. [Electronic resource]: https://www.researchgate.net/profile/Furkan-Deniz/publication/348326399_Kesir_dereceli_transfer_fonksiyonlari_icin_tamsayi_dereceli_yaklasim_yontemlerinin_LabVIEW_ortaminda_interaktif_analizi_Interactive_Analysis_of_Integer_Order_Approximation_Methods_in_LabVIEW_Environment/links/5ff82609a6fdccdc83b7523/Kesir-dereceli-transfer-fonksiyonlari-icin-tamsayi-dereceli-yaklasim-yontemlerinin-LabVIEW-ortaminda-interaktif-analizi-Interactive-Analysis-of-Integer-Order-Approximation-Methods-in-LabVIEW-Environment.pdf?_tp=eyJjb250ZXh0Ijp7ImZpcnN0UGFnZSI6InB1YmxyY2F0aW9uIiwicGF0aW9uIj09. Last accessed 27.11.2023.
20. Ruiz de Miras, J. Fractal Analysis in MATLAB: A Tutorial for Neuroscientists. In: A. Di Ieva (ed.). The Fractal Geometry of the Brain, Springer Series in Computational Neuroscience, 2016, pp. 523–532. DOI: 10.1007/978-1-4939-3995-4_33.
21. Yue Gao, Dai-Jun Zhang, Cui-Na Jiao, Ying-Lian Gao, Jin-Xing Liu. Spatial Domain Identification Based on Graph Attention Denoising Auto-encoder, 2023. In: Advanced Intelligent Computing Technology and Applications: 19th International Conference, ICIC 2023, Zhengzhou, China, August 10–13, 2023, Proceedings, Part III, pp. 359–367. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-99-4749-2_31.
22. Abdelmaksoud, M., Torki, M., El-Habrouk, M., Elgeneidy, M. Convolutional-neural-network-based multi-signals fault diagnosis of induction motor using single and multi-channels datasets. *Alexandria Engineering Journal*, 2023, Vol. 73, pp. 231–248. DOI: 10.1016/j.aej.2023.04.053.
23. Jian Zhang, Yangqian Meng, Dai Liu, Long Liu, Xiuzhen Ma, Changzhao Jiang, Xiannan Li, Li Huang. Modelling and multi-objective combustion optimization of marine engine with speed maintaining control target. *Thermal science and engineering progress*, 2023, Vol. 41, pp. 12–18. DOI: 10.1016/j.tsep.2023.101852.
24. Chao Luo, Haiyue Wang. Fuzzy forecasting for long-term time series based on time-variant fuzzy information granules. *Applied soft computing*, 2020, Vol. 88, pp. 65–72. DOI: 10.1016/j.asoc.2019.106046 [restricted access].
25. Zhou, W., Wu, J., Liu, A., Zhang, W. A., Yu, L. Neurodynamics-based distributed model predictive control of a low-speed two-stroke marine main engine power system. *ISA Transactions*, 2023, Vol. 138, pp. 341–358. DOI: 10.1016/j.isatra.2023.03.006.
26. Zhenyi Kuai, Guoyong Huang. Fault Diagnosis of Diesel Engine Valve Clearance Based on Wavelet Packet Decomposition and Neural Networks. *Electronics*, 2023, Vol. 12, 353. DOI: 10.3390/electronics12020353.
27. Ofner, A. B., Kefalas, A., Posch, S., Pirkner, G., Geiger, B. C. In-cylinder pressure reconstruction from engine block vibrations via a branched convolutional neural network. *Mechanical systems and signal processing*, 2023. Vol. 183, 109640. DOI: 10.1016/j.ymssp.2022.109640. ●

Information about the authors:

Epikhin, Alexey I., Ph.D. (Eng), Associate Professor, Head of the Department of Operation of Mechanical Installations of Admiral Ushakov Maritime State University, Novorossiysk, Russia, bsmbeton@mail.ru.

Kondratiev, Sergey I., D.Sc. (Eng), Professor, Rector of Admiral Ushakov Maritime State University, Novorossiysk, Russia, sikondr@gmail.com.

Khekert, Evgeny V., D.Sc. (Eng), Professor, Vice-Rector of Admiral Ushakov Maritime State University, Novorossiysk, Russia, zur_mga@nsma.ru.

Article received 20.11.2023, approved 27.12.2023, accepted 29.12.2023.



Multicriteria Comparison of Piggyback Systems



Nikita A. OSINTSEV



Alexander V. TSYGANOV



Alexander N. RAKHMANGULOV



Vera V. BAGINOVA

Nikita A. Osintsev¹, Alexander V. Tsyganov², Alexander N. Rakhmangulov³, Vera V. Baginova⁴

^{1, 2, 3} Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

⁴Russian University of Transport, Moscow, Russia.

¹ ORCID 0000-0003-1168-6725; Web of Science Researcher ID: K-6237-2013; Scopus ID: 56386223400; Russian Science Citation Index SPIN-code: 9791-1889; Russian Science Citation Index Author ID: 401461.

² ORCID 0000-0002-8857-6287; Web of Science Researcher ID: AAH-9785-2019; Scopus ID: 57209470019; Russian Science Citation Index SPIN-code: 5281-7511; Russian Science Citation Index Author ID: 677084.

³ ORCID 0000-0002-6419-2561; Scopus Author ID: 13805427400; Russian Science Citation Index Author ID: 101054.

⁴ ORCID 0000-0002-6289-1078; Russian Science Citation Index SPIN-code: 1255-6600; Russian Science Citation Index Author ID: 266200.

✉ ³ ran@magtu.ru.

ABSTRACT

The results of analysis and comparison of the currently most common piggyback systems refer to those which are at the stages of both commercial operation and testing development. The comparison was made to determine a piggyback system that meets the requirements of the sustainable development concept and ensures the efficient functioning of supply chains.

The authors are the first to propose a multi-criteria assessment methodology (MCDM) for piggyback systems that considers the requirements of main stakeholders of the supply chain: cargo owners, carriers and infrastructure owners. The analysis of the generated multi-criteria model for evaluating piggyback systems was carried out using the methodological apparatus of DEMATEL and MARCOS.

A calculated example of ranking piggyback systems is based on the interests of supply chain stakeholders. The correctness of the results obtained was checked using other MCDM methods: TOPSIS, EDAS, MABAC and WASPAS. The results of assessing sensitivity of results of ranking piggyback systems were performed under various scenarios. The Flexiwaggon, Megaswing and Rolling Road piggyback systems received the highest scores.

The proposed methodology is recommended for developing rationally based management decisions aimed at harmonising the technical and technological parameters of piggyback systems, as well as at the unification of intermodal transport units for development of sustainable supply chains.

Keywords: transport, sustainable development, supply chain, multimodal transportation, combined transportation, intermodal transportation, piggyback system, MCDM, DEMATEL, MARCOS.

Financial support: the research was supported by the Russian Science Foundation grant No. 23–21–00164, <https://rscf.ru/project/23–11–00164/>.

For citation: Osintsev, N. A., Tsyganov, A. V., Rakhmangulov, A. N., Baginova, V. V. Multicriteria Comparison of Piggyback Systems. World of Transport and Transportation, 2023, Vol. 21, Iss. 6 (109), pp. 283–294. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-6-14>.

The text of the article originally written in Russian is published in the first part of the issue.
Текст статьи на русском языке публикуется в первой части данного выпуска.

INTRODUCTION

Creating conditions for implementation of the concept of sustainable development and ESG principles is becoming an increasingly important task for all sectors of the economy. The international community recognises the need for a balance between economic efficiency, the interests of society and environmental protection. The problems of sustainable development are especially relevant for transport, which is the connecting link of the economy and one of the main pollutants of the environment [1; 2]. The formation of «environmentally friendly» transport systems is currently following the development of multimodal cargo delivery systems, including those using intermodal technologies.

A variety of types of intermodal technology comprises a piggyback technology, based on the interaction of railway and road transport. The competition of design and technological solutions in the transport industry has contributed to the emergence of various options for implementing piggyback technology, which have significant differences in engineering solutions. Currently, these options are being developed as independent piggyback systems.

The variety of technical and technological solutions used, the lack of standards, the territorial isolation of specific piggyback systems in the world, the low degree of their use in supply chains – these are the facts, the analysis of which allows us to assert that this intermodal technology is still at the stage of formation [3].

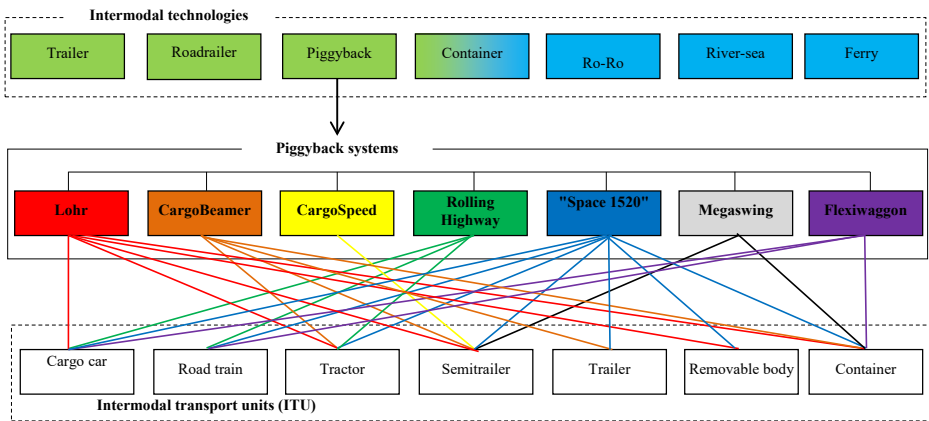
As a result of the increasing number of participants and the diversity of technical and technological parameters of piggyback systems,

the configuration of the network structure of supply chains is becoming more complex. In solving this problem, carriers, forwarders or logisticians must consider the technical and technological requirements and constraints of various piggyback systems to meet the requirements of cargo owners for timely, safe and environmentally friendly transportation of goods.

REVIEW OF RESEARCH AND PROBLEM STATEMENT

The works exploring the conditions for introduction of intermodal technologies in supply chains highlight the following main problems: the complexity of coordination and interaction of various participants in intermodal transportation [4]; lack of common standards for the parameters of terminals, intermodal transport units (ITU) and information systems [5]; the variety of piggyback systems and the presence of many parameters and indicators for their assessment and selection [6; 7]; difficulty in choosing technologies for servicing ITU at terminals [8; 9]; differences in approaches to organising piggyback transportation by rail, developing and agreeing on schedules [10]; differences in determining the rational transportation distance [11]; lack of an integrated approach to organising the interaction of rail and road transport [12]; the need to take into account the specifics of the use of intermodal technologies in continental and maritime transportation [13].

The complexity of solving these problems limits the use of intermodal technologies in supply chains and creates the need for monitoring and management decisions considering many



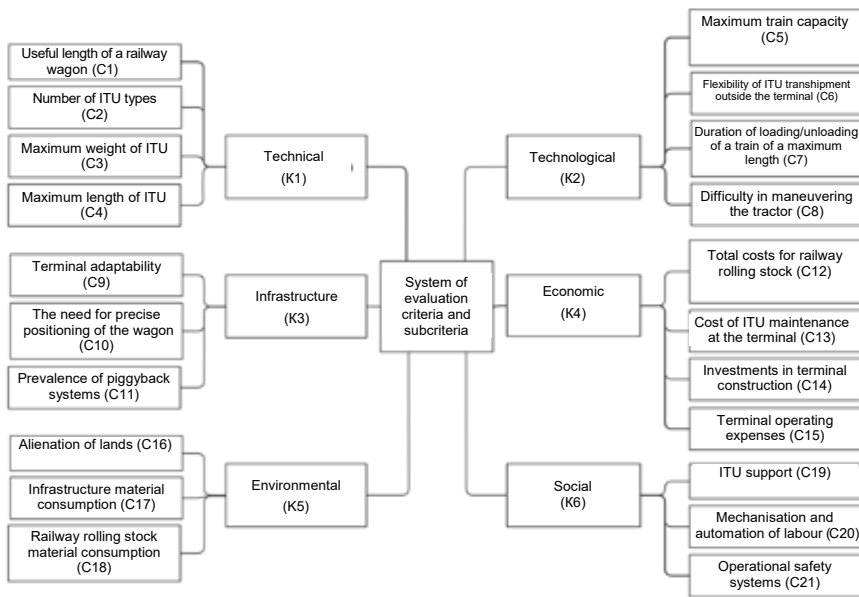
Pic. 1. An aggregate of intermodal technologies, piggyback systems and intermodal transport units [performed by the authors].

Table 1

Grouping and brief characteristics of piggyback systems [compiled by the authors]

System name/origin	Group of systems	Design features of a railway wagon	Type of a wagon and a terminal
Lohr Lohr Group (France)	1 – Systems represented by specialised terminals based on the modular principle of creating terminal infrastructure, using structurally complex specialised railway rolling stock	A car with two platforms (pockets). Horizontal loading and unloading of ITU is based on rotation of wagon platforms relative to the longitudinal axis of the track. The system allows vertical transshipment of ITU	
CargoBeamer CargoBeamer AG (Germany)		A wagon with a removable pallet that extends parallel to the rail track using the horizontal method of ITU reloading. Vertical transshipment of the pallet is ensured by the presence of structural grips in the pallet body	
CargoSpeed International consortium consisting of BLG Consult GmbH (Germany), University of Newcastle (GB), Newrail (GB), The Warbreck Engineering and Dry Dock Company Ltd (GB)		A wagon has a removable floor (platform), as well as lowering ramps, allowing the entry and exit of the road train onto the floor of the wagon. Horizontal loading and unloading of ITU is based on lifting to ground level and rotation of the wagon platform relative to the longitudinal axis of the track using stationary lifting and turning equipment located along the axis of the rail track	
Rolling Road (Rolling Highway, Rolling Motorway, Rollende Landstrasse) (Sweden)	2 – Systems available at railway stations with separate freight platforms for operations with piggybacks. Such systems use the least complex railway wagons (piggyback platforms) in design.	A wagon is represented by a platform with a lowered floor level. The loading height of the wagon is ensured by two bogies with small-diameter wheelsets. The wagon is equipped with end crossing platforms, ensuring the passage of motor vehicles between the coupled platforms when performing loading and unloading operations	
«Space 1520» Under development with participation of JSC Russian Railways (Russia)		A flat wagon with lowering platforms for movement of vehicles along the train. Loading of ITU into wagons is carried out by entering them from one side from the longitudinal sides of the wagon	
Megaswing Kockums Industrier AB (Sweden)	3 – Systems, not requiring the development of terminal infrastructure and using highly specialised high-tech railway wagons	A wagon with two platforms (load sections), equipped with a mechanism for their independent movement. Horizontal loading and unloading of ITU is based on rotation of the wagon platforms relative to the longitudinal axis of the track and their lowering to floor level. The direction of rotation of the platforms ensures the possibility of entry and exit of vehicles on both sides of the track	
Flexiwaggon Flexiwaggon AB (Sweden)		A wagon is equipped with mechanised ramps located on the end sides. Ramps provide forward entry and exit for vehicles. The wagon has an autonomous power supply using rechargeable batteries. The batteries are charged by shaft generators that generate energy while the train is moving.	





Pic. 2. Criteria and subcriteria for stability of a piggyback system [performed by the authors].

factors that influence the effectiveness of their use. Options for intermodal technologies used in various modes of transport, existing and developing piggyback systems, as well as the intermodal transport units used in them are shown in Pic. 1 [3].

To solve these problems, various scientific methods are widely used, in particular, mathematical models and methods [14], including multi-criteria decision-making methods (MCDM) [3]. The choice of MCDM methods is due to the variety of characteristics and properties of piggyback systems, their elements, as well as the need to consider many parameters and indicators of their functioning [15]. Methods belonging to this group are also used to quantify trade-offs between economic, social and environmental criteria for sustainable development of supply chains [16].

The *objective* of the study is to develop a methodology for multi-criteria selection of a piggyback system that ensures formation and functioning of sustainable supply chains. The methodology is based on systematisation of the parameters of all known piggyback systems: Lohr, CargoBeamer, CargoSpeed, Rolling Road, «Space 1520», Megaswing and Flexiwaggon. Analysis of the parameters of piggyback systems made it possible to identify three groups of such systems (Table 1), as well as to form a universal system of criteria for the stability of a piggyback system in supply chains (Pic. 2).

RESULTS

Methodology for Assessing Piggyback Systems

At the first stage, a multicriteria model (MCDM model) is developed for assessing piggyback systems. The elements of the MCDM model are alternatives – piggyback systems, as well as attributes – criteria and subcriteria for evaluating piggyback systems. The following alternative designations are used in this work: Lohr (A1), CargoBeamer (A2), CargoSpeed (A3), Rolling Road (A4), Space 1520 (A5), Megaswing (A6) and Flexiwaggon (A7). The system of criteria and subcriteria for stability of a piggyback system in supply chains developed by the authors is used as attributes in the MCDM model [17] (see Pic. 2).

At the second stage of the implementation of the method, the weight of the attributes of the MCDM model is calculated using the DEcision MAKing Trial and Evaluation Laboratory method, abbreviated DEMATEL [18]. The choice of the DEMATEL method [19] is justified by the possibility of establishing the interdependence between the criteria and subcriteria of the piggyback system and developing a map of network relationships reflecting the mutual influence of the criteria and the cause-and-effect relationships between them. The final result of applying the DEMATEL method is identification of the weight of the attributes of piggyback systems.

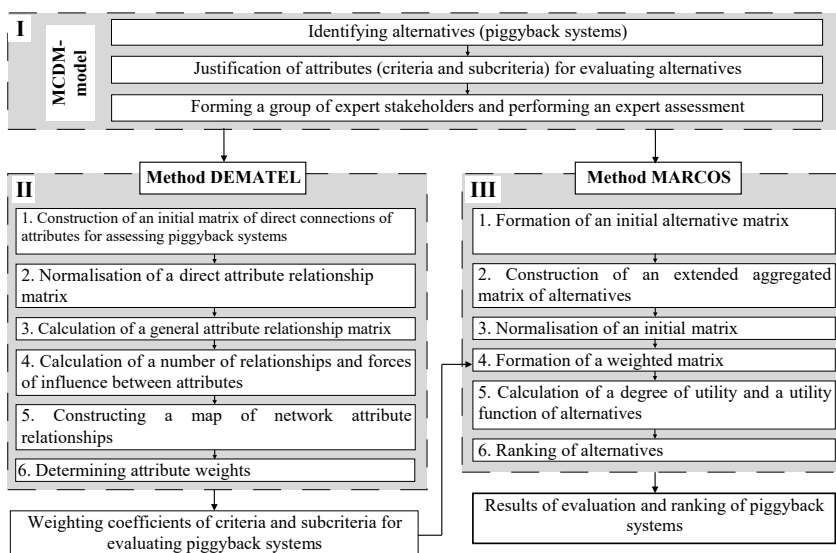


Fig. 3. Stages of implementation of the DEMATEL–MARCOS combined method for assessing piggyback systems [performed by the authors].

The main steps for implementing the DEMATEL method are [3]:

1. Construction of an initial matrix of direct connections between attributes of piggyback systems and pairwise assessment of the influence of attributes, performed based on an analysis of the opinions of expert stakeholders.

2. Normalisation of the matrix of direct connections between attributes of piggyback systems.

3. Formation of a general matrix of connections between the attributes of piggyback systems.

4. Calculation of the number of relationships and forces of influence between the attributes of piggyback systems. Completing this step is necessary to establish cause-and-effect relationships in the system of criteria and subcriteria of piggyback systems. Each attribute can be assigned either to the «cause» group (i.e., it affects other attributes) or to the «effect» group (i.e., it is influenced by other attributes).

5. Construction of a cause-and-effect diagram (map of network relationships). It shows the structural relationship between the attributes under consideration and the correlation between them.

6. Calculation of the weight of each attribute of the piggyback system.

At the third stage of the implementation of the method, piggyback systems are ranked using the «Measurement of Alternatives and Ranking

according to COMpromise Solution» method, hereinafter MARCOS [20]. The basis of this method is the identification of the relationships between alternatives and reference values («ideal» and «anti-ideal» alternatives). The best alternative is considered to be the one that is closest to the ideal and at the same time further from the anti-ideal alternative.

The main steps of the MARCOS method are [3]:

1. Formation of an initial matrix for evaluating alternatives, consisting of evaluation values of each alternative for all attributes.

2. Construction of an extended initial matrix and determination of ideal and anti-ideal alternatives.

3. Normalisation of an original solution matrix.

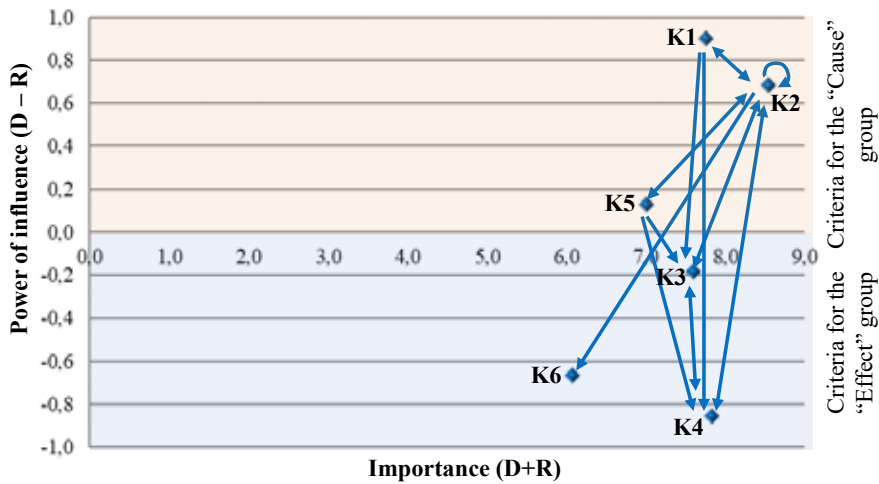
4. Formation of a weighted matrix. The weight values of the attributes are taken based on the results of calculations using the DEMATEL method.

5. Calculation of the rate of utility of alternatives and finding of the utility function of alternatives. The value of the utility function shows how close each alternative is to the ideal alternative and how far it is from the anti-ideal alternative.

6. Ranking of alternatives. The best alternative is considered to be the alternative with the maximum value of the utility function.

A general framework for using the combined DEMATEL–MARCOS method for the





Pic. 4. Network relationship map of piggyback system criteria (assessed by academic experts).

comprehensive specification and assessment of piggyback systems in sustainable supply chains is presented in Pic. 3.

Piggyback System Evaluation Results

The assessment and ranking of piggyback systems to ensure sustainable development of supply chains was carried out using an MCDM model represented by seven alternatives (A1–A7), characterised by six groups of criteria (K1–K6), including 21 subcriteria (C1–C21) (Pic. 2). The analysis of this model was carried out by the following groups of experts: cargo owners, logistics service providers, infrastructure owners and academic experts [3].

Using the DEMATEL method, maps of network relations of criteria and subcriteria for evaluating piggyback systems were constructed and their weighting coefficients were calculated. As an example, Pics. 4–7 show a map of network relationships based on the results of assessments by academic experts. The light zone on the map shows the criteria that make up the «Cause» group. Technical criteria (K1) have the strongest influence on all criteria. Infrastructure criteria (K2) are characterised by the largest number of connections, which indicates their greatest importance in this system of criteria.

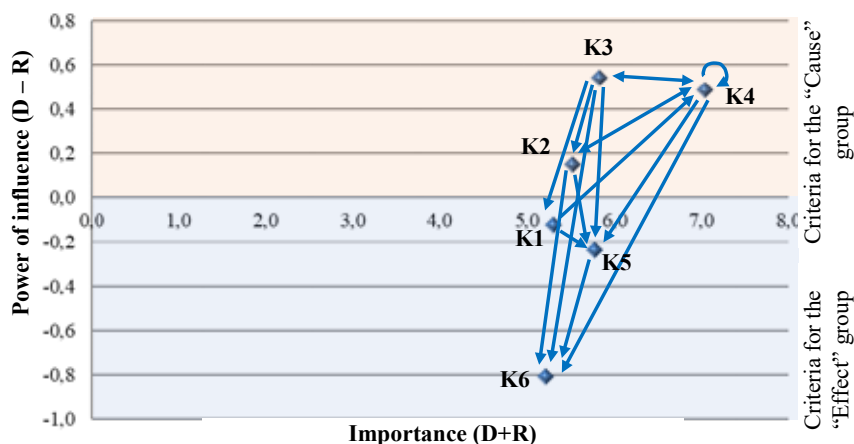
The final weighting coefficients of the criteria and subcriteria for assessing piggyback systems, obtained from the results of assessment by various groups of stakeholder experts, are presented in Tables 2 and 3.

The results of criteria ranking indicate differences in assessment of their importance by different groups of stakeholders (Table 2). The

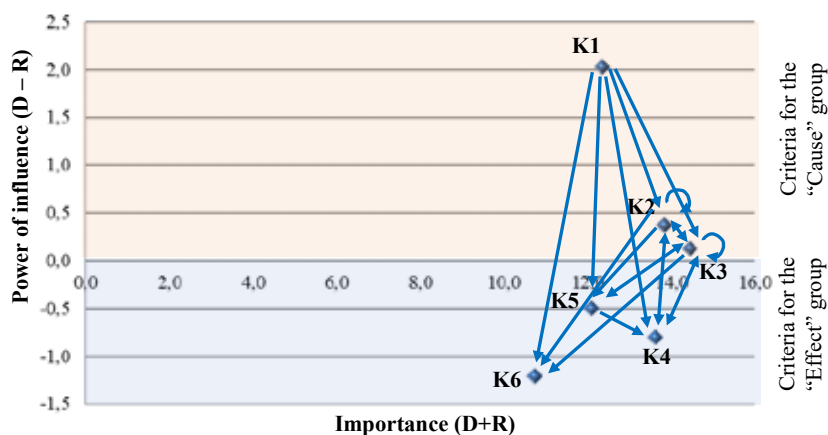
highest ranks were received by the subcriteria of the infrastructural and environmental groups of criteria. The average values of the ranks of the subcriteria of these groups were 2,6 and 6,5, respectively. The second most important criteria for experts were the criteria of technological, economic and social groups. The average value of the ranks of the subcriteria of these groups was 12,6. The subcriteria of the technical group received the least importance (average rank 16,2).

Thus, experts agree that the main condition for including piggyback technology in the supply chain is the presence of a widespread network of piggyback terminals with the ability to adapt it to customer needs. Stakeholders appreciate also the technology's positive impact on reducing the environmental impact of transport. The low assessment of the influence of criteria characterising piggyback systems through technical parameters is of interest. This, to a certain extent, contradicts the thesis stated at the beginning of the article about the problem of considering the requirements of a specific system for ITU parameters and can be explained by the use by suppliers and providers of a limited number of types of ITU, as well as the exclusion of transportation schemes using various piggyback systems in different regions (countries)).

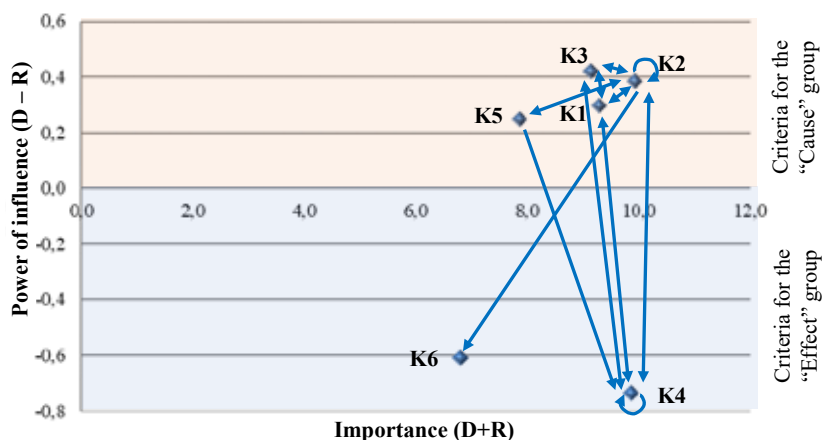
Regarding the importance of criteria and subcriteria for stakeholders, the following trend is observed. Cargo owners express less interest in the technical and technological characteristics of piggyback systems, since they are not involved in the process of organising transportation. At



Pic. 5. Network relationship map of piggyback system criteria (assessed by cargo owners).



Pic. 6. Network relationship map of piggyback system criteria (assessed by infrastructure owners).



Pic. 7. Network relationship map of piggyback system criteria (assessed by carriers).

the same time, the amount of transport costs for transportation, as well as the need to accompany the goods, is important for them. Logistics service providers who are involved in organisation

of transportation, on the contrary, pay more attention to the criteria that characterise systems from a technological, infrastructural and environmental perspective. This is due to their



Table 2
**Weight values of criteria for evaluating piggyback systems using the DEMATEL method
[compiled by the authors]**

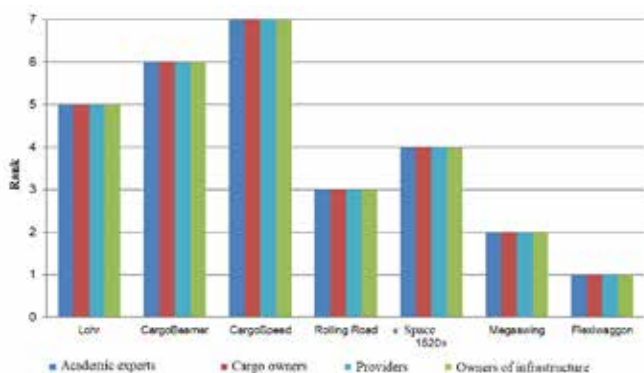
Criteria	Academic experts	Cargo owners	Providers	Infrastructure owners
Technical (K1)	0,1737	0,1525	0,1754	0,1618
Technological (K2)	0,1905	0,1587	0,1875	0,1787
Infrastructure (K3)	0,1689	0,1684	0,1728	0,1869
Economic (K4)	0,1752	0,2027	0,1867	0,1764
Environmental (K5)	0,1558	0,1661	0,1487	0,1565
Social (K6)	0,1359	0,1517	0,1289	0,1398

interest in choosing a delivery option that provides high quality transportation at lower own operating costs for transportation, as well as a desire to cooperate with companies that pay attention to «green» technologies. Owners of transport infrastructure pay the greatest attention

to technological and infrastructural parameters, since they consider piggyback technology as a business project that requires significant but quickly payback investments. This group of stakeholders gives a low assessment of importance of the total costs of railway rolling

Table 3
**Weight values of subcriteria for evaluating piggyback systems using the DEMATEL method
[compiled by the authors]**

Subcriteria	Academic experts	Cargo owners	Providers	Infrastructure owners
Useful length of a wagon (C1)	0,0445	0,0390	0,0470	0,0396
Number of types of ITU (C2)	0,0375	0,0368	0,0352	0,0347
Maximum weight of ITU (C3)	0,0425	0,0384	0,0443	0,0414
Maximum length of ITU (C4)	0,0491	0,0382	0,0490	0,0460
Maximum train capacity (in semi-trailers) (C5)	0,0477	0,0385	0,0473	0,0472
Flexibility of ITU transshipment outside the terminal (C6)	0,0466	0,0385	0,0438	0,0418
Duration of loading/unloading of a train of maximum length (C7)	0,0502	0,0431	0,0516	0,0487
Difficulty in manoeuvring the tractor (C8)	0,0460	0,0386	0,0448	0,0410
Terminal adaptability (C9)	0,0619	0,0571	0,0572	0,0635
The need for precise positioning of a wagon (C10)	0,0526	0,0526	0,0580	0,0617
Prevalence of a piggyback system (C11)	0,0544	0,0587	0,0576	0,0617
Total costs for railway rolling stock (C12)	0,0344	0,0465	0,0464	0,0389
ITU maintenance cost on the terminal (C13)	0,0483	0,0538	0,0529	0,0468
Investments in construction of terminal infrastructure (C14)	0,0459	0,0477	0,0427	0,0457
Terminal operating expenses (C15)	0,0466	0,0547	0,0448	0,0449
Alienation of lands (C16)	0,0521	0,0561	0,0444	0,0546
Infrastructure material consumption (C17)	0,0543	0,0561	0,0545	0,0578
Material consumption of railway rolling stock (C18)	0,0494	0,0538	0,0498	0,0442
ITU support (C19)	0,0398	0,0554	0,0416	0,0395
Mechanisation and automation of labour (C20)	0,0477	0,0466	0,0425	0,0501
Safety of operation of a piggyback system (C21)	0,0485	0,0497	0,0448	0,0502



Pic. 8. Ranking of piggyback systems using the MARCOS method [performed by the authors].

stock, assuming that these costs are borne by the operators of their own cars. The opinion of academic experts is generally consistent with the opinion of logistics service providers and transport infrastructure owners.

The ranking of piggyback systems was carried out using the MARCOS method using the obtained weight values of the subcriteria and their quantitative and qualitative values [3]. The ranking results are presented in Pic. 8.

Despite certain differences in expert opinions about the importance of criteria and subcriteria, a comparison of piggyback systems showed consistency in expert opinions. All experts place the Flexiwaggon system in first place, the Megaswing system in the second place, and the CargoSpeed system in the third place. Thus, based on the totality of characteristics, systems of the third group (Table 1) are prioritised as piggyback systems for ensuring the sustainable development of supply chains. They do not require the creation of complex terminal infrastructure and use high-tech railway rolling stock, which ensures the mobility of loading/unloading ITU. Systems of the second group: Rolling Road and the domestic «Space 1520» arouse less pronounced interest in their use in supply chains. This is proven by the fact that these systems received high scores for subcriteria that are not significant («Number of ITU types» and «Cost of a car and its operating costs») and, conversely, low scores for significant subcriteria («Terminal adaptability» and «Prevalence piggyback system»). The systems of the first group, which require the largest investments in formation of a network of intermodal terminals and a fleet of specialised railway rolling stock, received the lowest rank.

To verify the correctness of the results obtained by the MARCOS method, a multicriteria

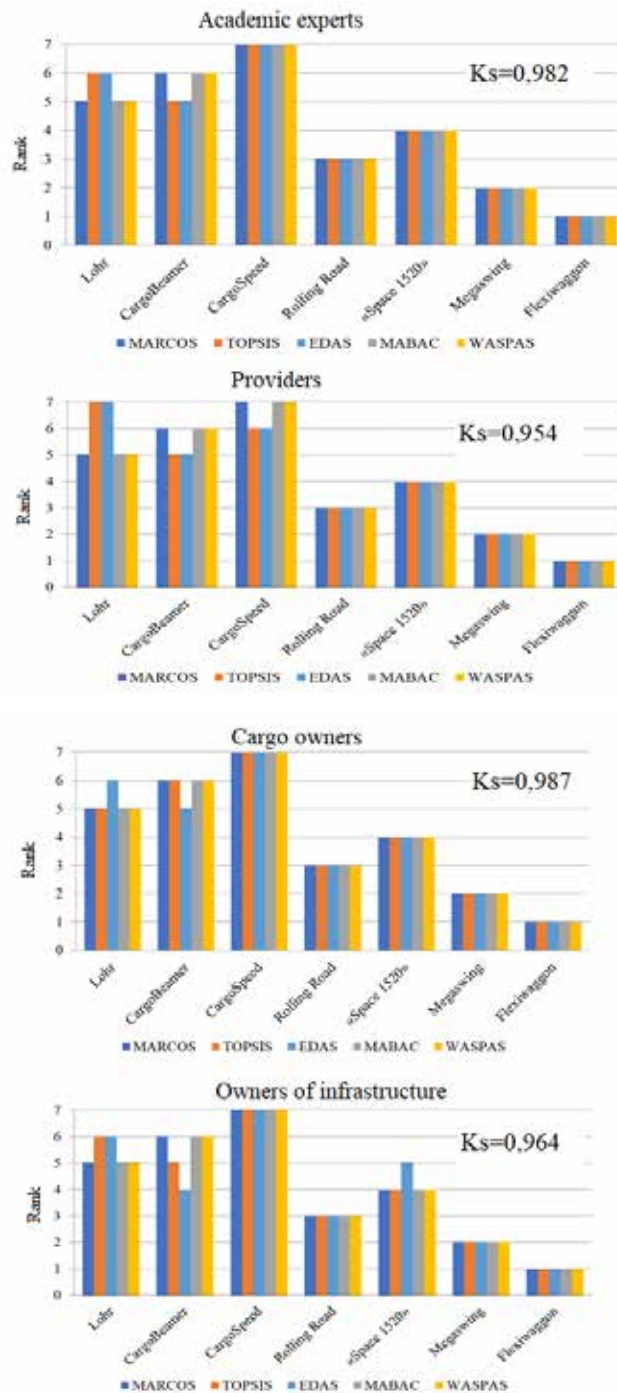
comparison of piggyback systems was performed using other MCDM methods: TOPSIS – Technique for the Order of Preference by Similarity to Ideal Solution [21], EDAS – The Evaluation based on Distance from Average Solution [22], MABAC – Multi-Attributive Border Approximation Area Comparison [23] and WASPAS – Weighted Aggregated Sum Product Assessment) [24]. Pic. 9 shows the results of a comparison of calculations using various methods. The first three ranks are retained for the Flexiwaggon, Megaswing and Rolling Road systems, respectively. The «Space 1520» system predominantly receives fourth place. The exception is the results of processing the opinions of experts belonging to the «Infrastructure Owners» group obtained with the EDAS method, according to which this system ranks fifth.

The use of additional MCDM methods and obtaining convergence of results indicates a high correlation of the obtained ranks. The Spearman rank correlation coefficient used for this assessment was $K_s=0,954\text{--}0,987$ (see Pic. 9).

The sensitivity of the results of ranking piggyback systems was assessed. The sensitivity assessment is based on an analysis of the impact of changing the weight of subcriteria on the rank of a certain piggyback system. The description of the considered scenarios and the results of stability of ranking of piggyback systems are given in Table 4 and Pic. 10.

The results of assessing the sensitivity of ranking piggyback systems show that in all scenarios, alternative A7 (rank No. 1), represented by the Flexiwaggon system, remains stable. Alternative A6 (Megaswing system – rank No. 2) is stable in scenarios S1, S2 and S4 for all groups of experts. Minor changes in stability of the assessment results are observed for the remaining alternatives.





Pic. 9. Ranking of piggyback systems using MCDM methods [performed by the authors].

CONCLUSION

The impact of piggyback technology on supply chain sustainability is not constant and depends on the characteristics of the specific piggyback system. The variety of technical and technological solutions for piggyback systems also limits their joint use in development of the

network structure of global supply chains and transport corridors.

The highest priority for use in supply chains are systems that have high mobility of IT service and do not require significant investments in creation of terminal infrastructure. First, this is achieved because of the use of high-tech railway

Table 4

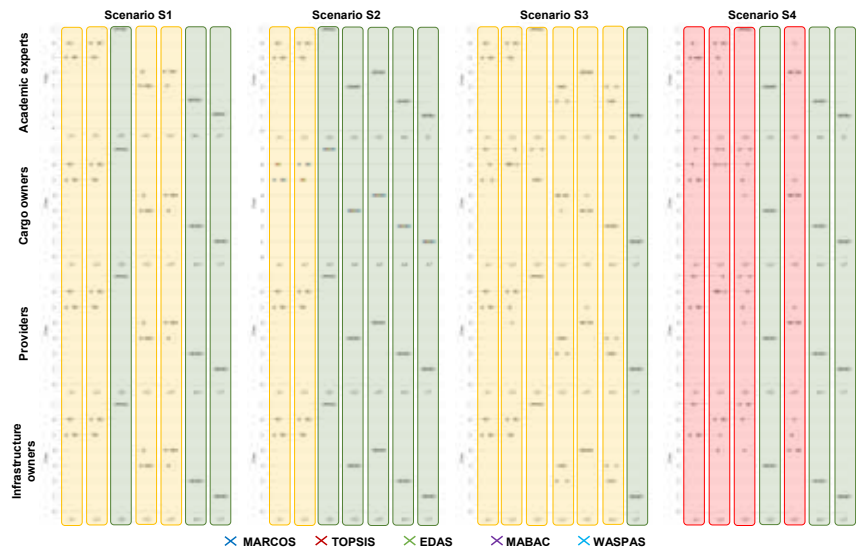
Description of scenarios for assessing stability of ranking results
of piggyback systems [compiled by the authors]

Scenario	Scenario description	Ranking results
S1	The weight of all subcriteria is the same and is equal to the arithmetic mean value of 0,0476	The ranks of alternatives A3, A6 and A7 are stable among all experts for all MCDM methods (green area in Pic. 10). Alternatives A1, A2, A4 and A5 have minor changes in ranks 3, 4, 5 and 6 among MCDM methods (yellow area in Pic. 10)
S2	The weight of each subcriterion is taken equal to the arithmetic mean of the assessment for all four groups of experts (for example, C1 = 0,0425)	The ranks of alternatives A3, A4, A5, A6 and A7 are stable among all experts for all MCDM methods. Alternatives A1 and A2 have minor changes to ranks 5 and 6.
S3	Eliminating the criterion with the highest weight and changing the weight of the remaining subcriteria proportionally to the value of this subcriterion. For the group of academic experts, C9=0,0619 was excluded, for cargo owners C11=0,0587, for carriers C10=0,058 and for infrastructure owners C9=0,0635	Alternative A7 (rank 1) is stable among all experts for all MCDM methods. Alternative A3 has a stable rank of 7 among all experts except cargo owners. Alternatives A1, A2, A4, A5 and A6 have minor changes, both in rank, and according to MCDM methods.
S4	Eliminating the subcriterion with the lowest weight and changing the weight of the remaining subcriteria proportionally to the value of this subcriterion. For the group of academic experts, C12=0,0344 was excluded, for cargo owners C2=0,0368, for carriers C2=0,0352 and for infrastructure owners C2=0,0347	The ranks of alternatives A4, A6 and A7 are stable among all experts for all MCDM methods. Alternatives A1, A2, A3 and A5 have minor changes in ranks and MCDM methods (rose area in Pic. 10).

rolling stock, capable of providing horizontal loading and unloading of ITU without auxiliary devices and mechanisms. These conditions are met by the Swedish piggyback systems Flexiwaggon and Megaswing. The second priority area is the use of piggyback systems based on already functioning infrastructure facilities – railway stations and terminals, which leads to the use of wagons that are simpler in design. This makes it possible to reduce the amount of investment in creation of a network

of intermodal terminals and formation of a fleet of specialised railway rolling stock. Such systems are Rolling Road and «Space 1520».

Further directions of this research are aimed at identification and analysis of the goals, interests and behaviour strategies of piggyback technology stakeholders to reveal the system of their interaction, as well as development of a conceptual model of functioning of a piggyback technology in supply chains that meet the goals of sustainable development.



Pic. 10. Results of assessing the stability of ranking piggyback systems [calculated by the authors].



REFERENCES

1. Zhao, Xianbo; Ke, Yongjian; Zuo, Jian; Xiong, Wei; Wu, Peng. Evaluation of sustainable transport research in 2000–2019. *Journal of Cleaner Production*, 2020, Vol. 256, 120404. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.120404.
2. Aloui, A., Hamani, N., Derrouiche, R., Delahoche, L. Systematic literature review on collaborative sustainable transportation: Overview, analysis and perspectives. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 2021, Vol. 9, 100291. DOI: 10.1016/j.trip.2020.100291.
3. Osintsev, N., Tsyganov, A., Rakhmangulov, A., Sladkowski, A. Multi-criteria Assessment of Piggyback Systems in Sustainable Supply Chains. In: Sladkowski, A. (eds) *Modern Trends and Research in Intermodal Transportation. Studies in Systems, Decision and Control*, Vol. 400. Springer, Cham, 2022, pp. 451–559. DOI: 10.1007/978-3-030-87120-8_10 [restricted access].
4. Lehtinen, J., Bask, A. H. Analysis of business models for potential 3Mode transport corridor. *Journal of Transport Geography*, 2012, Vol. 22, pp. 96–108. DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2011.12.001.
5. Gharehgozli, A., Vries, H. de, Decrauw, S. The role of standardisation in European intermodal transportation. *Maritime Business Review*, 2019, Vol. 4 (2), pp. 151–168. DOI: 10.1108/MABR-09-2018-0038.
6. Tsyganov A. V., Osintsev N. A. Systematization of rolling-stock parameters in piggyback systems. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, Vol. 709, 33010. DOI: 10.1088/1757-899X/709/3/033010.
7. Rui Wang, Kai Yang, Lixing Yang, Ziyao Gao. Modeling and optimization of a road–rail intermodal transport system under uncertain information. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2018, Vol. 72, pp. 423–436. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2018.04.022>.
8. Krstić, M., Tadić, S., Elia, V., Massari, S., Farooq, M. U. Intermodal Terminal Subsystem Technology Selection Using Integrated Fuzzy MCDM Model. *Sustainability*, 2023, Vol. 15 (4), 3427. DOI: 10.3390/su15043427.
9. Cong Li, Guang Yang, Xiaonian Sun. Transshipment Equipments for Road–Rail Intermodal Transport. *Advanced Materials Research*, 2015, Vol. 1065–1069, pp. 3377–3380. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1065-1069.3377.
10. Xinghan Chen, Tianshuai Zuo, Maoxiang Lang, Shiqi Li, Siyu Li. Integrated optimization of transfer station selection and train timetables for road–rail intermodal transport network. *Computers & Industrial Engineering*, 2022, Vol. 165, 107929. DOI: 10.1016/j.cie.2021.107929.
11. El Yaagoubi, A., Ferjani, A., Essaghir, Y., Sheikhhamedi, F., Abourraja, M. N., Boukachour, J., Baron, M.-L., Duvallet, C., Khodadad-Saryazdi, A. A logistic model for a french intermodal rail/road freight transportation system. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2022, Vol. 164, 102819. DOI: 10.1016/j.tre.2022.102819.
12. Fedorina, A. V., Tsyganov, A. V. An integrated approach to the implementation of piggyback transportation in Russia [*Kompleksnyy podkhod k vnedreniyu kontreylernykh perevozok v Rossii*]. *Modern Problems of Russian Transport Complex*, 2015, Vol. 5, Iss. 1, pp. 21–28. EDN: VPWEDJ.
13. Kolik, A. V. Combined rail and road transport in supply chains [*Kombinirovannye zheleznodorozhno-avtomobil'nye perevozki v cepyah postavok*]. Moscow, Izdatel'stvo «Tekhpolografcentr», 2018, 301 p. ISBN 978-5-94385-143-8.
14. Crainic, T. G., Perboli, G., Rosano, M. Simulation of intermodal freight transportation systems. *European Journal of Operational Research*, 2018, Vol. 270 (2), pp. 401–418. DOI: 10.1016/j.ejor.2017.11.061.
15. Koohathongsumrit, N., Meethom, W. An integrated approach of fuzzy risk assessment model and data envelopment analysis for route selection in multimodal transportation networks. *Expert Systems with Applications*, 2020, 114342. DOI: 10.1016/j.eswa.2020.114342.
16. Banasik, A., Bloemhof-Ruwaard, J. M., Kanellopoulos, A., Claassen, G. D. H., Vorst van der, J. G. A. J. Multi-criteria decision making approaches for green supply chains: A review. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 2018, Vol. 30 (3), pp. 366–396. DOI: 10.1007/s10696-016-9263-5.
17. Tsyganov, A. V., Osintsev, N. A., Rakhmangulov, A. N., Zenkin, A. A. Stability Criteria for a Piggyback System. *World of Transport and Transportation*, 2023, Vol. 21, Iss. 5 (108), pp. 126–134. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-5-14>.
18. Gabus, A., Fontela, E. World problems, an invitation to further thought within the framework of DEMATEL. Geneva, Switzerland: Battelle Geneva Research Centre, 1972. pp. 1–8.
19. Sheng-Li, Si; Xiao-Yue, You; Hu-Chen, Liu; Zhang Ping. DEMATEL technique: a systematic review of the state-of-the-art literature on methodologies and applications. *Mathematical Problems in Engineering*, 2018, Vol. 2018, 3696457. DOI: 10.1155/2018/3696457.
20. Stević, Ž., Pamučar, D., Puška, A., Chatterjee, P. Sustainable supplier selection in healthcare industries using a new MCDM method: Measurement of alternatives and ranking according to Compromise solution (MARCOS). *Computers & Industrial Engineering*, 2020, Vol. 140, 106231. DOI: 10.1016/j.cie.2019.106231.
21. Ching-Lai, Hwang, Kwangsun, Yoon. Multiple Attribute Decision Making. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1981, 270 p.
22. Keshavarz Ghorabae, M., Zavadskas, E. K., Olfat, L., Turskis, Z. Multi-Criteria Inventory Classification Using a New Method of Evaluation Based on Distance from Average Solution (EDAS). *Informatica*, 2015, Vol. 26, Iss. 3, pp. 435–451. DOI: 10.15388/Informatica.2015.57.
23. Pamučar, D., Čirović, G. The selection of transport and handling resources in logistics centers using multi-attributive border approximation area comparison (MABAC). *Expert Systems with Applications*, 2015, Vol. 42, Iss. 6, pp. 3016–3028. DOI: 10.1016/j.eswa.2014.11.057.
24. Zavadskas, E. K., Turskis, Z., Antucheviciene, J. Optimization of Weighted Aggregated Sum Product Assessment. *Electronics and Electrical Engineering*, 2012, Vol. 122, Iss. 6, pp. 3–6. DOI: 10.5755/j01.eee.122.6.1810.

Information about the authors:

Osintsev, Nikita A., Ph.D. (Eng), Associate Professor at the Department of Logistics and Transport Systems Management of Novosibirsk State Technical University (NMSTU), Magnitogorsk, Russia, osintsev@magtu.ru.

Tsyganov, Alexander V., Ph.D. (Eng), Associate Professor at the Department of Logistics and Transport Systems Management of Novosibirsk State Technical University (NMSTU), Magnitogorsk, Russia, tsyganov.alek@gmail.com.

Rakhmangulov, Alexander N., D.Sc. (Eng), Professor at the Department of Logistics and Transport Systems Management of Novosibirsk State Technical University (NMSTU), Magnitogorsk, Russia, ran@magtu.ru.

Baginova, Vera V., D.Sc. (Eng), Head of the Department of Logistics and Transport Systems Management of Russian University of Transport, Moscow, Russia, vvbaginova@gmail.com.

Article received 25.09.2023, approved 13.12.2023, accepted 17.12.2023.



Rationale for Transport Costs when Transporting Bulk Cargo in Containers with the Integral Method



Elena G. KURZINA



Nina A. KORNIENKO



Angelina M. KURZINA

Elena G. Kurzina¹, Nina A. Kornienko², Angelina M. Kurzina³

^{1, 2, 3} Russian University of Transport, Moscow, Russia.

¹ ORCID 0000-0003-1056-3344; Russian Science Citation Index SPIN-code: 9587-6660; Russian Science Citation Index Author ID: 16562.

² ORCID 0000-0001-89686-0694; Russian Science Citation Index SPIN-code: 1068-8596; Russian Science Citation Index Author ID: 351358.

³ ORCID 0000-0002-1081-3086; Russian Science Citation Index SPIN-code: 4248-4152; Russian Science Citation Index Author ID: 1078181.

✉ ¹ kurzina_elena@mail.ru.

ABSTRACT

Currently, a large volume of exports of coal and other bulk cargo to China is carried out by container method, the main advantage of which is the possibility of multimodal transportation. This issue is also relevant for other countries, linked by transport corridors with sea transportation. However, one of the main problems of container transportation of coal is reduced net weight of the cargo transported in two containers as compared to one standard gondola wagon used previously.

The study describes an integral calculation of five possible options for loading coal into a container with formation of a «cap»

in the form of spherical or elliptical segments. As a result of the calculations, volumetric and mass underload of containers was identified, which significantly affects transportation costs. A polynomial approximation of the considered options for placing coal in containers on railway flat wagons within a train showed an increase in operating costs due to underloading associated with the downtime of the flat wagon and container under cargo operations (loading/unloading) and transportation tariffs. Proposals have been made to reduce transport costs for container transportation of coal and other bulk cargo by rail.

Keywords: railways, container transportation of bulk cargo, integral calculation of cargo placement in a container, costs due to uneven placement.

Acknowledgments. The authors express their gratitude to I. S. Zaikin, student of Russian University of Transport for the assistance in collecting data during the study.

For citation: Kurzina, E. G., Kornienko, N. A., Kurzina, A. M. Rationale for Transport Costs when Transporting Bulk Cargo in Containers with the Integral Method. World of Transport and Transportation, World of Transport and Transportation, 2023, Vol 21, Iss. 6 (109), pp. 295–300. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-6-15>.

The text of the article originally written in Russian is published in the first part of the issue.

Текст статьи на русском языке публикуется в первой части данного выпуска.

INTRODUCTION

At the end of 2020, Russian export supplies of coal, as well as other bulk cargo, began to be carried out in open top containers [1]. Currently, regular transportation of hard coal is carried out from Transbaikalia to the PRC through the border crossing point Zabaikalsk–Manchuria (Pic. 1), and the share of such container transportation to China is generally 95 %. According to Russian Railways, this method allows to simplify and speed up the process of sending coal for export. The container is simply moved from the Russian flat wagon to the Chinese one¹.

Similarly, it is possible to tranship the container on road vehicles and sea vessels, which is especially important in the context of development of international transport corridors, including North–South Transport Corridor [2; 3].

The total volume of domestic container transportation is growing steadily from year to year [4–6]. This type of transportation has also been actively developing recently in the countries, with which we are connected by common transport corridors [7–9].

The advantages of container transportation of bulk cargo include:

- reduced time of border and customs control operations from 4 hours to 1,5 hours;
- acceleration of turnround of cargo wagons involved in transportation;
- reduced time of transshipment to another mode of transport (sea, road), i.e. possibility of

inter- and multimodal transportation;

- solution to the problem of frozen coal piles at border stations during transshipment from Russian rolling stock to Chinese, etc.;
- reduced load on the railway infrastructure;
- increased speed of cargo flow;
- minimisation of environmental damage.

However, despite the increase in the volume of shipments of coal in containers through the network, several issues still remain relevant [1; 10; 11]. One of the main problems is reduced net weight of cargo transported in two containers compared to one standard gondola wagon.

The *objective* of the research is to perform integral calculation of possible options of loading coal into containers and to develop suggestions to reduce transport costs of container railway transportation of coal and other types of bulk cargo.

RESULTS

Previously, coal and other bulk cargo were transported mainly in gondola wagons (Pic. 2 a). The internal volume of the gondola wagon body is 88 m³.

Currently, coal is transported in two 20-foot containers with an internal volume of 32 m³ each, installed on a flat wagon (Pic. 2 b).

Consequently, the nominal volume of transported bulk cargo in a gondola wagon is 1,375 times greater than on a flat wagon with two containers.

Statistics show that on average about 34 tons of coal are transported in one 20-foot container with a maximum capacity of 39,4 tons. Thus, the underweight is 5,4 tons. Losses in the volume of



Pic. 1. Container transportation of coal to China.

Photo of Xinhua News Agency. [Electronic resource]: https://russian.news.cn/2021-04/13/c_139878444.htm. Last accessed 30.08.2023.



a)



b)

Pic. 2. Coal transportation: a) in gondola wagons; b) in containers.
*Photos of the website of JSC Russian Railways. [Electronic resource]: <https://company.rzd.ru/ru/9407/page/68650?id=2148>;
<https://company.rzd.ru/ru/9407/page/68650?id=21273>.*

transported cargo can be associated with uneven loading and even underloading of wagons.

In this connection, it is relevant to analyse the reasons for underloading of containers with coal and the associated transportation costs.

Loading of coal on the access roads of mines and quarries into gondola wagons and containers is carried out by a rotary excavator. In most cases, loading results in formation of a «cap» on the loaded pile without subsequent levelling and compaction. The shape of the «cap» depends on the flowability of coal. In this regard, five options for loading coal into a container were considered (Pic. 4):

1. $2/3$ of the height of the container is completely filled with coal, and there is a spherical segment on top with radius $R = 1,161$ m and height $c = 0,762$ m.

2. $2/3$ of the height of the container is completely filled with coal, and there is an elliptical segment on top with semi-axes $a = 1,161$ m and $b = 1,6235$ m, height $c = 0,762$ m.

3. $2/3$ of the height of the container is completely filled with coal, and there is an elliptical segment on top with semi-axes $a = 1,161$ m and $b = 2,086$ m, height $c = 0,762$ m.

4. $2/3$ of the height of the container is completely filled with coal, and there is an elliptical segment on top with semi-axes $a = 1,161$ m and $b = 2,3485$ m, height $c = 0,762$ m.

5. The container is completely filled with coal.

Container's volume is $V = A \cdot B \cdot C = 5,902 \cdot 2,330 \cdot 2,352 = 32,34 \text{ m}^3$.

Depending on the loading options, the container's volume will be:

$$1. V_1 = V_{2/3} + V_{\text{sph}}$$

$$2. V_2 = V_{2/3} + V_{\text{ell1}}$$

$$3. V_3 = V_{2/3} + V_{\text{ell2}}$$

$$4. V_4 = V_{2/3} + V_{\text{ell3}}$$

$$5. V_5 = V,$$

where $V_{2/3}$ – $2/3$ of the container's volume, equal to $V_{2/3} = 32,34 \cdot 2/3 = 21,56 \text{ m}^3$;

V_{sph} – volume of a spherical segment of a sphere, which is found by integrating a body of revolution, given by the canonical equation of a ball with a radius of $1,161$ m, within the limits of integration from 0 to $0,762$ m;

V_{ell1} – volume of an elliptical segment of a sphere, which is found by integrating the body of revolution, given by the canonical equation of the ellipse with semi-axes $a = 1,161$ m and $b = 1,6235$ m, within the range of integration from 0 to $0,762$ m;

V_{ell2} – volume of an elliptical segment of a sphere, which is found by integrating the body of revolution, given by the canonical equation of the ellipse with semi-axes $a = 1,161$ m and $b = 2,086$ m, within the range of integration from 0 to $0,762$ m;

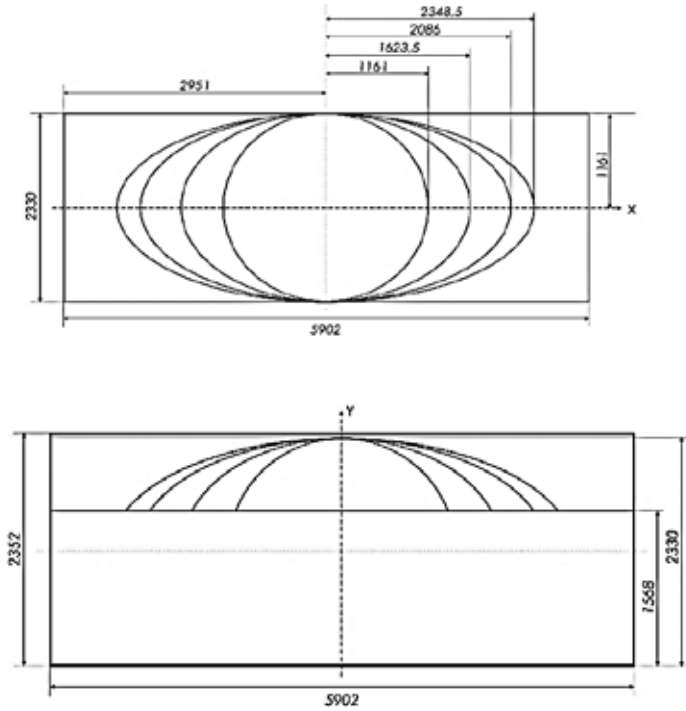
V_{ell3} – volume of an elliptical segment of a sphere, which is found by integrating a body of rotation specified by the canonical equation of an ellipse with semi-axes $a = 1,161$ m and $b = 2,3485$ m, within the limits of integration from 0 to $0,762$ m.

In the general case, the volume of a body of rotation relative to the OY axis is determined by the formula:

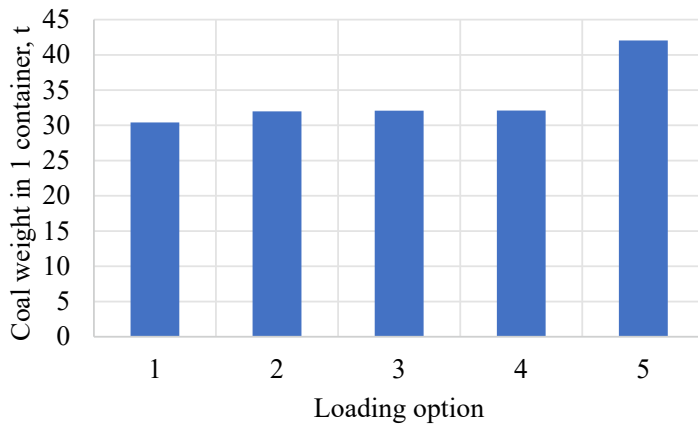
$$V_{Oy} = \pi \int_c^d x^2 dy.$$

For a spherical segment, the integrand will be $R^2 = x^2 + y^2$, and for an elliptical one it will





Pic. 3. Graphic presentation of the considered options for loading coal into a container [performed by the authors].



Pic. 5. Graphic presentation of the results of calculations of the possible loading of containers with coal with approximation by a polynomial dependence [performed by the authors].

$$\text{be } \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1.$$

$$V_{\text{sp}} = \pi \int_0^{0.762} (R^2 - y^2) dy = \pi \left(R^2 y - \frac{y^3}{3} \right) \Big|_0^{0.762}$$

$$V_{\text{es1}} = \pi \int_0^{0.762} a^2 \left(1 - \frac{y^2}{b^2} \right) dy = \pi \left(a^2 y - \frac{y^3}{3b^2} \right) \Big|_0^{0.762}.$$

V_{ell2} and V_{ell3} , which differ in the sizes of the semi-axes b , are calculated similarly.

The results of calculations of the volume of transported cargo are presented in table 1.

The calculation results showed that the volumetric underload of containers can range from 7,64 m³ to 8,94 m³.

If we take the average density of coal $\rho_c = 1,3$ t/m³, then the weight of coal in 1 container will be $m_c = \rho_c \cdot V_c$, and the underload of the container

Table 1

Results of calculating container loading volume for five possible options
[performed by the authors]

№ of the option of loading	$V_{2/3}, m^3$	$V_{\text{сара}}: V_{\text{sph}}$ and V_{ell}, m^3	V, m^3	Volumetric underload of a container, m^3
1	21,56	$0,585\pi$	23,40	8,94
2	21,56	$0,971\pi$	24,61	7,73
3	21,56	$0,993\pi$	24,68	7,66
4	21,56	π	24,70	7,64
5	-	-	32,34	-

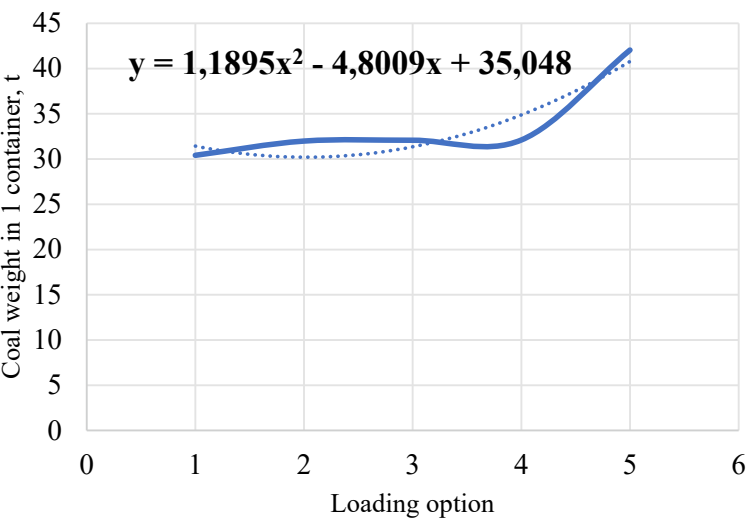


Рис. 6. Графическое представление результатов расчетов возможной загрузки контейнеров углем с аппроксимацией полиномиальной зависимостью [выполнено авторами].

by weight will be $\Delta m_c = m_c - m_{c1}$. The results of calculating the underload of containers by weight are shown in Table 2 and Pic. 4.

Consequently, the weight underload of coal in one container according to the considered options can range from 9,932 tons to 11,622 tons.

If the weight of coal according to possible loading options is described by a polynomial relationship (Pic. 5), then the weight of coal in five containers can be found as the area of a curvilinear trapezoid. In this case, the weight of coal in five containers will be:

$$M_5 = \int_0^5 (1,1895x^2 - 4,8009x + 35,048) dx =$$
$$= \left(1,1895 \frac{x^3}{3} - 4,8009 \frac{x^2}{2} + 35,048x \right) \Bigg|_0^5 = 164,79$$

It should be noted that with a full load of five containers (option 5), the transported weight of coal will be 210,21 tons.

If, for example, it is necessary to transport 1050 tons of coal, then at maximum load 25 containers will be used, and at underload – 32

Table 2

Results of calculating container loading in tons for five possible options
[performed by the authors]

Number of loading option	Coal weight in 1 container m_c, t	Container underload $\Delta m_c, t$
1	30,420	11,622
2	31,993	10,049
3	32,084	9,958
4	32,110	9,932
5	42,042	-



containers, which will significantly increase the costs associated with idle time of the flat wagon and container under cargo operations (loading/unloading) and tariffs for transportation, by up to 25 %.

Thus, to reduce the costs associated with the cost of increased number of open top containers to transport a given mass of coal with its uneven placement, it is necessary to introduce the operation of levelling and compacting the cargo in the container. There are special rollers intended for levelling bulk cargo in gondola wagons but it is necessary to create such devices for containers as well.

It should also be noted that in order to increase the carrying capacity and speed of movement of flat wagons transporting containers, developments are currently underway to create high-speed six-axle platforms that will allow transportation of a larger number (three pieces) of open top containers, thereby bringing the comparable volume of transported cargo to the volume transported by gondola wagons (quite naturally assuming that containers will be uniformly and fully loaded).

Increasing the speed of movement of flat wagons, as well as the possibility of thermal insulation of containers, helps solve problems of coal freezing, thus making the implementation of such developments a very urgent task.

REFERENCES

1. Transportation of coal and other bulk cargo in containers: new versatility or new difficulties [*Perevozka uglya i drugikh nasypnykh gruzov v konteynerakh: novaya universalnost ili novye slozhnosti*]. Information agency «RZD-Partner.RU». – 19.03.2021. [Electronic resource]: <https://www.rzd-partner.ru/zhd-transport/comments/perevozka-uglya-i-drugikh-nasypnykh-gruzov-v-konteynerakh-novaya-universalnost-ili-novye-slozhnosti/>. Last accessed 10.09.2023.
2. Karlov, A. V. Decision-Making Methods in Transport Policy: a Multi-Criteria Approach. *World of Transport and Transportation*, 2023, Vol. 21, Iss. 1, pp. 172–179. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-1-4>.
3. Kurenkov, P. V., Belozero, V. L., Malysheva, O. V., Ellaryan, A. S., Akhtonov, V. I. Multimodal delivery of goods

from Russia to Iran and India along the North-South transport corridor [*Multimodalnaya dostavka gruzov iz Rossii v Iran i Indiyu po transportnomu koridoru «Sever-Yug»*]. *Transport: science, technology, management. Scientific information collection*, 2020, Iss.3, pp. 15–23. EDN: WFESMB.

4. Khatyanov, A. A. A task of strategic importance [*Zadacha strategicheskogo znacheniya*]. *Zheleznodorozhnyi transport*, 2020, Iss.5, pp. 20–25. EDN: DVQLAQ.

5. Astvatsaturova, K. V., Kazakova, N. A. Forecast of the influence of the railway container transportation market on the GDP of the Russian Federation [*Prognoz vliyaniya rynka zheleznodorozhnykh konteynernykh perevozok na VVP Rossiiskoi Federatsii*]. *Finance: theory and practice*, 2022, Vol. 26, Iss.6, pp. 6–16. EDN: CBADYJ.

6. Fedotov, A. N., Maltsev, K. S. Organization of commercial work in the field of container transportation on railway transport [*Organizatsiya kommercheskoi raboty v sfere konteynernykh perevozok na zheleznodorozhnom transporte*]. In: Activation of the intellectual and resource potential of regions. Proceedings of IV All-Russian scientific and practical conference: in 2 parts. Sc.eds N. N. Danilenko, O. N. Baeva. Irkutsk, Baikal State University, 2018, pp. 100–103. EDN: YKUIYH.

7. Kuanyshbaev, Zh. M., Rakhmetova, R. Level of containerization in Kazakhstan and in the world. In: Current problems of transport and energy: ways of their innovative solutions. Proceedings of X International Scientific and Practical Conferences. Comp. G. T. Merzadinova, T. B. Suleimenov, T. T. Sultanov. Nur-Sultan. – Astana, Eurasian National University named after L. N. Gumilyov, 2022, pp. 42–44. EDN: EIAYLG.

8. Namzhilova, V. O. The importance of border checkpoints for goods of Inner Mongolia for development of cross-border relations of the PRC [*Znachenie pogranichnykh punktov propuska tovarov vnutrennei Mongolii dlya razvitiya transgranichnykh svyazei KNR*]. *Russian-Chinese studies*, 2021, Vol. 5, Iss.3, pp. 179–184. EDN: DEHHVT.

9. Rasulov, M. Kh., Ismatullaev, A. F. On the prospects for development of accelerated container transportation in Uzbekistan [*O perspektivakh razvitiya uskorennykh konteynernykh perevozok v Uzbekistane*]. *Innovative transport*, 2021, Iss.1 (39), pp. 50–54. EDN: XRYWY.

10. Chernyshova, A. V., Rustamova, I. T. Current problems and development of container transportation at the present stage [*Aktualnie problemy i razvitie konteynernykh perevozok na sovremennoy etape*]. *Innovative economics and modern management*, 2023, Iss.1 (43), pp. 46–48. EDN: DGHHVM.

11. Fedorova, N. B., Podverbnykh, A. A. Problems and prospects of container transportation [*Problemy i perspektivy konteynernykh perevozok*]. In: Management of operational work in transport (UERT-2022). Proceedings of the International Scientific and Practical Conference. Eds. A. Yu. Panychev, T. S. Titova, O. D. Pokrovskaya. St. Petersburg, PGUPS publ., 2022, pp. 145–148. EDN: NIULWU.

Information about the authors:

Kurzina, Elena G., Ph.D. (Eng), Associate Professor at the Department of Higher Mathematics of Russian University of Transport, Moscow, Russia, kurzina_elena@mail.ru.

Kornienko, Nina A., Ph.D. (Eng), Associate Professor at the Department of Higher Mathematics of Russian University of Transport, Moscow, Russia, kornienkonina67@yandex.ru.

Kurzina, Angelina M., Ph.D. (Eng), Associate Professor at the Department of Higher Mathematics of Russian University of Transport, Moscow, Russia, aekfm@mail.ru.

Article received 15.05.2023, approved 13.09.2023, accepted 17.09.2023.



**TRANSPORT
EDUCATION**

302

MIIT graduates from Kazakhstan: student years, scientific and professional achievements. History of cooperation looking for the future.



**GALLERY OF NAMES:
SERGEY YU. WITTE**

309

140 years ago, Sergey Yu. Witte published a work on railway tariffs. This date is an occasion to re-analyse his historical heritage from both theoretical and practical points of view. Final part of the article.

HISTORY WHEEL



**ORIGINAL ARTICLE**

DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-6-16>

Remembering the Scientific Alma Mater



Bakytzhan M. Kuanyshev

KazATK Engineering Center LLP, Astana, Republic of Kazakhstan.

✉ Kazproftrans@gmail.com.

Bakytzhan M. KUANYSHEV

ABSTRACT

The article of the graduate of the MIIT University, now bearing the name of Russian University of Transport is dedicated to many generations of Kazakhstanis, who graduated from the University,

their professional achievements, and to contemporary forms of cooperation contributing to the development of new generations of transport employees of Russia and Kazakhstan.

Keywords: *MIIT University, transport history, transport education, Russian University of Transport.*

For citation: Kuanyshev, B. M. Remembering the Scientific Alma Mater. World of Transport and Transportation, 2023, Vol. 21, Iss. 6 (109), pp. 302–308. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-6-16>.

The text of the article originally written in Russian is published in the first part of the issue.
Текст статьи на русском языке публикуется в первой части данного выпуска.

The President of Russian University of Transport, Doctor of Science in engineering, Professor Boris Alekseevich Lyovin passed away on June 30, 2023. Telling my colleagues about the trip to Moscow and participation in the mourning events of farewell to Boris A. Lyovin, I realised that despite the sorrowfulness of the event, MIIT graduates keep in their souls the brightest memories of the days spent at the institute. The short but familiar and meaningful to all graduates abbreviation MIIT¹ makes the hearts of many thousands of its alumni in more than 70 countries around the world beat faster. Over the years, the name of the institute has changed several times, but for us, graduates, it will forever remain known as MIIT!

Boris A. Lyovin, after graduating from MIIT in 1973, went a path from a student to the rector of his Alma mater, and here took place his formation as a of a scientist: from a Ph.D. student to a D.Sc., professor. Until the last days of his life, being the president of Russian University of Transport (the current name of the university), despite a serious illness, he continued to contribute to university's development, which allowed the educational institution to take leadership positions in transport education and science not only in Russia, but also at the international level.

Using the example of MIIT graduates from Kazakhstan, in this article I would like to tell how national scientific specialists were trained as part of the training of engineering personnel for the Union republics during the Soviet period. Ph.D. school and doctorate at MIIT, subsequently transformed, with the direct participation of Professor B. A. Lyovin, into the Industry's Centre for Training of Scientific and Pedagogical Personnel, provided targeted training of highly qualified scientific personnel for all universities and research institutes of railway transport of the Soviet Union and in so called socialist-oriented countries. This work was continued in the post-Soviet period.

The University, having become an active participant in federal priority projects in the field of education and science, continues to be the coordinator of scientific, educational and methodological activities of transport universities and scientific organisations of the CIS.

¹ Abbreviation is derived from Russian spelling of Moscow Institute of Transport Engineers and has been unchanged for many years regardless of the official full name of the institute and then university. – Ed. note.

During the Soviet period, several thousand students from Kazakhstan studied at MIIT in different years, who then formed the backbone of the engineering, technical and economic departments, divisions and services of the Turkestan-Siberian, Karaganda, Kazakh, and subsequently Alma-Ata, West Kazakhstan and Tselinnaya railways. Only in 1965, more than a hundred students from Kazakhstan studied at MIIT in different faculties and courses, part of these students of 55 people on the group vignette is presented in Photo 1. Behind each person in this photo, you can see smart, purposeful, handsome 20–25-year-old boys and girls who have a whole life ahead of them, full of trials and errors, successes and failures... But in the eyes of everyone there shines intelligence and a desire to benefit society! Among them are future engineers, plant directors, heads of stations, depots, track maintenance sections, heads of railway departments, heads of various railway divisions, researchers, associate professors and professors of institutes. I hope that this group photograph will find its place and a worthy description in the museums of MIIT and the Kazakhstan Railway.

After the collapse of the Soviet Union, the national railway company Kazakhstan Temir Zholy JSC, the successor to three railways of Kazakhstan, the successor to three railways of Kazakhstan, continued training engineering and scientific personnel at MIIT.

Graduates of MIIT, employees at different railway departments, be it locomotive, wagon, track, traffic control, freight, power supply, bridge, communications, signalling, economic departments and facilities employees, have always differed from other graduates of transport universities in their deep theoretical and engineering knowledge conjugated with practical



Photo 1 [provided by the author].



operational and technical skills acquired as a student during educational and industrial internships. MIIT graduates of 1930–1960 include such chief executive officers, executives, managers as:

Radoman, Iosif Antonovich (1934 – hereinafter the year of graduation is indicated in parentheses), head of the track division of the Turkestan-Siberian railway in 1945–1949;

Manasov, Tolegen Mustafeevich (1936), deputy head of the Turkestan-Siberian railway in 1938–1943;

Bostanov, Abdulkерim Suleymanovich (1938), head of the wagon division of the Kazakh railway in 1969–1976;

Moroz, Vladimir Ivanovich (1940), head of the logistics division of the Kazakh railway. in 1958–1969;

Timofeev, Petr Timofeevich (1946), head of the Ural branch of the Orenburg railway in 1946–1955;

Bikbulatova, Nurezigan Mirgalievna (1946), deputy head of the planning and economic division of the Kazakh railway in 1963–1977;

Pushkov, Trofim Timofeevich (graduation year unknown), head of the Karaganda branch of the railway in 1951–1957;

Shamshina (Kobzhassarova), Faina Vasilievna (1948), director of the Aktobe branch of Alma-Ata institute of railway transport engineers (AIIT) in 1977–1980;

Charykov, Vladimir Timofeevich (1949), head of the labour, wages and safety division of the Kazakh railway in 1963–1975;

Rubinshteyn, Bertran Iosifovich (entered MIIT in 1940, in 1941, interrupting his studies, went to the front, after the war he graduated from the institute in 1950), from 1960 to 1993 he worked as the head of the Kustanai branch of the railway;

Kulenova, Fatima Kulenovna (graduation year unknown), head of the passenger division of the Kazakh railway in 1958–1971;

Bektasov, Shakhman Abdrakhmanovich (1950), director of the Alma-Ata Low-Voltage Equipment Plant in 1966–1988;

Stepanov, Sergey Dmitrievich (graduation year unknown), head of the Pavlodar branch of the railway in 1954–1958;

Rodionov, Robert Alekseevich (1951), deputy head of the locomotive division of the Kazakh railway in 1958–1965;

M u k h a m e d g a l i e v , L u k p a n Mukhamedgalievich (1953), deputy head of the

traffic control division of the Kazakh railway in 1971–1975;

Prmanov, Baizak Prmanovich (1953), head of the Kurort-Borovsky (1948–1950) and Atbasar (1953–1958) branches of the railway;

Khasenov, Satybay Khasenovich (1953), head of the Zhan-Arkinsky branch of the railway in 1948–1958;

Zhakishev, Temirgali Zhakishevich (1954), head of the cargo division of the Tselinnaya railway in 1977–1992;

Dolgoplov, Konstantin Konstantinovich (1955), head of the Tselinograd contract division in 1966–1972;

Iskakov, Gafut Nurlykhanovich (1955), head of the labour, wages and safety division of the Tselinnaya railway in 1977–1987;

Shiryaev, Anatoly Ivanovich (1961), deputy head of the Alma-Ata railway in 1987–1992;

Dzhumabaev, Serik Shagirovich (1962), chief engineer of the electrification and energy division of the Alma-Ata railway in 1971–1977.

This is far from a complete list of graduates from Kazakhstan who studied at MIIT in the 30–60s of the last century. Through the lines of this article, we appeal to the children and grandchildren of MIIT graduates with a request to provide the author or to mail to the editors information about their fathers and grandfathers, about their work and scientific activities.

About each of these railway employees, it is possible to write a separate article or even a book about the selfless work that laid the foundation for formation and development of the railway industry in Kazakhstan. First, the engineering skills of these people are based on the knowledge acquired at MIIT, organisational skills were developed during practical training and internships, work in Komsomol organisations, student construction teams and, of course, due to the close-knit student friendship in these half-starved times!

As an example, we can cite the history of student friendship established at MIIT in the post-war years between Shakhman Abdrakhmanovich Bektasov, former director of the Alma-Ata Low-Voltage Equipment Plant, and D.Sc. (Eng), MIIT Professor Vladimir Nikolaevich Pupynin, former head of the Department of Railway Energy Supply. They studied in the same group at MEIIT² from 1945

² Moscow Operational Institute of Transport Engineers intended to train engineers responsible for rail operations. – Ed. note.

to 1950, were assigned to different stations, but always kept in touch with each other and consulted on innovations in the electric power industry. Evidence of such relationships, established during wonderful student times, is a photograph (Photo 2) shot at the May Day demonstration in 1947 near Red Square (friends standing next to each other). They maintained close relations for more than half a century. Moreover, when choosing a profession for his nephew, Shakhman Agha insisted that he choose the specialty of electrician. We are talking about Bektasov's own nephew, Marat Sharipovich Shmanov, who entered MIIT's Faculty of Railway Electrification in 1961, graduated with honours in 1966 and was one of the first mechanical engineers of the electric locomotive industry in Kazakhstan. Marat Shmanov is one of those modest engineers who were not awarded state awards, but who stood at the origins of the electrification of the railways of Kazakhstan. Hundreds of such examples of student friendship and subsequent professional communication can be cited by graduates of our institute.

In subsequent years of dynamic development of the railways of Kazakhstan, graduates of MIIT of 1960–1990 made their engineering contribution to its development: Marat Sharipovich Shmanov, Karazhan Embergenovich Aydarkulov, Orman Kalymzhanovich Shudanov, Bolatbek Asimovich Moldasaliyev, Umbet Ayapov, Mynuar Kalmurzaev, Kambar Koruspayev, Kuanysh Rakhimovich Bazilov, Bolatbek Bekeuovich Dyusemaliev, Mukan Primbetov, Minuar Tursynbekovich Kalmurzaev, Kabdolda Bekzhanov, Marat Rakhimberlovich Dzhumabaev, Toyken Musaevich Kangereyev, Bekbolat Dosaev, Malik Myrzagalievich Kuderbekov, Nurlan Iskenderovich Altaev, Dyusenbay Tokimovich Almusin, Murat Utepbergenovich Zharilkaganov, Meiramaly Nuskenovich Uzenbaev, Anuarbek Sarsenovich Sagatov, Nurzhan Talipovich Baydauletov, Karlygash Sadykovna Shokanova, Lenat Nikolaevich Rakhmatullin, Kaipbek Akhmetov, Sagyndyk Gabdel-Nagimovich Gabdsattarov, Duisenbek Abdrambaevich Amanbaev, Tilek Gabdel-Nagimovich Gabdsattarov, Alizhan Tokbanovich Zakarin, Almasbek Yesenalievich Uikasbaev, Sansyzbai Seitanov, Kozhakhmet Nalibaev, Ukilya Gabdel-Nagimovna Gabdsattarova, Khalzhan Tashpolatovich Omarov, Serik Izmuhanovich Baytaev, Batyr Kuanyshevich Kotyrev, Erzhan Temirgalievich



Photo 2 [provided by the author].

Zhakishev, Alexander Hon, Zubaida Abdrasilovna Aspaeva, Sania Amanchina, Madina Gabdel-Nagimovna Gabdsattarova, Kabak Karazhanovich Aydarkulov, Zhanat Seyfulovich Ibraimbaev, Tyulbas Minuarovich Kalmurzaev, Turarbek Kurishbekovich Artykbaev, Mukhambet Anuarbekovich Sabetov, Shyngys Maratovich Daribaev, Asankhan Utenov, and many, many other engineers.

All these graduates rightfully called MIIT their Alma mater, who gave them a professional start. When alumni met, they remembered with trepidation and pride the rectors of the institute, Fyodor Petrovich Kochnev, Ivan Vasilyevich Belov, Vladimir Grigorievich Inozemtsev, Boris Alekseevich Lyovin, memorable especially demanding teachers, heads of MIIT departments.

I would like to mention some other MIIT graduates.

Temirgali Zhakishevich Zhakishev graduated from the faculty of «Operation of Railways» in 1954, worked on the Tselinnaya railway as a head of the cargo division, his son Erzhan Zhakishev graduated from the same faculty in 1994, took over from his father at the Tselinnaya railway, and then at the national company Kazakhstan Temir Zholy. Erzhan Zhakishev's son Meras, now a fifth-year student at the Institute of Management and Digital Technologies, is currently on operational practice and plans to continue the Zhakishevs' labour dynasty at the railway in 2024. The grandson of Temirgali Agha, son of his daughter, Aidar Kadyrov graduated from MIIT in 2018, and now works in Moscow at JSC United Transport and Logistics Company – Eurasian Railway Alliance (UTLC ERA).

Karazhan Embergenovich Aydarkulov, a graduate of the Faculty of Engineering and Economics of MIIT in 1966, worked for a long time in the locomotive depots of the stations



Emba, Chelkar, at the West Kazakhstan Railway headquarters, his son Kabak Karazhanovich Aydarkulov graduated from MIIT in 1991 with a specialty, which is rare in Kazakhstan, «Locomotive Machine Engineering», and now also works on the railway.

Minuar Tursynbekovich Kalmurzaev, a graduate of the operational department of MIIT in 1966, worked for a long time at management positions at the Kazakh and Alma-Ata railways, then as the First Deputy Head of the Alma-Ata branch of the railway. His son Tulbas Kalmurzaev graduated from MIIT in 1991, worked in the system of JSC NC Kazakhstan Temir Zholy, his son Samir Kalmurzaev and daughter-in-law Diana Kalmurzaeva graduated from MIIT in 2015, his second son Minuar in 2020, Kalmurzaev's nephews Beknur and Rustem Kalmurzaev – in 2019 and 2020, respectively.

Nurzhan Talipovich Baydauletov, a graduate of MIIT in 1986, began his career in 1986 as a yardmaster, station duty officer at the Ekibastuz station of the Tselinnaya railway. Over the years, he held the positions of head of the Pavlodar branch of the railway, head of the Akmola railway, director of the Railway transport department of the Ministry of Transport and Communications of the Republic of Kazakhstan, Vice-Minister of Transport and Communications of the Republic of Kazakhstan, Chairman of the Board of Directors of JSC NC Kazakhstan Temir Zholy. He met his wife, Karlygash Sadykovna Shokanova, also a MIIT graduate, and started a family during their years of studying together at the institute.

From only one family, that of the director of the railway school Gabdel-Nagim Gabdsattarov and the teacher Tursyn Gabdsattarova from the Shubar-Kuduk station in the Aktobe region, which is rather far from Moscow, four of their children entered and graduated from MIIT in three engineering specialties: Sagyndyk Gabdsattarov (1987), Tilek Gabdsattarov (1989), Uakil Gabdsattarova (1992) and Madina Gabdsattarova (1994).

After 2000, Ainur Kuanysheva, Aizhan Bakaeva, Bauyrzhan Kazimbetov, Olzhas Akhmetov, Ardak Kazimbetov, Gulbanu Abdikerimova, Beket Akpan, Nurgul Kuanysheva, Gaukhar Bakaeva, Samir Kalmurzaev, Dina Kalmurzaeva, Aidar Kadyrov, Salima Kadyrova, Alexey Chernay, Aitpay Salikov, Birzhan Mukaev, Erbol Mukaev, Rauan Igembayev, Ilya Nekhodtsev, Erlan Ayupov, Almas

Tleukhanov, Dmitry Manuilov, Nurlan Maldynov, Zhylkaidar Zhumanov, Nursultan Bektas, Meirbek Bayjanov, Damir Khamitov, Adil Smagulov, Beknur Kalmurzaev, Zhumagul Kudiyarova, Arsen Turgumbayev, Rustem Kalmurzaev, Ruslan Guseinov, Olzhas Zhunisbek, and others entered the list of MIIT graduates.

The new generation of railway engineers from MIIT continues the work and traditions of the older generation in development of transport and logistics potential and establishment of transport engineering in the independent state. Many of them successfully work in joint ventures in Kazakhstan with participation of such large foreign companies as General Electric, Alstom, Siemens, Wabtec, Talgo, China Cosco Chipping, UTLC ERA, etc.

Professional scientists believe that Alma mater is not only the institute where they studied, but also the one where they began and developed their scientific activities. MIIT was and is to this day a forge of scientific and pedagogical personnel, therefore scientific specialists who have completed postgraduate and doctoral studies and defended candidate and doctoral dissertations in scientific councils also consider the university to be their Alma mater. Many graduates of the institute, after receiving engineering diplomas and having worked in the industry, then entered graduate school at MIIT to develop their scientific qualifications.

During the Soviet period, all research, design and survey activities on the railways in Kazakhstan were carried out under the supervision or with participation of all-Union research institutes. On three Kazakhstan's railways, engineering and research work was carried out by employees of railway design institutes and design bureaus. More significant projects, for example, organisation of operation of heavy trains on the Ekibastuz–Tselinograd section in 1985–87, were carried out under the leadership of scientists from Moscow. A group of scientists from VNIIZhT and MIIT under the leadership of the rector of MIIT, D.Sc. (Eng), Professor V. G. Inozemtsev developed the control system, traction, and braking processes in these trains and participated in the first trip of a super-heavy train weighing 43 thousand tons (6,5 km long) on February 19, 1986, from the station Ekibastuz. These scientific experiments and communication between scientists during the testing process encouraged local engineering

personnel to develop their own scientific potential. The former head of the Tselinnaya railway Nigmatzhan Kabataevich Isingarín, who prepared and defended his dissertation as a candidate [Ph.D.] of economic sciences under the guidance of MIIT professors V. A. Dmitriev and A. D. Shishkov was the first to set such an example.

The urgent need for broad and high-quality training of highly qualified scientific personnel increased with the opening of the Alma-Ata Institute of Railway Transport Engineers (AliIT) in 1976. Increasing cargo and passenger transportation on three Kazakhstan's railways, coordination of interaction at the junctions with neighbouring railways required appropriate scientific research and development of recommendations. The training of students at the institute was to be carried out by trained scientific and pedagogical specialists with relevant academic degrees, which were sorely lacking in Kazakhstan.

Therefore, within the framework of the targeted training program and agreements between MIIT and AliIT in the 1970–1980s, the following persons from the Republic were selected, trained and defended their Ph.D. theses: Aldanysh Nurumov, Galina Shilina, Anuarbek Sabetov, Bolat Ospanov, Onlasyn Maulenov, Aigul Burambaeva, Ramazan Nurgaliev, Murat Kukeev, Vladislav Klenov, Amangeldy Malgazhdarov, Serik Khasenov, Vladimir Sokaev, Valery Igin, Sugirali Sarbaev, Bolat Kobzhasarov, Saule Bekzhanova, Sarakul Ismagulova, Satpay Kabakbaev, Elena Khristovskaya, Bolat Zhardemov, Serzhan Shudanov, Zhaksylyk Askarov, Anarkhan Kurazov and the author of these lines.

It is noteworthy that from the Aktobe branch of AliIT alone, more than 12 people studied at MIIT graduate school in the period from 1982 to 1992, and this was thanks to the efforts of the director of the branch, a graduate of MIIT graduate school in 1980, Anuarbek Sabetovich Sabetov.

In the period from 1995 through 2000 at MIIT, after full-time doctoral studies, Kazakhstanis defended four doctoral dissertations (B. M. Kuanyshev, B. B. Zhardemov, A. K. Omarbekov, V. N. Igin) in different councils empowered to accept dissertations. The dissertations examined various topical scientific problems of the railway industry of Kazakhstan, ranging from studies of modelling the process of

failures and restoration of rolling stock equipment in real operating conditions, factor planning to determine the norms and boundaries of fuel consumption regulation based on stochastic optimisation of nominal fuel consumption for traction of trains to analysis of conditions of railway stations and nodes for stability of processes of self-organisation and management in the structure of developing railway stations and nodes.

Separately, it is necessary to talk about graduates who graduated from MIIT, worked on the railway, then returned to Alma mater to obtain scientific qualifications. We are talking about D.Sc. (Economics), Professor Aldanysh Arystangalievich Nurumov, graduate of the Faculty of Engineering and Economics (1965), graduate school (1973); Ph.D., Associate Professor Serzhan Ormanovich Shudanov, graduate of the Faculty of Civil Engineering (1994), graduate school (1997). Serzhan's father, Orman Kalymzhanovich, also graduated from MIIT in 1969, and worked his way up in the track division from a foreman, a master to the head of the track section of the station Chelkar of the West Kazakhstan Railway and worked as the head of the track section for 28 years before retiring. For his work on the railway, he was awarded the Order of the Red Banner of Labour, the Badge of Honor, a few medals, and the «Honorary Railwayman» badge. It is very remarkable that the son continued the galaxy of MIIT students at a new level.

MIIT had such a wonderful aura that young people met there, became friends, fell in love and started families. So, Vladimir Tembulatovich Sokaev and Larisa Mikhailovna Jumok from Irkutsk, who came to graduate school from Aktyubinsk, got married, defended their theses and went on assignment, having received the blessing of the head of graduate school B. A. Lyovin, to the Aktobe branch of AliIT.

I, who underwent a scientific internship, studied in full-time graduate school and attended doctoral studies, and worked at MIIT in the period from 1986 to 1998, also remember the names of my mentors, who gave me a start in science and determined the direction of scientific activity. This is D.Sc. (Eng), Professor Igor Petrovich Isaev, head of the Department of Electric Traction, D.Sc. (Eng), Professor of the same department Anatoly Vladimirovich Gorsky, his student, D.Sc. (Eng), Professor Alexander Alekseevich Vorobiev. I defended my doctoral



dissertation in the new dissertation council 08.00.28 dedicated to «Organization of production (technical sciences)», organised in 1998 under the chairmanship of Boris A. Lyovin. On the part of the MIIT scientific community, I was given great confidence to be the first to present scientific work to this council.

Naturally, my daughters also studied at MIIT: Ainur Kuanysheva graduated from the operational department, Aigul Kuanysheva graduated from the MIIT gymnasium and entered the Faculty of Engineering and Economics. My wife, Zhanyl Kuanysheva, during the period of my studies and work at MIIT, worked at the teaching staff division of MIIT human resources department.

Three young people from Kazakhstan (Aigul Kuanysheva, Nurgul Kuanysheva, Beket Akpan) in 2008 entered the MIIT school-gymnasium organised in 2003 (director Galina Ivanovna Loginova), based on the results of final gymnasium exams they entered MIIT. Subsequently, two of them graduated with honours from the institute and work in the railway industry.

Separately, I would like to write about cooperation in the post-Soviet period between MIIT and the Kazakh Academy of Transport and Communications (KazATK) in training of scientific and pedagogical personnel. In accordance with the agreement on scientific cooperation between two educational institutions, in the period 2006–2019, more than 50 people studied full-time graduate and master's programs at MIIT. Only in 2006–2010, 17 people from KazATK arrived at MIIT for full-time graduate studies, of which 14 graduate students successfully defended their theses on time. The painstaking work of training, carrying out scientific work with the completion of dissertation research took place thanks to the control and tireless support of Kazakh graduate students personally from the rector of MIIT, Professor B. A. Lyovin and the heads of specialised departments.

The topics of dissertation research touched upon the state of reliability analysis, train traffic

safety, optimal operation of the track and rolling stock, automation devices, signalling systems, signalling and communications, taking into account the digitalisation of the industry, and many other scientific issues using the example of technical devices and facilities of railway enterprises in Kazakhstan.

To expand cooperation, in 2015, within the framework of international academic mobility, an agreement on double-degree training of master's students was signed between two universities. Senior students of KazATK, who studied according to mutually agreed upon curricula in Almaty, after studying during a semester in Moscow and defending master's theses at the relevant specialised departments, obtained MIIT diplomas. Unfortunately, close ties between two universities were reduced due to privatisation of KazATK. I hope that the industry's need for qualified personnel will require continuation of this cooperation.

In Kazakhstan, there is a large category of people who, having received professional scientific and technical knowledge and education at MIIT, have become competent engineers and scientists, and continue to work for the benefit of the industry. This basic knowledge allowed many of them to achieve professional and career growth. The high title of a MIIT graduate imposes enormous responsibility on everyone when performing professional duties and gives them pride when achieving results. In the soul of each of them there is a glowing light, lit in Alma mater, which is carefully stored in memory and passed on to the next generation of Kazakhstani railwaymen.

On behalf of all generations of MIIT graduates from Kazakhstan, I express my deep gratitude to our living mentors from MIIT, let us remember the teachers who have passed away. The bright memory of them lives in the hearts and memories of tens of thousands of their students from Kazakhstan.

We wish the current generation of managers, teaching staff, employees, and students of our Alma mater success and prosperity in educating a new generation of MIIT students! ●

Information about the author:

Kuanyshev, Bakytzhan M., D.Sc. (Eng), Professor, Scientific Director of the project of KazATK Engineering Centre LLP, Astana, Republic of Kazakhstan, Kazproftrans@gmail.com.

Article received 06.09.2023, approved after reviewing 23.10.2023, accepted 27.10.2023.



S. Yu. Witte – Originator of Railway Tariffs Theory. Part 2



Dmitry Yu. Levin

Chief expert, JSC NIIS, Moscow, Russia.

✉ levindu@yandex.ru.

Dmitry Yu. LEVIN

ABSTRACT

Exactly 140 years ago, the most famous, in our opinion, work by Sergei Yu. Witte «Principles of railway tariffs for transportation of goods» was first published. It is difficult to overestimate the importance of this book. Our regular author, a well-known scientist, D. Sc. (Engineering), Academician of the Russian Academy of Natural Sciences Dmitry Levin, decided to share his thoughts after a new reading of this work, which has not yet lost its relevance. The encyclopaedic views of S. Yu. Witte may be of interest both to economists and to sociologists, philosophers, scientists, and specialists in the theory of public administration. Many of S. Yu. Witte's judgments have not lost their scientific, theoretical and practical significance to this day and in this sense turned out to be prophetic. They also regard the competition of rail transport with water and land transport (then it was horse-drawn haulage, but now it can be easily substituted in the judgments with road transport), the need for a clear correlation of any economic models with national

interests, the requirements of a particular historical stage, the harmfulness of blind use of schemes borrowed from outside without considering the socio-political and economic context.

The methodology for constructing prices for transportation of goods, set out by S. Yu. Witte is not only of historical interest (especially in conjunction with the reviews and discussions that accompanied the appearance of his book), but remains important for the modern solution of newly arising issues of improving the tariff system under market transition. Not least of all, the methodology is connected with the cardinal question that arose even then: whether railways should be a natural monopoly or a commercial structure – a debate that continues today.

This issue publishes the second, final part of the article, which contains the author's own conclusions and proposals regarding the possible transformation of S. Y. Witte's ideas regarding solution of modern transport and tariff problems.

Keywords: S. Yu. Witte, railway, cargo transportation, railway tariffs.

For citation: Levin, D. Yu. S. Yu. Witte – Originator of Railway Tariffs Theory. Part 2. World of Transport and Transportation, 2023, Vol. 21, Iss. 6 (109), pp. 309–320. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-6-17>.

The text of the article originally written in Russian is published in the first part of the issue.
Текст статьи на русском языке публикуется в первой части данного выпуска.

Witte divided the current tariff systems into two categories. He called one «historical», providing for different freight charges depending on the distance and weight (or volume) for different types of goods, i.e., less valuable goods are subject to lower freight charges. He called another system «natural», independent of the name of the goods, in which the freight charge is determined depending on the distance and density of the goods.

A deep knowledge of the subject is evidenced by the remark of S. Yu. Witte: «The system of «natural» tariffs turned out to be not only impractical, but also created a type of speculation. Since the mentioned system determines the freight price by piece (from 100 kg), by half-car (from 5000 kg) and by car (from 10000 kg), it makes no difference what kind of goods are loaded, and since the freight price for piece shipments is higher than for half-loaded cars, and for half-loaded cars is higher than carload, then as a result the matter of forwarding a mass of goods passed into the hands of commission agents and forwarders. Commission agents [brokers] collect from manufacturers and cargo owners their shipments, form lots of shipments of goods from these shipments, and then send the collected goods at half-car and carload rates».

The carload tariffs of the «historical» system, ineptly established, also provide some scope for speculation by commission agents, but this field is incomparably narrower, since in these tariffs the loading of goods of only one kind in a car is allowed, precisely designated in the tariff itself, as a result of which commission agents are already deprived of the opportunity to do mixtures of all kinds of items.

Considering the impact of operating costs on freight charges, Witte notes that it is quite significant. Often the railway's own interest is to reduce freight prices. In general, production cannot sell its goods below cost, but, nevertheless, in practice one can see exceptions to this rule. This is done when the loss from the reduction against the cost of production pays off or will undoubtedly pay off in the near future with income from another item of transportation. Such examples with soap, beets, wine and coal were given earlier. Such action by the railway may benefit commerce and industry without any injury to the interests of the railway.

Sergei Witte disagreed that the freight charge should correspond to operating costs and insisted that it should be regulated by supply and demand but should not be lower than production costs.

Moreover, the operating costs caused by transporting goods at this tariff are not known.

Witte, as a spokesman for the ideas of realistic economics, clearly identified three schools that were dominant at that time: classical political economy, the school of realistic economics and socialist economics, giving clear preference to realistic, or national, economics. At the same time, he criticised the one-sidedness or fallacy of other schools.

Highlighting the advantages of the realistic school, S. Yu. Witte expresses four interconnected and complementary considerations.

The first one. He considers the classical school «cosmopolitan» because it directly connects humanity and the individual and gives its laws a physical or «supra-social» character. At the same time, «it loses sight of the fact that between the individual and humanity there is also a special economic unit – the nation. This unit is something organically whole, connected by faith, distinctiveness of the territory, blood, language, literature and folk art, morals and customs, state principles and institutions, the instinct of self-preservation, the desire for independence and progress, etc. These units were not invented by human imagination or whim, but were formed historically, by nature itself and the laws of society. They constitute a necessary condition for universal human development».

The second one. In accordance with this thesis, realistic economics interprets the laws discovered differently than the classical school, including the law of supply and demand. «Realists do not elevate the law of supply and demand into a physical law, but reserve for it the meaning that it actually has, that is, an economic meaning. They point out that this law is not a consequence of the universe, but of the existing organisation of human societies. Therefore, realists recognise the possibility of modifications in the manifestations of the law of supply and demand in accordance with various features of social organisation».

The third one. With this interpretation of economic laws by the realistic school, «its characteristic scientific feature lies in its recognition of the relativity of organisation of the national economy, which must be consistent with time, place and all social conditions of a given society». In other works, Witte clarifies the names of individual historical stages, but clearly establishes their sequential connection. In the development of the economy of modern cultural peoples, «one notices a pattern that all these peoples, starting from the stage of trappers, gradually experienced the

following stages of development; shepherd life; so beautifully depicted in the Bible; agricultural life, always associated with the development of crafts; and industrial and commercial life, characterised by the development of manufactories, factories, plants and a strong expansion of domestic and foreign trade».

The fourth one. As a result, in contrast to the theory of value (cost), which the classical school considers as the basis of all its doctrines, realistic, or national, economics puts the theory of productive forces in the foreground. In accordance with this, expenditures on education, justice and defence are considered here as productive, because, according to Friedrich List, «destruction of values is carried out for the benefit of strengthening productive forces».

The provisions considered provide a reliable key to explaining the actions and decisions taken by Witte and allow us to trace their connection with the foundations of his economic views. To this it is necessary to add another distinctive feature of his views – awareness of the features and methods of state regulation of the economy in general and in Russia in particular. This understanding is largely due to his inherent commitment to an enlightened monarchy and the mechanism for carrying out the tasks facing it.

Sergei Witte, as a supporter of state regulation of the economy, speaking out against the principles of the classical school on complete non-interference of the state in the economic life of citizens, simultaneously speaks out against the enslavement of people preached by the school of state socialism in the name of protecting their rights to a certain material well-being.

In relation to Russia, Sergei Y. Witte adheres to a fairly strict logic related to his previous reflections about the stages of economic development of peoples. What is good in one environment may be dangerous and harmful in another. «History shows», he emphasises, «that the successive transition of nations to the last of these stages of their development is best accomplished through free trade with more cultured nations, but establishment in the country of a more or less perfect manufacturing industry, creation of a significant national fleet and development of worldwide trade nowhere has it been achieved and cannot be achieved except through state assistance. This assistance is expressed by establishment of a protectionist system consisting of customs duties, various bonuses, etc. Without a protectionist system, no country has yet passed from an agricultural state to a state of significant



development of manufacturing industry, national fleet and world-wide trade».

Here the principle described above is implemented (in relation to the law of supply and demand), according to which economic laws operate not in a general, abstract form, but considering specific historical conditions and the characteristics of a country's stage of development. S. Yu. Witte backs up his reasoning with references to the experience of other countries and an analysis of the characteristics of Russia, which, due to the scale of its territory, the multinational and diverse composition of the population, and the predominantly agricultural stage of development, requires clear state regulation of the economy.

Witte considered it impossible to base railway tariffs other than on the law of supply and demand, which governs all economic relations. To confirm this thesis, he analysed the doctrines of the then existing scientific economic schools, as he explained, «to avoid any misunderstandings and to outline as clearly and comprehensively as possible our common point of view on the tariff issue».

Further, he expresses an idea that is still relevant today: «The principles understood by the classical school should receive modifications in each nationality that correspond to its national characteristics. That is why in Germany political economy is called national economics, which is the subject of teaching in higher educational institutions. Until Russian life develops its own national economy, based on the individual characteristics of the Russian soil, we will be in the process of vacillating between fashionable teachings, being carried away alternately by one or the other; until then, we will hear from the same lips and read in the columns of the same editions logically incompatible economic judgments and projects; as long as what was created yesterday will be considered bad tomorrow, and what was destroyed



yesterday will be created today; and it is clear that until then we will not live a correct economic life, but will be towed by foreign trends and all sorts of speculation at the expense of the people's well-being».

Subjecting railway tariffs to the law, S. Yu. Witte did not exclude both manifestation of freedom and state control. State control is necessary to monitor the precise implementation of tariff laws, prevent abuse and eliminate tariffs that do not correspond to the «common good».

The freedom of railway tariffs must be controlled by publicity, which provides the greatest guarantees against possible abuses. To achieve control, tariffs must be easily accessible. Tariffs for Russian railways at that time were scattered in a mass of separate publications, which together would have amounted to dozens of volumes.

Witte proposed printing tariffs before they come into effect, and those that increase freight charges – if possible, in advance, no later than a month before they come into effect. Tariffs must be published in certain editions; where and what tariffs are published must be announced to the public.

To determine the direction of development of railway tariffs «in the interests of the common good during operation of Russian railways by the treasury», S. Yu. Witte first clarifies the question: is the operation of railways by government in Russia useful? First, foreign experience in operating railways is considered.

In America and England all railways are in private hands. In France, attempts were made to operate them by state, but in recent years, after a comprehensive discussion of the issue in parliaments and the press, they settled on the status quo, i. e. private operation, with some, and probably temporary, exceptions. In Italy, private and state operation existed and continues to exist. At one time they decided on a general buyout of the railways, but since this determination caused protests in society and the parliamentary commission, the matter also remains in the same position. In Germany, in recent years, almost all railways have been by government purchased and operated by the treasury. This operation was carried out mainly due to the political goals of unifying the young Empire at a time when, thanks to the French indemnity, the state had got significant financial resources. The timing for redemption was chosen very conveniently when, because of the temporary commercial crisis that followed the Franco-Prussian War, the profitability of private railways had fallen significantly and

when money had become significantly cheaper compared to the time when the railways were built. Many are dissatisfied with operation by government, but many find some benefits in it. The dissatisfied people are predominantly the merchant class, while its supporters are mainly landowners and officials. It is quite difficult to rely on the opinion of the latter: «Everyone, from the lowest agents to Minister Maybach, is convinced that operation by government is unprofitable for the country, but they will say and preach what Bismarck wants». Other German railway specialists spoke favourably about government operation.

In Austria in those years, some private railways were purchased. But many railways are still operated by private companies. The public has little faith in the success of operation by the treasury. Most railway specialists are confident that operation by government cannot have a future for them. In Belgium the railways are operated by the treasury and give satisfactory results. In other countries, railways are operated predominantly by private companies. But sometimes they experiment with operation by government. In this regard, the experience of Romania is curious. It bought out part of the railways, but since the ministers in charge of the railways change almost monthly, and with them some of the senior railway personnel, and since the state administration is under the strong rule of the Austrian bankers, something like a puppet comedy comes out of all the state operation.

Bismarck came up with the idea of buying out the railways in Germany, and the motivation for his idea is the work of state chancelleries, whose specialty lies precisely in the ability to select from a storehouse of arguments those that speak in favour of what is ordered to be proven. «This gave reason for this measure of Prince Bismarck to be classified as a socialist measure. But it would be correct to classify it among the practical acts of state policy of a great man, consistent with the reality and current circumstances of the country he governs».

«From the point of view of Russian reality, the issue of state or private operation at that time was not comprehensively discussed in the press, except for some newspaper articles written on this subject, a significant part of which, through oratorical comparisons and techniques, affects the feeling more than the mind. However, it should be borne in mind that it is impossible to examine such a broad issue in detail in newspaper articles. This is rather a matter for special journals and individual publications».

«The works of the prestigious authors of classical political economy say very little about railways, much less about who should operate them».

«Socialists of all shades do not allow the operation of railways by private societies». «The realistic school teaches that taking certain measures in the field of the national economy should depend on the place, time and the totality of all the circumstances of the case».

«There is no doubt that the state operation of Russian railways is in principle desirable, because the Russian state, in principle, in operation of railways cannot pursue any other goals other than the goals of the Russian common good». «But under the existing conditions of Russian society, the operation of railways by the treasury can hardly be carried out more successfully than by private companies, under the active control of the government. In the presence of these conditions, it is especially impossible to consider it useful, with some exceptions, the immediate establishment of operation by state associated with financial sacrifices».

Sergei Witte considered the problem of railway tariffs against the broad background of economic processes and socio-economic phenomena taking place in the country, and the very theoretical development of tariff issues as the interaction of «elements of the economic, political and even mental life of the people». Tariffs, Witte argues, should be regulated based on freight prices formed under the influence of the law of supply and demand. At the same time, he proceeds from the position widely recognised in the economic science of that time that the price of every item and every service (in this case, the railway tariff) is determined by this law of commodity production, operating on the market in the sphere of commodity exchange. Demand is the need for goods presented on the market, and supply is «a product that is on the market or can be delivered to it» – two main categories of the market, categories of exchange that act as regulators of market prices; in railway transport, the price function is performed by tariffs («payments for services»), which in turn act as one of the elements of the market value of a product and must be «in a rational relationship to the totality of all other elements».

S. Yu. Witte pronounced in press when the capacity of railway transport was just taking shape, since there was still a time nearby when railways did not exist in Russia at all. However, he already understood then that «a monopoly modifies, but

does not destroy the action of the law of supply and demand», that this law also has a regulatory effect under monopoly conditions. On the other hand, without excluding formation of a railway monopoly, Witte emphasised that it is «not limitless, not absolute, does not represent a complete monopoly» since horse-drawn transportation and especially water and sea routes retain their advantages, and in some cases irreplaceability, so that competition between different modes of movement persists. In other words, a certain limit may be put on the monopoly, since horse-drawn and waterways can, under certain circumstances, compete with the railways. In particular, horse-drawn transport then acted as a limiter on the growth of railway tariffs over short distances, especially around large centres (for example, between St. Petersburg and nearby towns and villages, horse-drawn transport «prospered»); «enormous competition» was represented by waterways («with floating shipping», due to its cheapness, railway transportation does not stand up to competition) and especially by «sea navigation» in relation to such a category of goods as «general cargo for both railways and waterways». Hence it is necessary to «study all the conditions for movement of goods along competing routes». However, Witte emphasises, that even at the initial stage of formation of a natural monopoly of railways, there is a limited impact of competition in this area, in contrast to «free industry», «subject, of course, to the full influence of competition among producers».

The complex structure of the transport system, built on mutual competition, needed general regulation by the state; first, it was necessary to develop an economic policy regarding railway transport as a new, extremely promising transport structure. Issues related to operation of railways in Russia began to be addressed only in the first half of the 70s of 19th century. Therefore, the «first attempt at a systematic presentation in Russian of the most important principles underlying the railway tariff business» and the theoretical development of tariff issues had such significance. This research by Witte should obviously be considered in the general mainstream of mastering the categories of a market economy and applying them to analyse the economic processes that took place at the end of 19th century in Russia and develop appropriate economic policies, so it is natural that in his book he expressed a number of ideas that received subsequently development and practical application in government activities. Hence it is clear why S. Yu. Witte interprets



a seemingly narrow and special question as «a highly interesting subject for study by both a thinker and an economist».

The book examines various economic categories in which the services provided by railways («railway industry») are expressed, which do not produce objects (goods), but only remove «barriers of distance», serve to «move goods from one place to another» – net income (the difference between gross income and operating costs); the possible price of a product which is a price approaching the maximum that consumers can pay, not only without reducing, but, on the contrary, developing consumption; operating costs as the lowest tariff limit; inertia of demand and its impact on the value of the tariff, etc. S. Yu. Witte while considering regulation of tariffs attached particular importance to the difference between the prices of goods in the places from which they are sent, and existing or possible prices in those places where these goods are sent. It is precisely these differences, which create the very economic possibility of moving goods, that tariffs must correspond to. The book analyses various aspects of the impact of changes in tariffs on economic processes, in connection with which the importance of studying «for any kind of product the ability to increase the size of its movement depending on changes in freight prices, the ability to spread the consumption of goods» is emphasised, including an analysis of the economic development of adjacent territories, since «the interest of the railway lies in development of local industries that have a future, because the increase in profitability of the railway depends on development of these industries».

Touching on the issue that was widely discussed at that time in Russia, i.e. in whose jurisdiction, in whose ownership the railways should be, S. Yu. Witte insisted on the need for government intervention, believing that it should expand and in the future lead to the complete transfer of railways to the state. But, in that particular period, he was held back from this step by «the bureaucratic principle as a weakening factor for public administration in comparison with private interests», bureaucratic tradition», fraught with the danger of «unsuccessful experience of government exploitation», because «the bureaucratic machine will pour the entire railway economy into those forms, which are still continuously known to it, completely regardless of how these forms correspond to the railway industry». In this regard, he raises the question of «the limits of the state economy», citing the exceptional importance of the

words of D. I. Mendeleev that «the correct course of business» is to «initiate private initiative and be able to use it in the interests of the treasury and for the benefit of the whole country the fruits of private activity». S. Yu. Witte especially emphasised the colossal danger of the «fatal faith in bureaucracy» that reigns in society.

Having raised the question of the limits of the state economy and broad state intervention in economic life, recognising that state intervention can only limit the scope of economic laws, Witte, following D. I. Mendeleev, believes that «the question is where and when this assistance can go into state-owned economy». It was clear to him that until «the conditions for not only a successful, but at least passable state-run economy have been worked out, one cannot even think about expanding it». For these purposes, he proposed various ways, including carrying out a «comparison of state-owned and private operation», closely linking the interests of the treasury with the benefits of participation in the activities of private enterprises, the development of mixed forms (rental enterprises that subsequently remain with the treasury) and even the establishment of artels [co-operative association] for managing enterprises (this proposal reflected passion for the authentic principles of Russian economic life). He assigned a significant role to the development of «intermediate forms».

As a result, Sergei Witte comes to the conclusion that everything depends on the degree of efficiency, that «the question is not who will operate the railways, but how they will operate them». «He is decisively against such a policy when «for the sake of the actions or words of some luminaries of Western science or public administration, we give the national economy into the hands of private individuals, often without proper guarantees, then, for the sake of the words or actions of others, we are ready to hand over this economy to state management...»

Witte, even in this first major work, constantly emphasised the priority role of development of productive forces. Although he was a supporter of protectionism, he nevertheless argued that «development is more useful than patronage». «Substantially disagreeing» with supporters of free trade, he believed, agreeing with the opinion of D. I. Mendeleev, that «the state cannot look indifferently at the death of folk crafts, at the import of a mass of unnecessary goods from abroad, or at the depletion of the country's productive forces by usurious tricks». Setting the task of bringing the national economy onto the «path of natural growth»

and improving its organic part – financial recovery, he especially drew attention to the impossibility of «counting on improving our finances through financial measures alone» and he strictly put this principle into practice in the future, while in office as Minister of Finance.

«Roads of transportation, blood arteries of the country's body» involve consideration of the problems of railways against the broad background of the national economic development of the country. And on this issue, S. Yu. Witte strongly advocated «that each nation retains all its independence and all its strength...». He rightly believed that economic development cannot be carried out «without consideration of soil conditions», i.e., Russian reality, and «a simple reference to the facts of life abroad cannot have the value of an argument for us». Witte emphasised that «to give our fatherland proper economic growth, it is necessary to achieve the possibility of the easiest distribution of natural wealth throughout the vast extent of the Empire, for which it is necessary to expand sales markets, carry out the widespread development of production, and the existing extremely low tariffs for long distances «must certainly leave beyond established European norms»».

Not accepting the idea of developing the country along the path of mindlessly copying the Western model, according to the adherents of which Russian life does not contain any special conditions, and to think otherwise means to deny, they argued, Western science and civilisation, Witte tries to convince of the need to take into account the specific conditions of a particular country, for «history teaches that each nation has developed in its own way, according to its soil conditions and historical destinies». This position of S. Yu. Witte reflected his deeply thought-out views about «unreasonable imitation» and the fallacy of «not taking into account all the different conditions of life and the nature of the social and state system, in particular, the assessment of historical traditions and features of the economic and social structure of Russia, which, however, did not mean denying the impact of ongoing changes in the world on the social and economic life of the country. But he resolutely opposed the vacillation of Russian economic policy, when «for the sake of some Western teachings we take the path of free exchange, killing some industries, then for the sake of other teachings we strive to revive these industries through increased patronage; for the sake of some Western examples, we kill small-scale

distillery and monopolise it in the hands of capitalists, then, for the sake of other Western examples, we cut off the monopolists to establish small-scale distillery; for the sake of Western theories alone, we spend almost all of our gold on maintaining the exchange rate», etc.

Witte reveals the danger of «economic vacillations in such a large economy as the Russian national economy», which could undermine it and bring it «to the point of slavish dependence». He associated one of the reasons for this situation with «the inert force of imitation that has hitherto embraced Russian thought». Outlining the general lines along which economic policy should develop as a way out of the current situation, S. Yu. Witte in the most general terms formulates measures that can be attributed to social market policy and democratisation of the world community. He characterises his contemporary economic world as a combination of «the struggle against the privileges of capital, freedom of speculation, labour insecurity and the parasitic life of some states at the expense of the productive forces of others». And the state plays a special role in these processes. The fact that classical political economy advocated non-interference in economic life naturally does not affect his position in any way, although he considered the works of these economists to be brilliant.

He associated the views of the classics of political economy with the time when the founders of economic science wrote their outstanding works, since then there were other tasks – the task of fighting against feudal privileges and foundations, guild restrictions. If the great founders of classical political economy lived in the present time, then, undoubtedly, wrote S. Yu. Witte, in their works on the issue of the sphere of state activities, somewhat different considerations would be expressed.

As for the railways, from Witte's point of view, by their nature they are undoubtedly the property of the state, which is associated with «the principles inherent in private operation that are inconsistent with the common good», since «in principle, operation by government can better implement the common good than private operation». But at the present time they have been transferred for temporary operation by private companies on a concession basis and their immediate transfer to the treasury is premature.

Among the goals of state regulation, Sergei Witte identifies a whole range of tasks – ensuring state needs, protecting the interests of the weak, the principle of preserving the country's economic



forces under competitive conditions, in particular, reducing competition and increasing the profitability of railways, etc. Moreover, state profits should go «for the common good», which means, among other things, the patronage of trade and industry, as well as measures taken in relation to the poor. For example, the reduction of railway tariffs for certain goods is expected to be extended to essential items for the mass of the population.

Comparing state-owned and private economy, S. Yu. Witte notes, along with their positive aspects, the «clumsiness» of the former (using D. I. Mendeleev's term), and for «private large-scale economy», «governed without a system», the danger of breaking away from pressing tasks of economic development («in the sense of the need to adhere to the existing ground», understanding by «soil» the connection with reality. It should also be noted that S. Yu. Witte introduced the concept of a system, which in modern literature has already acquired the formula «Witte system»).

The reprint edition of «Principles of Railway Tariffs for Transportation of Goods», undertaken by the St. Petersburg State Transport University (of which S. Yu. Witte was a professor), contains a high assessment of this work by specialists («fundamental», «original scientific work»). In particular, S. Yu. Witte's interpretation of the nature of railway transport as a natural monopolist is confirmed. In the afterword in the book by S. Yu. Witte, it is noted that «technical and economic calculations show that transportation of cheap goods (crushed stone, ore, coal, etc.) over long distances is the sphere of activity only of federal railway transport. The presence and condition of highways, the layout of waterways in Russia and other factors indicate that when transporting bulk cargo over long distances, railways act as a natural monopolist. When transporting expensive goods over short and medium distances, railways act as a commercial structure. This dual status of railway transport must be reflected in the tariff policy».

The task now facing railway science and practices to ensure a tariff system and develop a scientifically based tariff policy involves the revival of everything valuable that was accumulated both in the pre-revolutionary – and here S. Yu. Witte takes a worthy place along with recognised authorities – and in post-revolutionary period.

However, the significance of Witte's book «Principles of Railway Tariffs for Transportation of Goods» is broader than a narrowly specialised one. It touches on many aspects of economic policy and historical and economic science itself,

expresses thoughts about the principles of constructing the concept of economic development, the importance of the need to find solutions in this area, based on a deep penetration into the essence of economic and social processes. This book is not only about railway transport as a phenomenon of economic history, but also about the ways in which economic policy should be built in a country like Russia. This is a book not only by a expert, specialist in theory and practices of railways. It makes clearly perceive the state approach to many issues of the country's economic development, shaping the contours of the future state activities of S. Yu. Witte.

From the point of view of the impact of tariffs on development of the economy and competition in Russia, the history of introduction and abolition of the so-called Chelyabinsk enroute changing tariff [literally «turning point» tariff] is of great interest.

As it is known, at the end of 19th and beginning of 20th centuries, large railway construction was carried out in Russia. Thus, in 1896 Chelyabinsk–Omsk–Novosibirsk section was put into permanent operation, in 1898 it was followed by Novosibirsk–Krasnoyarsk section, and in 1900 by Krasnoyarsk–Irkutsk section.

Initially, when these lines, as a rule, before they were put into permanent operation, were in temporary operation, freight charges for transportation of Siberian products to the West and East were charged separately for the length of the newly built section and separately for transportation along existing railway lines. Considering that on newly built sections tariffs are higher than the general network tariffs applied on existing lines, Siberian products, especially grain cargo, when exported, could not compete with products produced in the centre of the country and on the world market. With introduction of these Siberian railway lines into permanent operation, when it became possible to charge a common tariff for the entire distance of transportation without enroute changes in the tariff, the most favourable conditions were created for export of Siberian products, and primarily of surplus Siberian bread, to the domestic and international markets. In this case, the price of Siberian bread in the centre of Russia, taking into account transportation by rail, became cheaper than the cost of bread produced in the central black earth [chernozem] region. In this regard, the landowners of this region addressed the Government with a request to limit the export of grain from Siberia to the West through Chelyabinsk by applying tariff measures, and to send Siberian grain abroad by another route.

In 1896, after a discussion at the Tariff Congresses in the Tariff Committee of the request of landowners of that region, by decision of the Tariff Committee, the Chelyabinsk tariff enroute change was introduced, with the help of which the cost of transportation increased compared to the normal tariff by approximately 16 %, which of course limited the competitive capabilities of Siberian grain in domestic (Central Russia) and international markets.

Its essence (the Chelyabinsk enroute changing tariff) was that freight charges began to be charged not for the total continuous distance from Siberia through Chelyabinsk to the destination station (within Russia or to the border), but for two separate distances from Siberia to Chelyabinsk and from Chelyabinsk to the destination station. In this case, the cost of transportation increased, as mentioned earlier, by 16 % due to an additional fee for the start-to-end operation. This is because when determining the fee for one continuous distance, the freight charge includes the cost of only one start-to-end operation; when determining the fee with a «enroute changing tariff», i.e. for two separate distances or for two transportations, the freight charge includes two rates for the initial and final operations.

Simultaneously with this (Chelyabinsk enroute changing tariff), a reduced tariff was introduced for transportation of Siberian grain in the direction of Kotlas and further along the Northern Dvina to Arkhangelsk. The purpose of this tariff was to allow Siberian grain to go abroad so that it did not reduce prices on the internal central market, which had become a monopoly of landowners in the central black earth region. However, these hopes were not justified, since transportation of Siberian grain in this direction, even with a reduced tariff considering two transshipments, turned out to be very expensive.

The long-term application of this tariff regime limited the supply of Siberian grain to the west. All this led to formation of huge grain deposits in Siberia. As a result, a situation arose in which it was necessary to cancel the application of the Chelyabinsk enroute changing tariff. The General Tariff Congress of representatives of Russian railways, held in December 1910, spoke out in favour of cancelling this change. It was abolished gradually between March 1911 and August 1, 1913. Starting from this time, the tariff for transporting bread from Siberia began to be determined for a continuous distance from the point of origin to the point of destination across the territory of Russia. Thus, the path for Siberian bread to the

West, to the domestic and international markets with the greatest favourable conditions was opened.

The problem of prices and setting tariffs on railways has received much attention since the launch of the first railways.

In pre-revolutionary Russia, this problem was dealt with by such prominent scientists and practitioners of railway transport as A. I. Chuprov, D. I. Zhuravsky, N. N. Petrov, Yu. V. Lomonosov and others. The treatise on tariffs was written by the world-famous scientist D. I. Mendeleev. The views of S. Yu. Witte had a great influence on the transport pricing system. Studying the main provisions of his fundamental work will help us take a fresh look at tariffs and modern tariff policy.

The basis for pricing in transport, as in industry, is the law of value. According to this law, the price of products (services) produced by transport, i.e. changes in the location of goods is established in accordance with the amount of socially necessary labour spent on this. However, pricing in transport, due to the characteristics of transport products, has its own specifics, which consists, first, of the fact that prices are differentiated by type of cargo, by type of shipment, and by transportation distance. It is important to emphasise that the presence or absence of tariff differentiation depends on the nature of transport enterprises and the relationship between the owners of vehicles and the owners of transported goods.

In conditions of centralised economic management, tariffs are monopoly prices. They are established by the government body in the form of a strictly fixed value. However, this does not mean that the law of value ceases to apply. The average tariff level cannot increase indefinitely; it is ultimately limited by the law of value. Tariffs are formed according to the «cost of transportation plus profit» scheme. The problem is what cost and what profit are involved. This depends on the methodological approach to determining socially necessary labour costs (SNL) in transport.

Three concepts for formation of SNL have been considered in the scientific literature:

- 1) as averages throughout the entire transport system;
- 2) as industry averages within each mode of transport;
- 3) within each mode of transport as differentiated costs for individual regions and sections of the transport network.

Since there is no national sales market for transport products, and the products of various modes of transport are heterogeneous and,



therefore, economically non-substitutable, the first point of view on SNL is untenable.

The second point of view on SNL was at one time recognised by a large number of economists. It is implemented in railway transport. However, it comes into conflict with market economic conditions.

Factor analysis of the cost of cargo transportation and other pricing parameters allows us to conclude that the third point of view is more justified. In this regard, territorial differentiation of tariffs is necessary, as well as differentiation of tariffs according to other criteria.

For successful operation and development of railways, it is also advisable to revive everything useful that was accumulated in the pre-revolutionary and post-revolutionary periods regarding formation and regulation of tariffs and, on this basis, to create a scientifically based tariff policy. I

In 19th century, an important role in formation and centralisation of tariff affairs was played by Tariff congresses, the practices of their organisation can be returned since they could give place to business conversation between railway transport employees and managers and consumers of transport products and representatives of other interested structures.

Since May 1998, Tariff congresses and conferences of service consumers, representatives of railway transport and of other structures have been held in different cities of Russia.

Tariff congresses proclaimed a balance of interests of the railway, cargo owners and of then existed the Federal Service for Regulation of Natural Monopolies in Transport Industry. In this regard, the basic principles of formation of tariffs, set out by S. Yu. Witte, again acquire important theoretical and practical significance. These principles are applicable in a market economy, when railway transport operates as a market segment with developed competition. At the same time, railway transport is considered as a natural monopolist. The effectiveness of common tariff congresses could have been significantly greater if a permanent institution of such tariff congresses had been created, and in the interval between congresses the Bureau of Management of Tariff Congresses had operated, as was the case in the time of S. Yu. Witte.

For railway transport as a monopolist, tariffs regulated by government bodies have been established, based on the following principles:

- the tariff system is based on a two-rate model of tariff schemes for origin-destination and traffic operations;

- the basic (listed) tariff level is calculated based on the cost and required profit;

- tariffs are differentiated according to the following transport characteristics: the type of car, ownership over it, the type of shipment (carload, small, light-tonnage, container), the degree of use of the car's carrying capacity, special conditions of transportation (perishable, dangerous, oversized freight), speed and transportation distance; the basic level of the tariff does not take into account the costs associated with performance of individual works and services (supply of cars for cargo operations, storage of goods, etc.), paid for by additional fees.

State regulation of transport tariffs is carried out by directly influencing their level, system and dynamics, ensuring break-even operation of railway transport, as well as compensation for revenue losses when tariffs are set at a level that does not compensate for the economically justified current and capital costs of railways. When prices for materials consumed by railway transport rise, the base tariff level is periodically indexed.

In the future, to create a scientifically based tariff system, a completely different methodology for constructing tariffs should be adopted.

There are a number of proposals in the literature on this matter. As an option, the following basic principles and methodology for constructing a tariff system for railway transport operating in the status of a natural monopolist are proposed.

The transport tariff, as a transformed form of economically feasible expenditure of resources necessary for implementation of the transportation process, primarily depends on the extent to which society is able to allocate resources from social production to the field of transport. This means that in the structure of the fixed capital of the national economy, past labour involved in the transport sector may constitute a very certain share. The use of resources in the field of transport to ensure transportation of passengers and goods is ultimately manifested in the share of the gross national product that is created by transport. Thus, the value of the tariff should, to one degree or another, be related to the transport share in the gross national product. Let's say, if this share represents 3–5 % of the gross national product, then the total average freight charge is within these limits and can be considered as a starting point for establishing the tariff for the subsequent period.

The tariff value should ensure a certain profitability of transport enterprises. Otherwise, the number of closing (going bankrupt, liquidated, bankrupt) transport enterprises will increase and,

as a result, the supply of transport services will decrease and their share in the gross national product will decrease. Therefore, the total transport tariff cannot be less than the sum of resources spent on transportation plus a certain profit. The average rate of profitability should not exceed 35 % of the cost of transport services, which should be considered in determining the limits of transport tariffs for the coming period. Otherwise, economic ties within the transportation system will be disrupted and urgent interventions will be required to restore them.

An important tariff-forming factor is the share of transport costs in the price of transported products. This indicator shows the formed structure of the location of production units and the economically established system of economic relations in the national economy. If this indicator fluctuates between 7–10 %, this shows that it is significantly higher than the share of the transport component in the gross national product. Obviously, this parameter should be considered in the process of tariff setting in the future, because otherwise it is possible to disrupt economic ties between consignors, which will be very difficult to restore. Therefore, first it is necessary to make a decision which of the economic relations are considered economically inexpedient in the national economy, and then set the value of the transport tariff, knowingly assuming the shutdown of some production links.

In another form, the considered factor influences the value of the tariff in the form of the ratio of the total freight charge to the total price of the transported cargo. If this coefficient fluctuates, say, within 15–20 %, then this means that an increase in prices for transported products cannot leave the tariff unchanged. For if the sum of prices of transported goods increases by 20 %, and tariffs only by 10 %, then, willy-nilly, it should be stated that the processing industries are absorbing more profits than the transport system. Ultimately, if this trend continues, the reproduction process of the complex of transportation routes will be disrupted and difficulties will arise with the transportation process. Therefore, the tariff value should be influenced by this ratio and should be adjusted.

Besides the factors that directly affect the value of the tariff as a result of its free establishment, there are also factors that indirectly affect its value through government influence or the regulatory influence of the state. The latter may consider the transport system as a «natural monopoly» and introduce a fixed rent payment. If the amount of

this payment actually reflects the real degree of monopoly of a given transport unit, then this kind of regulation creates a competitive market for transport services. If this value is greater than the real state of affairs, then such state regulation will lead to curtailment of this type of transport services, because a flow of capital will follow. A small amount of rent payment will not affect the «natural monopoly» of an economic entity and will be perceived as an irritating element in functioning of the transport system.

The government's influence on tariff setting can be felt through credit and tax policies. Depending on the percentage at which loans are given to transport enterprises, it is possible to predict accurately what changes will occur in tariffs. Even more noticeable changes in tariff setting will be felt under one or another tax policy. Thus, in general, the tariff value depends on direct and indirect factors, and a change in the share of their influence will bring tariff formation closer or further away from free tariffs. This means that free tariffs «in their pure form» can only be achieved by establishing equal conditions for all economic units and with a quick payback period for fixed capital. Obviously, it is hardly reasonable to expect an economic miracle with such settings. The inclusion of indirect factors in tariff setting or a differentiated approach to taxation and lending means, to one degree or another, regulation of this process.

The share of each of the noted factors influencing the value of transport tariffs should change under the influence of changing conditions in the national economy. Moreover, at each stage of development of the latter, one or another factor may be more influential, but it should not become dominant. Because in this case, the corresponding concept in tariff setting will win, which for a certain time will meet the requirements of the national economy, and then turn into a brake. Only a balanced combination of the influence of each factor, considering trends in the national economy, will make it possible to pursue a targeted tariff policy based on considering the strength of the influence of one or another factor on the value of the tariff corresponding to a given stage of development of the national economy.

An important issue is managing operating costs. To solve it, it is necessary to remember the well-forgotten past and return to normalising operating costs. Without a norm or standard, it is impossible to create an operating cost management system.

The level of operating costs does not have a direct impact on the tariff. However, reducing the cost of transportation creates favourable economic



conditions for reducing the tariff. This was convincingly proven by S. Yu. Witte.

He noted that capital investments in construction of the railway are not related to the size of the tariff. This is true, but the costs of updating technical equipment must be included in tariffs, otherwise the railway cannot satisfy the actual effective demand within the existing supply – one of the main postulates of a market economy.

The tariff policy must include a condition for indexation of regulated tariffs.

It would be advisable to liberalise tariffs in local traffic more. At the same time, regional representatives of Federal antimonopoly service should be invited to participate in regulation of tariffs in local traffic to better maintain the balance of interests between various modes of transport and consignors, as well as consider economic development in a given region.

The issue of discounts deserves the most serious attention. It is necessary to clearly indicate under what conditions and for what period of time discounts on tariffs are provided. In pricing policy, discounts are considered as a powerful lever for managing the economics of the transportation process. If the conditions for providing discounts are not met, then the latter results in a direct loss of income for the railway.

Russia's tariff policy has not had a system associated with territorial differentiation of tariffs (TDT). In market conditions, the problem of more accurate and objective reflection of the actual cost of transportation across the country in the price of transportation (tariff) is particularly acute. Meanwhile, characteristic of JSC Russian Railways are significant differences in cost between the railways of the network and the directions of traffic.

Moreover, the introduction of TDT creates conditions for a more realistic reflection of the costs of living labour for production of transport products throughout the country. These costs could be reflected as new added value created by Russian Railways employees, in the form of a certain share of the cost of the full tariff.

The introduction of TDT and the deduction of living labour costs as a share of the full tariff will

to a certain extent complicate the system of tariffs and mutual settlements but will create conditions for products produced and extracted in Siberia and the Far East to be delivered at a lower price to points of consumption. Calculations showed that the cost of transportation, which is the basis for constructing freight tariffs, turns out to be more than 1/3 lower in the Asian part of Russia than in the European part of Russia. This is explained by the fact that in the Asian part of the country, more than 80 % of freight turnover is operated with electric traction, and in the European part – only 63 %. Under these conditions, the uniform railway freight tariff across Russia leads to higher prices for products exported from the regions of Siberia and the Far East.

To conclude, it is worth highlighting once again the enduring importance of S. Y. Witte's works for the development of railway transport, the transport system, particularly, in such interrelated areas as tariff policy, the mutual influence of the state's customs policy and trade, the balance of the rates of development of transport, industry and agriculture.

REFERENCES

- Witte Sergei Yulievich. Principles of railway tariffs for transportation of goods [*Printsipy zheleznodorozhnykh tarifov po perevozke gruzov*]. Kyiv, Tip. I. N. Kushnereva i K^o, 1883, 294 p.
- Witte, S. Yu. Memories [*Vospominaniya*]. Moscow, Publishing house of socio-economic literature, Vol. 1–3, 1960.
- Witte, S. Yu. Notes of lectures on the national and state economy given to His Imperial Highness Grand Duke Mikhail Alexandrovich in 1900–1902 [*Konspekt lektsii o narodnom i gosudarstvennom khozyaistve, chitannykh ego imperatorskomu vysochestvu velikomu knyazyu Mikhailu Aleksandrovichu v 1900–1902*]. St. Petersburg: Brockhaus and Efron publ., 1912, XV, 568 p.
- Witte, S. Yu. Regarding Leon Say's opinion on railway tariffs [*Po povodu mneniya Leon Say o zheleznodorozhnykh tarifakh*]. *Inzhener*, Kyiv, 1883, Iss. 1–12, pp. 9–13.
- Russian ports and railway tariffs: App. Speech of Prince Bismarck regarding the port of Libau delivered at the 49th meeting of the Reichstag, February 14, 1885 [*Russkie porty i zheneznodorozhnie tarify: Pril. Rech kn. Bismarka po povodu libavskogo porta, skazannaya im v 49 zasedanii Reikhstaga, 14 fevralya 1885 goda*]. Kyiv, S. V. Kulzhenko's print.house, tsenz. 1886, 20, III p.; 28.
- Witte, S. Yu. Collected essays and documentary materials: in 5 volumes [*Sobranie sochenenii i dokumentalnykh materialov: V 5 t.*]. Ed. board: L. I. Abalkin (chair) [et al.]. Moscow, Nauka publ., 2002–2007. ISBN 5-02-008394-1. ●

Information about the author:

Levin, Dmitry Yu., D.Sc. (Eng), Chief Expert of JSC NIAS, Moscow, Russia, levindu@yandex.ru.

Article received 19.04.2023, approved after reviewing 02.06.2023, accepted 05.06.2023.



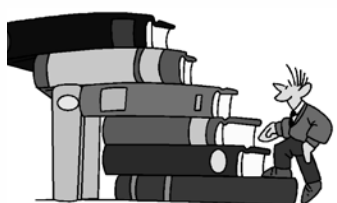
REVIEW

322

Functional safety of railway control systems. Approaches, solutions, outlook.



BIBLIO-DIRECTIONS



SELECTED ABSTRACTS OF D.SC. & PH.D. THESES

325

- *Bus fleet performance management in the Republic of Burundi.*
- *Strengthening the insulation of electrical equipment of traction rolling stock by thermal radiation.*
- *Ensuring aviation accessibility of the regions of the Eastern Arctic of the Russian Federation.*
- *Organisation of cargo flows in the conditions of reforming railway transport of the Republic of Uzbekistan.*

NEW BOOKS

328

New books on transport and for future and present transport employees recently appeared in Russian publishing houses and Universities.





Safe Railways

(Review of the monograph «Functional Safety of Railway Control Systems»)



Dmitry V. EFANOV

Dmitry V. Efanov

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia.

Research and Design Institute of Transport and Construction Safety, St. Petersburg, Russia.

Russian University of Transport, Moscow, Russia.

Tashkent State Transport University, Tashkent, Republic of Uzbekistan.

✉ TrES-4b@yandex.ru.

ABSTRACT

Shubinsky, I. B., Rozenberg, E. N. Functional Safety of Railway Control Systems. Monograph. Moscow, Vologda, Infra-Inzheneria publ., 2023, 360 p. ISBN 978-5-9729-1553-8.

Ensuring safety is one of the main conditions for existence of humanity. Therefore, the concept of «safety» is the focus of attention in various fields of activity, ranging from agriculture, medicine through space. At the same time, the interpretation of the concept of «safety» is still ambiguous. The theory and practice of «functional safety» are currently most developed in the nuclear industry and railway transport. In railway transport, a series of European (CEN), international (IEC), interstate (GOST), national (GOST R) standards have been developed in the field of functional safety. They focus mainly on hardware and software control systems.

The monograph by Igor Shubinsky and Efim Rozenberg «Functional Safety of Railway Control Systems» presents a wide range of issues of functional safety – from scientific foundations (concepts, postulates, principles) to methods and techniques for ensuring the safety of hardware and software of railway control systems, including advanced methods of ensuring safety using virtual channels and digital twins.

The monograph is of interest to researchers, railway industry specialists engaged in management processes, academic staff, graduate students and students of railway transport universities. It may be useful to scientists and specialists in other fields of industry and transport related to problems of functional safety and reliability of control systems and objects.

Keywords: railway transport, functional safety of control systems, safety methods, virtual channels, digital twins, artificial intelligence.

For citation: Efanov, D. V. Safe Railways (Review of the monograph «Functional Safety of Railway Control Systems»). World of Transport and Transportation, 2023, Vol. 21, Iss. 6 (109), pp. 322–324. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-6-18>.

The full text of the review article in Russian is published in the first part of the issue.

Полный текст статьи-рецензии на русском языке публикуется в первой части данного выпуска.

Issues of functional safety of control systems in industry and transport are paramount. With development of intelligent control technology and the advent of the latest automation tools, they take on a more complex form, and the answers to challenges and subsequent solutions become the basis for safety of developed systems for critical application. An analysis of scientific publications in the field of transport emphasises the relevance of studying methods for implementing functionally safe control systems, including in the railway transport segment.

If the principles of implementing functionally safe control systems on a relay element base are simple and understandable and are based on the use of uncontrolled relays (in common parlance – relays of the first reliability class) in critical circuits and cable networks to control distributed objects, then enormous problems arise in ensuring high levels of reliability and functional safety with the use of devices and systems made using microelectronic elements, on a programmable element base, having both hardware and software components, endowed with artificial intelligence and using wireless paths for transmitting control and diagnostic information, linked with peripheral monitoring systems into complex traffic control systems.

The monograph presented to the reader entitled «Functional Safety of Railway Control Systems» [1], written by the scientists who are well known in the industry, D.Sc. (Eng), professors Igor Borisovich Shubinsky and Efim Naumovich Rozenberg, is truly a fundamental work that summarises key research of the co-authors of the book, as well as of other well-known researchers and scientists in the field of implementation of reliable and safe control systems in railway transport. This monograph is, in general, exactly the book that should stand on a par with the works of such masters of the theory of synthesis of reliable and safe control systems in railway transport, as D.Sc. (Eng), professors Valery Vladimirovich Sapozhnikov, Vladimir Vladimirovich Sapozhnikov and Victor Mikhailovich Lisenkov. Let us highlight their four separate monographs [2–5], two textbooks [6; 7] and a fundamental review [8]. It must be said that, apparently, today we have three main branches and, accordingly, three key scientific schools in the field of reliability and functional safety of railway control systems: that of professors Sapozhnikovs (research in their scientific school has been largely focused on

development of methods for ensuring hardware reliability and safety and the synthesis of testable, self-checking and fault-tolerant devices), of professor V. Lisenkov (research in his scientific school has concerned the issues of the statistical theory of train traffic safety and the theoretical foundations of constructing safe microelectronic control systems), and of professors I. Shubinsky and E. Rozenberg (their works has focused on the theory of functional safety of control systems, methods and techniques for ensuring reliability and safety of hardware and software, including addressing more advanced issues of the use of technical vision, virtual data processing channels, digital twins and artificial intelligence).

Let us pay attention to the essence of the monograph under review, which includes seven main sections devoted to the following issues:

1. Basic concepts, postulates and principles of functional safety in railway transport.
2. Graph methods for determining indicators of functional safety and reliability of railway control systems.
3. Models of functional safety of railway control systems.
4. Principles for constructing functionally safe devices.
5. Ensuring functional safety of software.
6. Methods and technologies for creating functionally safe systems.
7. Confirmation of compliance with safety requirements of control systems.

The readers familiar with the subject area of the monograph will be particularly interested in materials devoted to the strict and approximate topological semi-Markov method of moments, the topological semi-Markov method for determining functional safety indicators based on operator transformations, algorithms for calculating reliability and safety indicators of systems using topological methods, models of functional safety of redundant systems, methods for ensuring functional safety of software components, as well as to practical issues of applying the principles developed by the authors to describe functionally safe systems using technical vision, virtual data processing channels, digital twins and artificial intelligence.

The authors of the book not only systematised and enriched knowledge in the field of development, certification and operation of reliable and functionally safe railway control systems, but also created strict and approximate methods for calculating and predicting functional



safety indicators, with the help of which they were able to study models of complex railway control systems.

It should be noted that in the presented monograph, the authors focused their attention on the analysis of functional safety of individual systems, for example, locomotive traffic control using a virtual information processing channel, systems with a digital twin, unmanned control systems, etc. However, currently complex control systems are actively developing in which each of the systems considered by the authors is a subsystem. Data about their work is supplemented by external periodic and stationary monitoring systems, and information flows are also sent to the level of organisation, planning and transportation management to optimise all ongoing processes. As an example of such systems under development, one can pay attention to the automated integrated system for metro train traffic control [9]. In addition, there is currently a need to develop functionally safe stationary monitoring systems for railway infrastructure facilities that are closely integrated with systems for ensuring the safe train traffic, since safety of the transportation process also depends on them [10; 11]. Issues of reliability and functional safety of such complex control systems are also extremely interesting to the reader, and studying them, apparently, is the matter of the nearest future in the subject area of the monograph under consideration.

The book «Functional Safety of Railway Control Systems» should certainly be recommended for reading by any specialist in the field of train control systems, be it a nascent railway engineer, a developer, a researcher or an experienced specialist. The materials in the book are fundamental for a specialist in the field of safe train traffic control systems and should be considered in modern lecturing and practical university courses for students, Ph.D. students and engineers improving their qualifications.

REFERENCES

1. Shubinsky, I. B., Rozenberg, E. N. Functional Safety of Railway Control Systems [*Funktsionalnaya bezopasnost sistem upravleniya na zheleznodorozhnom transporte*]. Moscow, Vologda, Infra-Inzheneria publ., 2023, 360 p. ISBN 978-5-9729-1553-8.
2. Lisenkov, V. M. Statistical theory of train traffic safety [*Statisticheskaya teoriya bezopasnosti dvizheniya poezdov*]. Moscow, VINITI RAS publ., 1999, 331 p. ISBN 5-900242-29-3.
3. Sapozhnikov, V. V., Sapozhnikov, V. I., Khristov, Kh. A., Gavzov, D. V. Methods for constructing safe microelectronic systems for railway automation [*Metody postroyeniya bezopasnykh mikroelektronnykh sistem zheleznodorozhnoi avtomatiki*]. Ed. by V. I. Sapozhnikov. Moscow, Transport publ., 1995, 272 p. ISBN 5-277-01690-2.
4. Sapozhnikov, V. V., Sapozhnikov, V. I., Talalaev, V. I. [*et al*]. Certification and proof of safety of railway automation systems [*Sertififikatsiya i dokazatelstvo bezopasnosti sistem zheleznodorozhnoi avtomatiki*]. Ed. by V. I. Sapozhnikov. Moscow, Transport publ., 1997, 288 p. ISBN 5-277-02000-4.
5. Sapozhnikov, V. I. Synthesis of train traffic control systems at railway stations for the exception of dangerous failures [*Sintez sistem upravleniya dvizheniem poezdov na zheleznodorozhnykh stantsiyakh s isklyucheniem opasnykh otkazov*]. Moscow, Nauka publ., 2021, 229 p. ISBN 978-5-02-040877-7.
6. Sapozhnikov, V. V., Shamanov, V. I., Sapozhnikov, V. I. Reliability of railway automation, remote control and communications systems [*Nadezhnost sistem zheleznodorozhnoi avtomatiki, telemekhaniki i svyazi*]. Moscow, Marshrut publ., 2003, 261 p. ISBN 5-89035-119-2.
7. Sapozhnikov, V. V., Sapozhnikov, V. I. Basics of technical diagnostics [*Osnovy tekhnicheskoi diagnostiki*]. Moscow, Marshrut publ., 2004, 318 p. ISBN 5-89035-123-0.
8. Gavzov, D. V., Sapozhnikov, V. V., Sapozhnikov, V. I. Methods for ensuring safety of discrete systems [*Metody obespecheniya bezopasnosti diskretnykh sistem*]. *Avtomatika i telemekhanika*, 1994, Iss. 8, pp. 3–50. EDN: YZNRGT.
9. Averchenkov, E. O., Baranov, L. A., Shevchenko, M. A. Functional structure of the subway train traffic control system complex. *Automation on transport*, 2021, Vol. 7, Iss. 3, pp. 343–361. DOI: 10.20295/2412-9186-2021-7-3-343-361.
10. Efanov, D. V., Khoroshev, V. V., Osadchy, G. V. Conceptual Foundations of the Synthesis of Safe Train Traffic Control Systems. *World of Transport and Transportation*, 2022, Vol. 20, Iss. 3 (100), pp. 50–57. DOI: 10.30932/1992-3252-2022-20-3-6.
11. Efanov, D. V., Mikhailyuta, E. M. Reliability and Safety Management of the Transportation Process Using Systems for Continuous Monitoring of Railway Infrastructure Facilities. *World of Transport and Transportation*, 2023, Vol. 21, Iss. 2 (105), pp. 226–236. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-2-10>. ●

Information about the author:

Efanov, Dmitry V., D.Sc. (Eng), Professor, Member of the Institute of Electrical and Electronics Engineers; Professor at the Transport Higher School of Mechanical Engineering of Material and Transport Institute of Saint Petersburg Peter the Great Polytechnic University, St. Petersburg, Russia; Deputy General Director on Research and Design Institute of Transport and Construction Safety LLC, St. Petersburg, Russia; Professor at the Department of Railway Automation, Remote Control and Communication of Russian University of Transport, Moscow, Russia; Professor at the Department of Automation and Remote Control of Tashkent State Transport University, Tashkent, Uzbekistan, TrES-4b@yandex.ru.

Article received 30.11.2023, accepted 23.12.2023.

**SELECTED ABSTRACTS OF D.SC.
AND PH.D. THESES SUBMITTED AT RUSSIAN
TRANSPORT UNIVERSITIES**

*The text in Russian is published
in the first part of the issue.*

*Текст на русском языке публикуется
в первой части данного выпуска.*

DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-6-19>.

Bigirimana Juvenal. Rationale of the bus fleet performance management system in the conditions of the Republic of Burundi. Abstract of Ph.D. (Eng) thesis [Obosnovanie sistemy upravleniya rabotosposobnostyu avtobusnogo parka v usloviyakh Respubliki Burundi. Avtoref. dis... kand. tekhn. nauk]. Moscow, MADI publ., 2023, 19 p.

In the absence of railway infrastructure and access to the sea, Burundi is dominated by road transport. Therefore, its reliability is crucial for the entire economy of the country. Maintaining vehicles in working condition through the balanced development and efficient operation of enterprises for technical maintenance and repair (TM and R) of vehicles, as well as the quality of their organisation and equipment, will contribute to development, management and uninterrupted provision of road transport services. The leading role in the technological process of ensuring operability of vehicles is played by diagnosing their technical condition, the results of which make it possible to quickly obtain information about its changes, and the use of modern scientific methods makes it possible to predict their performance.

The objective of the thesis is to substantiate the need to create an effective system for maintenance and repair of buses in the conditions of the Republic of Burundi based on the use of operational redundancy methods.

The scientific novelty of the work lies in development of a model for predicting the performance potential of the power unit and a methodology for substantiating the system for organising maintenance and repair of class M3 buses in tropical climates and mountainous areas using repair redundancy methods using repair kits.

The main reasons for reduction in the service life of buses have been identified. The service life depends on availability of asphalt concrete pavement, natural and climatic conditions, the perfection of the spare parts supply system and the lack of a functioning system for their maintenance and repair.

It has been proven that introduction of redundancy principles based on the use of complete replacement instead of «partial» one ensures the effective use of funds for organising warehouse stocks and reduces the time these parts remain in warehouses with buses awaiting repairs.

Based on the use of the developed mathematical model for predictive assessment of the operating time of the bus power unit before major repairs, it was possible to solve the problem of not only optimising the warehouse inventory of spare parts, but also effectively increasing the level of bus performance during the repair process.

Based on the collected statistical information on the state of the repair base in the country and the use of the results of this work, a methodology has been developed for organising a maintenance and repair system for buses for the conditions of the Republic of Burundi.

2.9.5. Operation of road transport.

The work was performed and defended at Moscow Automobile and Highway State Technical University (MADI).

Dulsky, E. Yu. Scientific foundations of the theory of strengthening the insulation of electrical equipment of traction rolling stock by thermal radiation. Abstract of

D.Sc. (Eng) thesis [Nauchnie osnovy teorii uprochneniya izolyatsii elektrooborudovaniya tyagovogo podvizhnogo sostava teplovym izlucheniem. Avtoref. dis... dok. tekhn. nauk]. St. Petersburg, PGUPS publ., 2023, 32 p.

The objective of the study is to create a theoretical basis for drying and strengthening insulating structures of traction rolling stock (TRS) using IR radiation by developing new methods, techniques, technical and technological solutions that increase the reliability of insulation of electrical equipment of TRS and reduce the cost of its repair.

The thesis outlines new scientifically based technical and technological solutions for increased reliability of insulating structures of electrical equipment of TRS. The developed mathematical models, methods, technical solutions and technological processes have been introduced into the practice of linear and repair shops and manufacturing plants. The conducted research allowed us to formulate the main results and conclusions.

A system approach was applied to analyse the reliability of the electrical equipment of the TRS, considering the distribution of zonal features of the Eastern train circulation area, which made it possible to identify significant differences in the failure rate of insulation of electrical equipment in different operating zones of the TRS operation. The influence of zonal features, such as climate, traffic density, and topography, is clearly visible when analysing the reliability of TRS equipment. At the same time, failures of insulating structures of electrical equipment account for about 40 % of the total number.

A study was carried out of the factors influencing the reliability of the TRS electrical equipment, based on which an appropriate classification was proposed in relation to the Eastern train circulation area.

A methodology for selecting energy-efficient IR radiation sources for their further use in industrial installations when strengthening polymer insulation is proposed based on a theoretical and experimental comparative assessment of the main energy parameters. Based on this technique, among the electrical emitters on the market today, the highest efficiency in terms of such parameters as beam efficiency (83,5 %), temperature of the emitting surface (860 °C), specific surface radiation energy (4,12 W/cm²), electrical power consumption (600 W) was shown by high-temperature ceramic emitters of SHTS type.

A methodology has been developed for selecting effective IR radiation reflectors based on the compilation of finite-difference models that consider the distribution of values of angular radiation coefficients. Based on this technique, the best results in terms of the parameters of the directional concentration of thermal radiation (distribution density of the thermal field under the reflector), the maximum heating temperature of the irradiated surface (279° C), the minimum heating temperature of the reflector (542° C) were shown by reflectors having a trapezoidal shape with an internal angle of 150° C.

A set of mathematical models has been proposed for calculating effective modes of IR energy supply in the processes of strengthening elements of insulating structures of electrical equipment of TRS. Mathematical models make it possible to describe the processes occurring during heating of multilayer insulating structures using IR radiation, considering the optical properties of impregnating materials and the spectral characteristics of modern emitters. The proposed complex of mathematical models allows us to quickly determine the types of structural elements of the system, to select the optimal parameters of their operation, considering the geometric features of the windings, the type of insulating and impregnating materials, operating time and other external factors.

A quantitative and qualitative analysis of the influence of technological modes of the process of heating insulating structures of electrical equipment of TRS with IR radiation on their performance in operation was carried out, which resulted in revealing new dependencies of the parameters of the structural elements of the system from each other and on the hardening process as a whole. During the experimental evaluation, the optimal modes of IR energy supply in the oscillating mode were established, which make it possible to increase the electrical strength of insulation by an average of 45 %, in comparison with the standard method (IR drying



on average – 4,3 kV, convective drying on average – 2,4 kV). It was revealed that the hardness and elasticity of polymer insulation changes slightly with changes in heating conditions.

Analysis of the research carried out from the standpoint of the chemical composition, structure of impregnating materials and heat treatment modes indicates the decisive importance of the chemical properties of the polymer in optimising strength and ductility when forming a capsule on the surface of a possible zone of insulation damage. Thus, the content of the soluble part of the binder after treating polymer insulation with thermal radiation is 8 times lower (2,4 to 22,0), and the degree of curing is 30 % higher (97,6 to 78,0), compared to the convective method.

A technique has been proposed for experimental evaluation and coordination of the spectral characteristics of IR emitters with the optical properties of insulating materials, which makes it possible to select IR emitters for any insulating materials to increase the energy efficiency of the hardening process in terms of such parameters as absorption, transmission and reflection coefficients. The «gray gas» environment, when strengthening insulating structures impregnated in varnish, reduces the intensity of the IR radiation flux at the initial time (10 %), which is due to the intensive removal of solvent vapours, which absorb radiation.

Methods and technical means have been developed for strengthening the insulating structures of electrical equipment of TRS based on the use of infrared radiation, increasing the reliability of insulation by 40 %, reducing energy costs by 6 times, increasing repair productivity by 4 times (14 patents for inventions and utility models, 3 certificates for computer registration).

Technical solutions for the use of thermal radiation in the repair of insulating structures of electrical equipment of TRS were introduced into production at the Ulan-Ude Locomotive Car Repair Shop (ULVRZ) – a branch of JSC Zheldorremmash (Ulan-Ude), LLC Angarsk Montazhennergoremont (Angarsk), motor-car depot Irkutsk-Sortirovochny – a branch of the East Siberian Directorate of Motor-Wagon Rolling Stock – a structural subdivision of the Central Directorate of Motor-Wagon Rolling Stock – a branch of JSC Russian Railways. Feasibility studies have been carried out to improve the reliability of insulation of electrical equipment of TRS and the efficiency of the proposed technical solutions for strengthening the insulation, allowing to obtain a total estimated annual economic effect from implementation of the proposed developments in production of about 3 million rubles by replacing one furnace only.

As promising field for further development of the subject of the thesis, research related to optimisation of drying modes and strengthening the insulation of electrical equipment of TRS using IR radiation is proposed in terms of determining the completion time of the polymerization process with IR heating and drying time, respectively.

2.9.3. Railway rolling stock, train traction and electrification.

The work was performed and defended at Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University.

Poleshkina, I. O. Methodology for ensuring aviation accessibility of the regions of the Eastern Arctic of the Russian Federation. Abstract of D.Sc. (Eng) thesis [Metodologiya obespecheniya aviatsionnoi dostupnosti regionov Vostochnoi Arktiki Rossiiskoi Federatsii. Avtoref. dis...dokt.tekh.nauk]. Moscow, MSTU CA publ., 2023, 43 c.

The objective of the thesis is to solve the scientific problem of ensuring aviation accessibility of sparsely populated Arctic territories that have the potential for economic development of the regions of the Eastern Arctic of the Russian Federation.

The patterns of development of the transport system of the regions of the Eastern Arctic of Russia have been identified, the main ones being the following: the absence of railway transport and roads of year-round use; the predominance of water transport (up to 78 % of the total

volume of transported goods) in complex multimodal schemes for delivery of goods, carried out in several stages on average for 350 days a year due to natural and climatic constraints; there is no alternative to the use of air transport for year-round passenger transportation (98 %).

It has been determined that the effective use of air transport is complicated by low population density and its dispersed settlement over a large territory, which does not allow flights to be carried out with sufficient frequency and load on the required number of routes. It was revealed that 99 % of air transportation at the local level is carried out by MI-8 helicopters with a capacity of 22–24 seats, which are extremely expensive to operate in Arctic conditions, which leads to a reduction in the number of flights.

The theoretical provisions of the concept of ensuring aviation accessibility of the regions of the Eastern Arctic have been developed and scientifically substantiated, within the framework of which the concept of «aviation accessibility of the region» is specified, the functions and types of services performed without alternative by air transport are structured, making it possible to predict the need for development of elements of the air transport system based on assessment of aggregate demand and hidden socio-economic effects obtained from them.

A dependence was obtained between the intraregional aviation mobility of the population of the Arctic regions, the cost of the flight and its waiting time due to the inconsistency of the schedule of connecting flights and their delay due to weather conditions. A new comprehensive methodology has been developed for assessing the transport accessibility of the Arctic region at the regional and local levels, including assessments of accessibility of passenger transportation, accessibility of transportation of socially significant perishable goods, availability of air ambulance services and of the services of the Ministry of Emergency Situations, taking into account seasonal restrictions. Using the example of the Republic of Sakha (Yakutia), it was revealed that the level of accessibility of passenger transportation is 12 times lower than the standard in terms of time and 35 times lower in cost, the level of accessibility of transportation of socially significant perishable goods varies greatly throughout the year, the level of accessibility of air ambulance and emergency services in the most remote settlements is below the maximum permissible by 1,7 times.

A method for assessing the seasonal distribution of passenger flows of local air transportation in less populated areas has been improved and experimentally confirmed, making it possible to divide them into clusters for which an individual strategy for ensuring aviation accessibility is applied. The difference between this method and existing ones lies in formation of clusters, considering simultaneously a large number of criteria that determine the size of demand for air travel and its seasonal distribution. Five clusters were obtained for the Republic of Sakha (Yakutia). In the first, air transportation must be carried out 8 months a year by helicopters and light multipurpose aircraft (LMA), in the second – year-round by helicopters and LMS, in the third – 3 months a year by helicopters, in the fourth – year-round by LMS, in the fifth, air transportation is not required due to availability of alternative types of transportation. This method allows us to justify the need to develop a network of airfields and heliports in Arctic settlements.

A method has been developed for two-level forecasting of demand for intraregional passenger air transportation on existing routes, which differs from the known ones by sequentially solving two problems: forecasting the demand for transportation between populated areas and the centre of the Arctic district and, on its basis, forecasting the demand for interregional transportation from the district centre to the capital of the region. This method allows you to plan the volume of passenger flows of existing intraregional airlines when changing various parameters.

A methodology for calculating passenger flows on newly opened direct air routes between the centres of neighbouring Arctic districts has been developed and scientifically substantiated, taking into account the infrastructure of district centres, the size of the living population and their needs for flights. It has been established that opening of direct routes will triple the inter-district aviation mobility of the population from 0,98 to 2,98 trips

per year. This technique makes it possible to predict passenger flows on newly opened routes and change the configuration of the airlines' route network.

The methodology for assessing the required fleet of aircraft for organising local air transportation has been improved, allowing one to find rational combinations of the types of aircraft used, considering the given frequency of flights and the conditions for minimising their costs. The results of applying this methodology showed that when replacing MI-8 helicopters with AN-2 / AN-3 / Baikal aircraft on several routes, it is possible to achieve a 28 % reduction in the cost of transporting one passenger by reducing fuel consumption and increasing the aircraft load factor while simultaneously increasing the number of flights operated. It has been established that an increase in the number of flights will lead to an increase in the aviation mobility of the population at the local level to 0.65. This methodology allows airlines and regional authorities to plan the composition of their aircraft fleet to organise a given frequency of flights. The feasibility of constructing airfields in populated areas where the demand for passenger air transportation is present for more than 5 months a year is economically rational.

The concept and set of methods and techniques developed in the thesis to ensure aviation accessibility of the Eastern Arctic regions corresponds to the National Development Goals of the Russian Federation; the Fundamentals of the state policy of the Russian Federation in the Arctic, the Strategy for development of the Arctic zone of the Russian Federation and ensuring national security; Transport Strategy of the Russian Federation; Comprehensive plan for modernisation and expansion of trunk infrastructure and the Doctrine of Food Security of the Russian Federation.

According to the results of the study, to ensure aviation accessibility of the Arctic regions, are recommended: amendments to the legal regulation in terms of simplifying the requirements for airports, landing sites and heliports with low flight intensity; introduction of the concept of small aviation into the Air Code, simplifying the requirements for commercial airlines operating LMS; development of a network of landing sites; organisation of domestic production of multi-purpose aircraft with a capacity of 9–12 and 2–4 seats with an increased flight range for air transportation to small populated areas.

A promising area of research on the topic of the thesis is the study of the use of artificial intelligence and digital twins of complex objects and subsystems for managing air transport in the Eastern Arctic. Organisation and management of a system for delivery of goods by unmanned aerial vehicles and creation of a reliable infrastructure for servicing them in the Arctic regions require a detailed scientific and methodological study.

2.9.1. Transport and transport-technological systems of the country, its regions and cities, organisation of production in transport (technical sciences).

The work was performed at Moscow State Technical University of Civil Aviation (MSTU CA), defended in the joint dissertation council of Moscow Automobile and Road State Technical University (MADI) and MSTU CA.

Saburov, M. B. Method and models for organising cargo flows in the conditions of reforming railway transport of the Republic of Uzbekistan. Abstract of Ph.D. (Eng) thesis [Metod i modeli organizatsii gruzopotokov v usloviyakh reformirovaniya zheleznodorozhnogo transporta Respubliki Uzbekistan. Avtoref.dis..kand.tekh.nauk]. St.Petersburg, PGUPS publ., 2023, 16 p.

Currently, extensive economic reforms are being carried out in the Republic of Uzbekistan. In this process, the «New Uzbekistan» strives to form close and mutually beneficial economic relations with neighbouring Central Asian countries, including the countries leading in foreign trade which are China and Russia. The desire of the Republic of Uzbekistan to enter the Eurasian Economic Union and the World Trade Organization will lead to an increase in foreign trade turnover. However, recently in foreign trade turnover

there has been a significant superiority of imports over exports of goods. For example, for the top three leaders in foreign economic relations of the Republic of Uzbekistan, imports of goods are 2.5–3 times more than exports. In the Republic of Uzbekistan, more than 20 million tons of fruits and vegetables are produced annually, of which 1 million is exported to different countries. The Republic of Uzbekistan is the fourth largest cotton exporter in the world. With large and stable volumes of cargo transportation, the role of railway transport can hardly be overestimated. In particular, we are talking about packaged cargo. Unlike the Russian and Chinese railways, where private operators occupy more than 95 % of the market, on the Uzbekistan railways the main fleet consists of inventory cars with an expiring service life, and refrigerated rolling stock, due to the expiration of their service life, is operated only within the Republic of Uzbekistan. This leads to the search for new approaches to organising transportation, in particular the transition to container transportation of the above goods, which simplifies the supply chain for export transportation and reduces transport costs.

The objective of the study is to increase the efficiency of providing containerised cargo flows to Agroexpress trains in the conditions of a new model of the cargo transportation market in the Republic of Uzbekistan by developing a method and mathematical models for their organisation.

The main conclusions, theoretical and practically significant results of the work are as follows.

The analysis of the volume of transportation of packaged cargo was carried out and the main reasons were identified that negatively affect the transportation by rail, such as the lack of a fleet of cargo cars, the high cost of delivering goods relative to road transport. The relevance of developing a comprehensive methodology for organising cargo flows of the agro-industrial and textile complexes in the conditions of updating the rolling stock fleet with innovative cars and containers in the Republic of Uzbekistan has been proven.

An assessment was made of the volume of cargo loading in the agro-industrial and textile complexes and, on its basis, the need for railway rolling stock and the shortage in cargo cars were determined. The total shortage of cargo cars will be 4590 units, of which 1458 units are in export traffic on the Uzbekistan Railway.

A mathematical model has been developed for optimal supply of cargo to the Agroexpress train, which ensures development of effective logistics solutions for formation and distribution of cargo flows of agricultural and textile products, allowing for development of an increased cargo base for Asian countries.

A method for providing cargo to the Agroexpress train has been proposed, considering the variability of structures and stages of cargo delivery with minimal costs in the Republic of Uzbekistan.

An algorithmic support has been developed for solving the problem of optimal supply of goods to the Agroexpress train, which allows for end-to-end monitoring and management of logistics supply chains for agricultural and textile products, considering the following criteria: delivery costs, time differences when delivering goods, environmental damage and safety of goods in the process of delivery.

A simulation model for delivery of cargo to Agroexpress trains has been developed, taking into account the integration of cargo flows, coordination of the elements of the transport and logistics complex and coordination of the interests of participants in the transportation process, for design of logistics schemes for delivery of agricultural and textile products and their replication for different conditions.

The research results were approved, implemented and used in the work of Karshi regional railway junction of JSC «Uzbekistan Temir Yollari» to increase the efficiency of formation of Agroexpress trains for transportation of packaged cargo in the conditions of reforming cargo transportation in the Republic of Uzbekistan. The results were also used in the educational process at the Tashkent State Transport University.

2.9.4. Transportation process management.

The work was performed and defended at Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University. ●





NEW BOOKS ON TRANSPORT AND TRANSPORTATION

*The list of titles in Russian is published
in the first part of the issue*

**Список на русском языке публикуется
в первой части данного выпуска**

Apollonsky, S. M. Energy-saving technologies in the energy sector in Russia: Monograph [*Energoberegayushchie tekhnologii v energetike Rossii: Monografiya*]. Moscow, Ruscience publ., 2023, 440 p. ISBN 9785466038156.

Avramchikova, N. T., Rozhnov, I. P., Prokhorov, V. V., Erygina, L. V. Globalisation and its influence on development of infrastructure industries in the region: Monograph [*Globalizatsiya i ee vliyaniye na razvitiye infrastrukturykh otraslei regiona: Monografiya*]. Moscow, INFRA-M publ., 2023 (Moscow), 237 p. ISBN 978-5-16-018409-8.

Belovitsky, K. B. Economic security of an organisation: Monograph [*Ekonomicheskaya bezopasnost organizatsii: Monografiya*]. Moscow, Dashkov K^o publ., 2023, 182 p. ISBN 978-5-394-05210-1.

Bessonova, N. V., Kovalenko, N. A. Management of operations. Standardisation of shunting work at railway stations [*Upravleniye ekspluatatsionnoy rabotoy. Normirovaniye manevrovoy raboty na zheleznodorozhnykh stantsiyakh*]. Moscow, RUT (MIIT) publ., 2023, 114 p. ISBN 978-5-907776-89-0.

Dyadik, A. N., Surin, S. N., Balakin, A. V., Malykh, N. P. Energy of marine underwater objects: Monograph [*Energetika morskikh podvodnykh obektov: Monografiya*]. St. Petersburg, St. Petersburg State Marine Technical University, 2023, 383 p. ISBN 978-5-88303-650-6.

Fedorov, O. V. Engineering activity and resource orientation in the innovation sphere: Monograph [*Inzhenernaya deyatel'nost i resursnaya napravlen'nost v innovatsionnoy sfere: Monografiya*]. Moscow, Ru-Science publ., 2023, 128 p. ISBN 978-5-466-00865-4.

Gorbunov, V. P. Airplane and cold: climatic testing and operation of aircraft in extremely low temperatures of the Arctic, Siberia and the Far North: Monograph [*Samolet i kholod: klimaticheskie ispytaniya i ekspluatatsiya vozdukhnykh sudov v usloviyakh ekstremalno nizkikh temperature Arktiki, Sibiri i Krainego Severa: Monografiya*]. St. Petersburg, Naukoemkie tekhnologii publ., 2023, 711 p. ISBN 978-5-907618-46-6.

Kozin, E. S., Bazanov, A. V. Unmanned technologies in road transport: Monograph [*Bespilotnie tekhnologii na avtomobilnom transporte: Monografiya*]. Tyumen, TIU publ., 2023, 178 p. ISBN 978-5-9961-2066-6.

Kozin, V. M., Zemlyak, V. L., Kurkin, A. A., Belyakov, V. V. Selected problems of ice engineering. Means and methods of solution: Monograph [*Izbrannye zadachi ledotekhniki. Sredstva i metody resheniya: Monografiya*]. Nizhny Novgorod [et al]: Nizhny Novgorod State Technical University, 2023, 771 p. ISBN 978-5-502-01733-6.

Kravtsevich, S. V. Reproduction of labour in the domestic labour market in conditions of imperfect competition in social and labour relations: Monograph [*Vosproizvodstvo rabochei sily na otechestvennom rynke truda v usloviyakh*

nesovershennoi konkurentsii v sotsialno-trudovykh otnosheniyakh: Monografiya]. Moscow, Ru-Science publ., 2023, 117 p. ISBN 978-5-466-02493-7.

Kulev, A. V., Kulev, M. V., Lomakin, D. O. Theoretical and practical aspects of optimisation and decision-making in the field of transport systems using simulation methods: Monograph [*Teoreticheskie i prakticheskie aspekty optimizatsii i prinyatiya reshenii v oblasti transportnykh sistem s ispolzovaniem metodov imitatsionnogo modelirovaniya: Monografiya*]. Oryol, Turgenev OSU, 2023, 241 p. ISBN 978-5-9929-1413-9.

Mazhkenov, S. A. Safety and labour economics: current problems and solutions: Monograph [*Bezopasnost i ekonomika truda: aktualnye problemy i resheniya: Monografiya*]. Moscow, Justitsinform publ., 2023, 279 p. ISBN 978-5-7205-1895-0.

Milgrom, P., Roberts, J. Economics, Organization, and Management. [Russian ed.]. Transl. from English by I. V. Rozmainsky [et al.]. Moscow, Alpina PRO, 2023 (Chekhov, Moscow region), 1112 p. ISBN 978-5-206-00022-1.

Nechaev, G. I., Slobodyanyuk, M. E. Infrastructure of transport systems: Monograph [*Infrastruktura transportnykh sistem: Monografiya*]. Moscow, Hotline-Telecom publ., 2023, 203 p. ISBN 978-5-9912-1074-4.

Perevoshchikov, S. I. Gas-saturated oils. Physical properties. Pipeline transport: Monograph [*Nefti gazonasyshchennyye. Fizicheskie svoystva. Truboprovodnyy transport: Monografiya*]. Tyumen, TIU publ., 2023, 179 p. ISBN 978-5-9961-3080-1.

Shtang, A. A., Biryukov, V. V. Improving the efficiency of electric transport systems using energy storage units: Monograph. Novosibirsk, NSTU Publishing house, 2023, 258 p. ISBN 978-5-7782-5056-7.

Sobolev, V. M., Izyumsky, A. A., Kotenkova, I. N., Motrenko, Ya. A. Increasing the efficiency of control and supervision activities in transport: Monograph [*Povysheniye effektivnosti kontrol'no-nadzornoj deyatel'nosti na transporte: Monografiya*]. Krasnodar, Publishing House-Yug, 2023, 199 p. ISBN 978-5-91718-748-8.

Soroko, V. I., Soroko, A. V., Fotkina, Zh. V. Automation, telemechanics, communications on Russian railways: Encyclopedia: in three volumes [*Avtomatika, telemekhanika, svyaz na zheleznykh dorogakh Rossii: Entsiklopediya: v trekh tomakh*]. Ed. by Ph.D. (Economics) V. I. Soroko, D.Sc. (Economics) A. V. Soroko. 2nd ed., enl. and rev. Moscow, Planeta publ., 2023, Vol. 2, 2023, 606 p. ISBN 978-5-901307-36-6.

Tlyavlina, G. V. Scientific rationale of the regulatory framework for design of transport structures protecting against hydrodynamic influences of the natural aquatic environment [*Nauchnoe obosnovaniye normativnoi bazy po proektirovaniyu zashchity transportnykh sooruzhenii ot gidrodinamicheskikh vozdeystviy estestvennoi vodnoi sredy*]. Moscow, LLC Publishing House «Ekon-Inform», 2023, 173 p. ISBN 978-5-907681-28-6.

Vorobyov, V. I., Zlobin, S. N., Izmerov, O. V. [et al.]. Technical innovation. Application of physical and technical effects in design of transport vehicles: Monograph [*Tekhnicheskaya innovatsionika. Primeneniye fiziko-tekhnicheskikh effektivov pri konstruirovani transportnykh mashin: Monografiya*]. Oryol, Turgenev OSU, 2023, 207 p. ISBN 978-5-9929-1423-8.

Compiled by N. OLEYNIK ●

CONTENTS OF THE ISSUES OF WORLD OF TRANSPORT AND TRANSPORTATION JOURNAL PUBLISHED IN VOL. 21 (2023)

THEORY

<i>Bubnova, G. V., Pokusaev, O. N., Akimov, A. V.</i> The Quality of Public Transport Services in Multimodal Commuting in a Megalopolis.	Iss. 6 (109)	pp. 191–200
<i>Gorbunov, R. N., Gorbunova, Z. V., Kolchin, V. S.</i> Promising Areas of Research for Developing Single Approaches to Assessing the Quality, Dependability and Efficiency of Traffic Management	Iss. 5 (108)	pp. 174–180
<i>Gvishiani, A. D., Rozenberg, I. N., Soloviev, A. A.</i> Geophysical Processes in the Arctic and the System Analysis of their Impact on Operation and Development of the Transport Infrastructure	Iss. 3 (106)	pp. 154–182
<i>Karlov, A. V., Evseev, O. V.</i> Approaches to Methodological Rationale of Development of Single Backbone Transport Network and Prioritisation of Transport Infrastructure Development Projects.	Iss. 6 (109)	pp. 183–190
<i>Rosenberg, I. N., Sokolov, S. S., Dubchak, I. A.</i> Methods for Development of a Digital Twin of the Water Area for Navigation of Unmanned Vessels	Iss. 6 (109)	pp. 176–182
<i>Tarasenko, E. A., Tyapukhin, A. P.</i> Matrix Approach to Designing Principles of Management of Transport Enterprises	Iss. 5 (108)	pp. 164–173

SCIENCE AND ENGINEERING

<i>Adadurov, A. S., Fedorinin, V. N., Bekher, S. A., Gulyaev, M. A.</i> Possibility of Monitoring the Dynamic Impact of the Rolling Stock on the Track Superstructure Using Strain Gauges and Vibrometry	Iss. 4 (107)	pp. 158–166
<i>Baturin, A. P., Osipov, A. P.</i> Modern Systems of Train Traffic Interval Control on World Railways	Iss. 2 (105)	pp. 164–172
<i>Demidov, I. M., Poliakov, V. Yu.</i> Optimisation of the Design of an Underwater Floating Transport Structure	Iss. 5 (108)	pp. 192–203
<i>Doroshenko, K. A., Ashpiz, E. S., Korostelev, V. A.</i> Material Laboratory Testing of the Sub-Ballast Protective Layer with Binding Agents	Iss. 6 (109)	pp. 202–207
<i>Dyatlov, V. N., Orlov, S. V., Popov, V. A.</i> Combined Influence of Cyclic Loads and Corrosion on the Technical Condition of Metal Structures of Metro Escalators	Iss. 4 (107)	pp. 167–174
<i>Evseev, D. G., Shinkaruk, A. S., Kulikov, Yu. M.</i> Digitalisation of the Database of Passenger Coach's Elements Using the Example of Wheelset Repair	Iss. 6 (109)	pp. 232–237
<i>Fazilova, Z. T.</i> The Impact of Anisotropic Properties of the Rail Track Superstructure on the Parameters of Dynamic Settlement of Bridge Approaches	Iss. 3 (106)	pp. 197–205
<i>Grebennikov, N. V., Zarifyan, A. A.</i> Energy Efficiency Improvement Concept for Autonomous Locomotives	Iss. 1 (104)	pp. 146–153
<i>Kosmodamiansky, A. S., Vorobiev, V. I., Izmerov, O. V., Rasin, D. Yu., Shevchenko, D. N.</i> Issues of Developing Equal-Strength Two-Layer Spherical Rubber-Metal Hinges	Iss. 1 (104)	pp. 162–170
<i>Kudrov, M. A., Bukharov, K. D., Makhotkin, D. R., Aivazov, R. S.</i> Statement of the Problem of Control of an Autonomous Surface Vessel for Inland Waterways	Iss. 3 (106)	pp. 184–188
<i>Lyashenko, A. Yu.</i> Rubble Sandstone Unloading and Screening Unit with Non-Volatile Auxiliary Equipment Drive	Iss. 3 (106)	pp. 206–212
<i>Nezevak, V. I., Dmitriev, A. D., Samolinov, S. S.</i> Simulation of Short-Term Modes of Operation of Traction Power Storage Devices	Iss. 2 (105)	pp. 152–163
<i>Popov, D. A., Epifanov, V. S., Zyabrov, V. A.</i> On the Relationship of Torsional Vibrations and Breakdown Torque of Marine Diesel Engines	Iss. 5 (108)	pp. 211–216
<i>Shantarenko, S. G., Savinkin, S. V.</i> Increasing the Dynamic Characteristics of the Locomotive by Changing the Position of the End Coils of the Springs of the Body Spring Suspension	Iss. 6 (109)	pp. 208–215
<i>Shepitko, T. V., Artyushenko, I. A.</i> Evaluation of Influence of Seasonally Operating Cooling Devices on Thermophysical Processes of Soils of Railway Embankment Foundation	Iss. 1 (104)	pp. 154–161
<i>Tlyavlin, R. M.</i> Assessment of the Technical Condition of Spur Dikes	Iss. 3 (106)	pp. 189–196





<i>Tlyavlina, G. V., Tlyavlin, R. M., Yaroslavl'tsev, N. A.</i> Protection of Transport Structures from Wave Action by Creating a Sandy Wave-Damping Beach	Iss. 5 (108)	pp. 182–191
<i>Vataev, A. S., Vatulin, Ya. S., Kavkazsky, V. N.</i> Simulation of the Dynamic Impact of High-Speed Rolling Stock on Buried Structures of the Tunnel Type	Iss. 6 (109)	pp. 238–250
<i>Yaroslavl'tsev, M. V.</i> Unification of Onboard Traction Energy Storage Devices for Railway Rolling Stock	Iss. 6 (109)	pp. 216–226
<i>Zakirov, A. Kh., Nazarov, F. Kh.</i> Numerical Method for Calculating Plane Flows of Viscous Gas in a Cylinder	Iss. 4 (107)	pp. 152–157
<i>Zbryskiy, M. T.</i> Assessment of the Impact of Construction of Reinforced Soil Retaining Walls on Abutment Pile Group Foundation	Iss. 5 (108)	pp. 204–210
<i>Zuev, A. S., Glushchenko, M. D.</i> Study of an Asynchronous Traction Motor with Inclined Slot Rotor	Iss. 6 (109)	pp. 227–231

MANAGEMENT, CONTROL AND ECONOMICS

<i>Andreev, S. A.</i> Development of a Method for Assessing the Quality of Public Transport Services within Urban Transportation Planning Systems	Iss. 5 (108)	pp. 241–249
<i>Bandurin, A. V., Matyukha, S. V.</i> Interaction Model of Regional Air Transportation Market Participants under the Conditions of Limited Competition	Iss. 6 (109)	pp. 252–260
<i>Boyarshtinov, M. G., Vavilin, A. S.</i> Duration of Car Movement in the Flow as a Traffic Congestion Indicator	Iss. 5 (108)	pp. 250–261
<i>Epikhin, A. I., Kondratiev, S. I., Kheker, E. V.</i> Diagnostics of Ship Engines Based on Wavelet Neural Network and Image Scanning Using Programmable Logic Circuit.	Iss. 6 (109)	pp. 275–282
<i>Filippova, N. A., Abakarov, A. A., Amirov, A. T., Igitov, Sh. M.</i> Improving Transportation and Traffic Safety with Digital Infrastructure and Telematic Systems for Mountain Vehicle Operations	Iss. 4 (107)	pp. 207–216
<i>Gogrichiani, G. V., Kornienko, N. V.</i> Increasing the Capacity of a Locomotive Depot by Prioritising Organisational and Technical Measures	Iss. 6 (109)	pp. 261–267
<i>Kargina, L. A., Ionova, T. V.</i> Non-Financial Risks of Introducing Information Systems into the Activities of Transport and Logistics Companies	Iss. 2 (105)	pp. 192–197
<i>Karlov, A. V.</i> Decision-Making Methods in Transport Policy: a Multi-Criteria Approach	Iss. 1 (104)	pp. 172–179
<i>Kholikov, I. V.</i> Legal Regulation of Military Transport Obligation in the Russian Federation	Iss. 4 (107)	pp. 217–222
<i>Kolesnikov, M. V., Bogachev, V. A., Zadorozhniy, V. M., Bakalov, M. V.</i> Analysis of Competitiveness of Small Ports of the Azov-Black Sea Basin in Multimodal Transportation: Technological Aspects, Transportation Problem Optimisation	Iss. 3 (106)	pp. 222–232
<i>Kopylov, M. A.</i> Development of a Harmonised Software Algorithm to Prepare to Transport Oversized Cargo	Iss. 1 (104)	pp. 228–236
<i>Kurzina, E. G., Kornienko, N. A., Kurzina, A. M.</i> Rationale for Transport Costs when Transporting Bulk Cargo in Containers with the Integral Method	Iss. 6 (109)	pp. 295–300
<i>Martynenko, A. V., Saifutdinov, D. Zh.</i> Adequacy of the Gravity Model of Railway Passenger Flows	Iss. 1 (104)	pp. 213–223
<i>Maslennikov, V. A., Zaika, M. V., Markelov, A. V.</i> Methodology for Designing Road Vehicle Service Facilities	Iss. 2 (105)	pp. 204–210
<i>Moskvichev, O. V., Leonova, S. A., Vasiliev, D. V.</i> Using an Artificial Neural Network to Record and Analyse the Performance Indicators of a Transport Enterprise	Iss. 2 (105)	pp. 185–191
<i>Nesterov, E. A., Tsvetkov, V. Ya.</i> Transport Cybersecurity	Iss. 6 (109)	pp. 268–274
<i>Odenbakh, I. A., Orekhov, S. A., Taurit, E. B.</i> Alternativeness in the Architectural Design of Bridges and Overpasses	Iss. 2 (105)	pp. 219–224
<i>Osintsev, N. A., Tsyganov, A. V., Rakhmangulov, A. N., Baginova, V. V.</i> Multicriteria Comparison of Piggyback Systems	Iss. 6 (109)	pp. 283–294
<i>Panova, O. N., Vakulenko, S. P., Egorov, P. A.</i> Unification of Passenger Trains when Organising Irregular Railway Transportation	Iss. 5 (108)	pp. 236–240
<i>Poleshkina, I. O., Vorobiev, V. V.</i> Development of a Network of Landing Sites and Heliports: Ensuring Aviation Accessibility of Settlements in the Arctic Regions	Iss. 2 (105)	pp. 174–184

<i>Rakhaev, V. A., Kuzina, E. L., Vasilenko, M. A.</i> Development of Proposals for Increasing the Efficiency of Using Domestic High-Capacity Rolling Stock in the South of Russia	Iss. 5 (108)	pp. 228–235
<i>Rogulin, R. S.</i> Optimisation of Timber Supply Chains: Mathematical Model and Analysis of Regional Sources Using the Example of Primorsky Region	Iss. 5 (108)	pp. 218–227
<i>Rozenberg, E. N., Ozerov, A. V., Kuznetsov, V. I., Tikhonov, S. S.</i> Comparison of Train Traffic Parameters for Various Virtual Coupling Use Cases	Iss. 4 (107)	pp. 176–185
<i>Rubtsov, E. A., Kudryakov, S. A., Dalinger, Ia. M.</i> Methodology for Assessing Shortened ILS LOC and GP Critical Areas: an Example of Gorno-Altai Aerodrome	Iss. 4 (107)	pp. 186–198
<i>Shinkaruk, A. S.</i> Technical Preparation for Scheduled Preventive Maintenance of Double-Decker Rolling Stock	Iss. 4 (107)	pp. 199–206
<i>Sukhov, Ph. I., Zverkova, V. M.</i> Assessment of Sustainable Development Aspects in Transport Companies Activities	Iss. 1 (104)	pp. 188–193
<i>Teng Zhang</i> Trends in Development of Chinese-Russian Relations in the Field of Railway Transport	Iss. 1 (104)	pp. 180–187
<i>Tlyavlina, G. V.</i> Physical Modelling in Development of the Regulatory Framework for Transport Construction	Iss. 2 (105)	pp. 211–218
<i>Tsyganov, A. A.</i> Results of a Market Study of Vehicle Repairs Covered by Compulsory Motor Third Party Liability Insurance	Iss. 5 (108)	pp. 262–270
<i>Tyapukhin, A. P.</i> The Structure of Organisation Management Methods within the Value Chain	Iss. 1 (104)	pp. 194–204
<i>Uryupin, I. V.</i> Defining Standard of Access to Domestic Air Travel	Iss. 3 (106)	pp. 214–221
<i>Vakulenko, S. P., Romensky, D. Yu., Kalinin, K. A.</i> Typification of Projects for Development of High-Speed Rail	Iss. 3 (106)	pp. 233–242
<i>Zemlin, A. I., Shinkaruk, A. S., Vishniakova, E. P.</i> Legal and Technological Aspects of Life Cycle Contract Implementation in the Long- Distance Passenger Rail Transportation	Iss. 1 (104)	pp. 224–227
<i>Zemlin, A. I.</i> Problems of Ensuring Safe Operation of Highly Automated Vehicles Using the Potential of Public and Private Law	Iss. 2 (105)	pp. 198–203
<i>Zhukov, V. E.</i> Simulation Model for Airport Disruption Management	Iss. 1 (104)	pp. 205–212

SAFETY AND SUSTAINABILITY

<i>Efanov, D. V., Mikhailyuta, E. M.</i> Reliability and Safety Management of the Transportation Process Using Systems for Continuous Monitoring of Railway Infrastructure Facilities	Iss. 2 (105)	pp. 226–236
<i>Efanov, D. V., Mikhailyuta, E. M., Pashukov, A. V.</i> Technological Basis for Data Interoperability of Highway Structural Health Monitoring Systems and Intelligent Transport Systems	Iss. 5 (108)	pp. 272–281
<i>Filippov, V. N., Nedorchuk, B. L., Petrov, A. A., Kurzina, E. G.</i> Technical and Legal Aspects of Ensuring Safety of Transportation of Dangerous Goods of Hazard Classes 2 and 3 in Tank Cars	Iss. 2 (105)	pp. 251–260
<i>Gordeev, D. S., Tomaev, A. O.</i> Scenario Analysis of the Prospects for the Use of Alternative Fuels for Road Transport in Russia	Iss. 4 (107)	pp. 232–241
<i>Klepalova, Yu. I., Shcherbakova, O. V., Balitsky, K. S.</i> Medical Examinations of Employees Involved in Traffic and Transportation	Iss. 2 (105)	pp. 243–250
<i>Kossov, V. S., Knyazev, D. A., Krasnyukov, N. F., Makhutov, N. A., Gadenin, M. M.</i> Regulatory Framework for Ensuring Safe Operation of Railway Equipment Based on the Service Life of Load-Bearing Structures	Iss. 3 (106)	pp. 254–262
<i>Kupriyanovich, M. S.</i> The Role and Place of the International Ship and Port Facility Security Code in the International Legal Mechanism for Ensuring Security in Maritime Transport	Iss. 5 (108)	pp. 298–304
<i>Leonov, T. M., Zemlina, O. M.</i> Legal Regulation of Control (Supervision) over Quality and Safety of Medical Activities in Transport Industry	Iss. 2 (105)	pp. 237–242
<i>Limarev, A. S., Vorotnikov, M. Yu.</i> Comparative Assessment of the Prospects for Hydrogen Fuel Cell Electric Vehicles	Iss. 4 (107)	pp. 242–247
<i>Lyovin, B. A., Tsvetkov, V. Ya., Isain, N. V., Okhotnikov, A. L.</i> Bifurcation Points of Carbon Regulation	Iss. 3 (106)	pp. 244–253



<i>Makhutov, N. A., Gadenin, M. M., Kossov, V. S., Knyazev, D. A., Krasnyukov, N. F.</i> Development of Risk-Based Approaches to Determining the Damageability and Useful Life of Railway Transportation Assets	Iss. 4 (107)	pp. 224–231
<i>Malyshov, M. I.</i> Control of the Safety of Bulk Cargo by Determining the Unfilled Volume of the Gondola Car with Stereophotogrammetry	Iss. 5 (108)	pp. 291–297
<i>Reyes Suarez, Yarian, Balabin, V. N., Morejón Mesa, Yanoy</i> Emissions of Pollutant Gases (CO and CO ₂) when Using Fuel Mixtures (Ethanol-Petrol) in Internal Combustion Engines	Iss. 4 (107)	pp. 248–252
<i>Sargina, A. V., Sedova, N. V.</i> Tracking Availability of SDG 9.1 Indicators Regarding Transport Infrastructure Using the Example of G20 Member Countries	Iss. 1 (104)	pp. 238–245
<i>Tskhovrebov, Ed. S.</i> New Approaches to Improving Protection of the Urban Environment from Transport Accidents Based on the Use of Safe Materials	Iss. 1 (104)	pp. 246–252
<i>Tsyganov, A. V., Osintsev, N. A., Rakhmangulov, A. N., Zenkin, A. A.</i> Sustainability Criteria for a Piggyback System	Iss. 5 (108)	pp. 282–290
<i>Zemlin, A. I., Matveeva, M. A., Gots, E. V.</i> Risk Management for the Safe Use of Highly Automated Vehicles in a Metropolis: Systems and Legal Analysis	Iss. 3 (106)	pp. 263–270
HISTORY WHEEL		
Draft Regulation on the Train Traffic on Russian Railways (Steam Locomotives' Railways) Open for Public Use (1892). Press archives	Iss. 1 (104)	pp. 262–268
<i>Epishkin, I. A., Karpov, L. A., Buditsky, E. G.</i> 55 Years at the Forefront of Transport Continuous Professional Education	Iss. 2 (105)	pp. 262–271
<i>Kuanyshev, B. M.</i> Remembering the Scientific Alma Mater	Iss. 6 (109)	pp. 302–308
<i>Kulikova, E. B., Enova, L. E.</i> Dedicated to the Memory of MIIT University Students – Fighters of 19 Separate ASWC Battalion...	Iss. 1 (104)	pp. 254–261
<i>Kurganov, V. M., Gryaznov, M. V., Dorofeev, A. N.</i> The Study of the Logistics Ontology by the Historical-Genetic Method	Iss. 3 (106)	pp. 272–279
<i>Levin, D. Yu.</i> S. Yu. Witte – Originator of Railway Tariffs Theory. Part 1	Iss. 5 (108)	pp. 306–310
<i>Levin, D. Yu.</i> S. Yu. Witte – Originator of Railway Tariffs Theory. Part 2	Iss. 6 (109)	pp. 309–320
<i>Macheret, D. A.</i> The Role of Transport in Formation of the «Advancement Effect» in Ancient and Medieval Societies	Iss. 4 (107)	pp. 254–263
Northern Siberian Trade Route and Polar Urals Railway. Part 1. Press archives	Iss. 2 (105)	pp. 272–276
Northern Siberian Trade Route and Polar Urals Railway. Part 2. Press archives	Iss. 3 (106)	pp. 280–290
<i>Semenov, N. M.</i> How Transport Rarities Were Preserved	Iss. 4 (107)	pp. 264–273
Twenty-Five Years of Engineering and Scientific Activity of Nikolai A. Belelyubsky (report by A. N. Gorchakov in the Imperial Russian Technical Society in 1892)	Iss. 4 (107)	pp. 274–280
BIBLIO-DIRECTIONS		
<i>Chernigina, I. A.</i> A Cure for Railay Employees' Headaches (Review of the Monograph «Economic Assessment of Seasonal Unevenness of Transportation»)	Iss. 5 (108)	pp. 312–313
<i>Efanov, D. V.</i> Safe Railways (Review of the monograph «Functional Safety of Railway Control Systems»)	Iss. 6 (109)	pp. 322–324
<i>Glushachenko, S. B., Zelepukin, R. V.</i> Military Legal Knowledge for Future Transport Employees (Review of the Three-Volume Monograph «Military Law»)	Iss. 1 (104)	pp. 270–273
<i>Kargina, L. A.</i> Road Management with Mathematical Accuracy	Iss. 4 (107)	pp. 282–284
<i>Larin, O. N.</i> Urban Transportation Systems in Large Cities: Issues of Efficiency	Iss. 2 (105)	pp. 278–281
ABSTRACTS OF D.SC. AND PH.D.		
Iss. 1 (104) pp. 274–279, Iss. 2 (105) pp. 282–287, Iss. 3 (106) pp. 292–295, Iss. 4 (107) pp. 285–288, Iss. 5 (108) pp. 314–316, Iss. 6 (109) pp. 325–327		
NEW BOOKS ON TRANSPORT AND TRANSPORTATION		
Iss. 1 (104) P. 280, Iss. 2 (105) P. 288, Iss. 3 (106) P. 296, Iss. 4 (107) P. 288, Iss. 5 (108) P. 316, Iss. 6 (109) P. 328		

The exposition «Russia in Motion» opened at VDNH

On November 25, 2023, the exposition of the Ministry of Transport of the Russian Federation «Russia in Motion» opened as part of the International RUSSIA EXPO.

For the first time in recent history, the legendary Pavilion No. 15 at VDNH presents the achievements of the entire transport industry, the prospects for the country's transport, infrastructure and logistics projects from Kamchatka to Kaliningrad. The exposition was opened by First Deputy Prime Minister Andrei Belousov and Minister of Transport Vitaly Savelyev.

Andrey Belousov highly appreciated the exposition of the Ministry of Transport of Russia. «In this pavilion in a fairly small area, we managed to get a complete picture of the work of the transport industry over the past 6–10 years. What is very important is that a lot has been done in an interactive form,» the First Deputy Prime Minister said. He also noted that soon the transport of Russia will celebrate its 215th anniversary. «At the same time, judging by the artifacts presented at the exposition and dedicated to the construction of the M-11 highway, the transport industry in Russia is at least a thousand years old,» said Andrey Belousov.

«Today we are opening a pavilion dedicated to the transport industry of Russia. Next year, the



transport will celebrate its 215th anniversary. We, as the successors of its history, will do everything possible to ensure that the residents of our country have the opportunity to travel well. Mobility is one of the main factors in the quality of life,» said Minister of Transport Vitaly Savelyev.

CEOs of transport enterprises told the audience at the opening of the exposition about the projects presented by the companies, as well as the main achievements of the industry.

The exposition shows all areas of activity of the Ministry of Transport: air, rail, sea and inland water transport, construction of roads and infrastructure facilities, road facilities, digitalisation, leasing, transport safety and security, and border checkpoints.

Establishment of the V. N. Obratzov Prize in the field of transport science and technology

Starting in 2024, the prizes in the field of transport science and technology will be awarded in Russia. Prizes are named after Vladimir Nikolayevich Obratzov, a Russian and Soviet scientist, the founder of the national school of designing railway stations and transport hubs, and of the comprehensive study and development of all modes of transport. The relevant **decree** was signed by Prime Minister of the Russian Federation Mikhail Mishustin.

Prizes will be awarded in three categories: for merits in the field of transport science and transport education, for contribution to the development of transport and transport infrastructure construction, for the introduction of innovative technological solutions in transport and in the field of transport

construction. Prize-winners will be rewarded with 1 mln rubles each.

The prize will provide an opportunity to support transport scientific schools, identify solutions and discoveries that contribute to improving the traffic speed and safety, as well as highlight the best examples of transport infrastructure construction.

The prize award ceremony will be timed to coincide with the Day of Transport Employees celebrated yearly on November 20.

Compiled basing on the materials of the press centre of the Ministry of Transport of the Russian Federation: <https://mintrans.gov.ru/press-center/news/11008>, <https://mintrans.gov.ru/press-center/news/11001> ●



**World of Transport
and Transportation**

Vol. 21, Iss. 6, 2023

Editor-in-Chief

Igor N. Rozenberg

For your letters:

Russian University of Transport,
World of Transport and
Transportation Journal,
9, str. 9, Obraztsova ul.,
Moscow, 127994, Russia.
e-mail: mirtr@mail.ru

Почтовый адрес редакции:

127994, Москва,
ул. Образцова, д. 9, стр. 9.
Российский университет
транспорта,
Издательство «Транспорт РУТ»
Тел.: + 7(495)2740274 доб. 3004
e-mail: mirtr@mail.ru



ISSN 1992-3252



9 771992 325778 >