

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

Учредитель

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

Издатель

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

Founder

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University

Publisher

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

Контакты

190031, СПб., Московский пр., 9, тел. (812) 457-85-36;
e-mail: brni@pgups.ru;
127214, г. Москва, ул. Полярная, д. 31В, стр. 1, оф. 402

Contacts

190031, St. Petersburg, Moskovskiy pr., 9, (812) 457-85-36;
e-mail: brni@pgups.ru;
127214, Russia, Moscow, Polyarnaya str., 31Bc1, office 402

Свидетельство о регистрации средства массовой информации

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

Mass media registration certificate number

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

Журнал зарегистрирован в Российском индексе научного цитирования (РИНЦ)

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

Журнал имеет институт рецензирования

The Journal has the Peer-review division

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

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

Минимальные системные требования

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

МЕЖДУНАРОДНЫЙ РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

INTERNATIONAL EDITORIAL

Паньчев Александр Юрьевич, канд. экон. наук, доц., ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия, председатель Совета
Alexander Panychev, PhD Econ. Sci., Associate Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia, Chairman of Editorial board

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Колпакчян Павел Григорьевич, д-р техн. наук, доц., РГУПС, Ростов-на-Дону, Россия
Pavel Kolpakchyan, D. Eng. Sci., Associate Professor, Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russia

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

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

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

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

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

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

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

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

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

ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ И УСЛОВИЯ

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

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

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

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

Файл 1 – рукопись научной статьи в формате MS Word.

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

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

Файл 4 – информация об авторах:

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

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

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

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

Файл 8 – лицензионный договор.

1.5 Все рукописи проходят рецензирование (внешняя экспертная оценка).

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

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

ТРЕБОВАНИЯ К ТЕКСТУ

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

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

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

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

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

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

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

Внимание! Рисунки и формулы не должны быть сканированными!

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

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

Содержание

ОБЩЕТЕХНИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

Р. Г. Ахтямов	Анализ последствий изменения климата для управления климатическими рисками на железнодорожном транспорте	7
Р. Г. Ахтямов	Оценка геопространственных особенностей изменения климата на примере стран BRICS	18
Т. В. Слотина, И. Д. Васильева	Межличностные отношения, переживание одиночества и темперамент студентов транспортного вуза	28
Н. А. Перминов	О работе сборных водопропускных труб в теле насыпи двухпутного земляного полотна	41
С. В. Беспалько, Н. О. Жухин, О. Е. Пудовиков	Уточнение математической модели межвагонной связи с пружинно-фрикционными поглощающими аппаратами для исследования продольных колебаний грузового поезда	54

ПРОБЛЕМАТИКА ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

П. А. Пегин, Д. М. Немчинов, А. А. Ильин	Анализ эффективности развития сети автомобильных дорог	71
А. А. Зарифьян, П. Г. Колпахчьян	Расчетная методика определения потерь в асинхронном тяговом двигателе электровоза при изменяющейся нагрузке	81
А. В. Агунов, А. А. Карабанов, И. А. Терехин, И. А. Баранов	Расчет тепловых потерь в комбинированной фильтрокомпенсирующей установке	92
Н. Л. Михальчук, Ю. И. Попов, А. Н. Савоськин, О. Е. Пудовиков, А. А. Чучин	Повышение эффективности электропривода электровоза с управляемым преобразователем возбуждения тяговых двигателей	104

Д. Д. Каримов, А. А. Воробьев, А. С. Ватаев, Я. С. Ватулин, К. А. Сотников	Исследование поперечной устойчивости высокоскоростного подвижного состава при выходе из тоннеля	115
--	---	-----

ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Е. М. Волкова, М. В. Денисов	Оценка перспектив развития совместного потребления транспортных услуг в городах Российской Федерации	136
Н. А. Журавлева, В. В. Уманец	Методологические аспекты организации грузоперевозок железнодорожным транспортом в проектах развития Восточного полигона с учетом рисков инфраструктурных ограничений	146

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ — ТРАНСПОРТУ

С. В. Акулинин, В. Б. Воробьев, В. А. Ульянов	Перспективные технологии усиления основной площадки земляного полотна подбалластным защитным слоем с применением высокопроизводительных комплексов российского производства	161
А. Н. Сычугов	Применение машинного обучения для анализа технических характеристик и параметров эксплуатируемого подвижного состава на высокоскоростных железнодорожных магистралях	171
С. Н. Журавлев, О. Е. Пудовиков	Система автоматического управления скоростью маневрового тепловоза в режиме горочной работы	181

Contents

GENERAL TECHNICAL PROBLEMS AND SOLUTION APPROACH

R. G. Akhtyamov	Analysis of Climate Change Consequences for Climate Risk Management in Railway Transportation	16
R. G. Akhtyamov	Assessment of the Geospatial Features of Climate Change, on the Example of BRICS	26
T. V. Slotina, I. D. Vasilieva	Interpersonal Relationships, Loneliness Experience and Temperament of Transport University Students	37
N. A. Perminov	On the Operation of a Combined Culvert in the Body of a Double-Track Embankment	51
S. V. Bespal'ko, N. O. Zhukhin, O. E. Pudovikov	Refinement of the Mathematical Model of Inter-Car Coupling with Spring-Friction Absorbing Devices for the Study of Longitudinal Vibrations of a Freight Train	69

PROBLEMATIC OF TRANSPORT SYSTEM

P. A. Pegin, D. M. Nemchinov, A. A. Ilyin	Analysis of the Effectiveness of the Development of the Road Network	78
A. A. Zarifyan, P. G. Kolpahchyan	Calculation Method for Determining Losses in Electric Locomotive Asynchronous Traction Motor under Changing Load	90
A. V. Agunov, A. A. Karabanov, I. A. Terekhin, I. A. Baranov	Calculation of Heat Losses in The Combined Filter-Compensating Unit	102
N. L. Mikhalchuk, Yu. I. Popov, A. N. Savoskin, O. E. Pudovikov, A. A. Chuchin	Improving the Efficiency of the Electric Locomotive Drive with a Controllable Converter for Traction Motor Excitation	112

D. D. Karimov, A. A. Vorob'ev, A. S. Vatayev, Ya. S. Vatulin, K. A. Sotnikov	Study of Transverse Stability of High-Speed Rolling Stock at Tunnel Exit	134
--	---	-----

ECONOMICS AND MANAGEMENT

E. M. Volkova, M. V. Denisov	Assessment of Prospects for the Development of Transport Sharing in the Cities of the Russian Federation	144
N. A. Zhuravleva, V. V. Umanets	Methodological Aspects of the Organization of Freight Transportation by Rail in the Development Projects of the Eastern Polygon Considering Risks of Infrastructure Constraints	158

HIGH TECHNOLOGIES FOR TRANSPORT

S. V. Akulinin, V. B. Vorobyov, V. A. Ulyanov	Prospective Technologies for Strengthening the Main Trackbed with a Sub-Ballast Protective Layer Using High-Performance Complexes of Russian Production	169
A. N. Sychugov	Application of Machine Learning to Analyze the Technical Characteristics and Parameters of the Rolling Stock in Operation on High-Speed Railway Lines	179
S. N. Zhuravlev, O. E. Pudovikov	Automatic Speed Control System of a Hump-Shunting Diesel Locomotive	193

ОБЩЕТЕХНИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

УДК 551.583.2

Анализ последствий изменения климата для управления климатическими рисками на железнодорожном транспорте

Р. Г. Ахтямов

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

Для цитирования: Ахтямов Р. Г. Анализ последствий изменения климата для управления климатическими рисками на железнодорожном транспорте // Бюллетень результатов научных исследований. — 2023. — Вып. 2. — С. 7–17. DOI: 10.20295/2223-9987-2023-2-7-17

Аннотация

Цель: Мета-анализ последствий изменения климата для управления климатическими рисками на железнодорожном транспорте. **Методы:** Анализ последствий изменения климата, на основе массива статистических данных за период с 1990 по 2019 год выявлены тепловые риски для объектов железнодорожной инфраструктуры. **Результаты:** Степень нагрева объектов железнодорожной инфраструктуры может значительно различаться в зависимости от конкретного местоположения и типа объекта. Выявлены причины отказов, связанных с тепловыми рисками на железнодорожной сети: большинство происшествий, связанных с высокими температурами, происходят в период с начала до середины лета; существует значительная уязвимость оборудования к высоким температурам; широкий спектр оборудования выходит из строя вследствие нагрева при температурах окружающей среды, находящихся в пределах рабочего диапазона, а также в пределах климатических норм данного региона. **Практическая значимость:** Сформулированы пути повышения устойчивости транспортной инфраструктуры и адаптации к изменению климата. Показано, что изменение климата повышает вероятность природных чрезвычайных ситуаций и опасных природных процессов, которые могут инициировать чрезвычайные ситуации на транспорте. Рост годовых экстремумов температуры воздуха прогнозируется на большей части территории России. При этом ожидается увеличение количества дней с аномально высокими значениями температуры воздуха и уменьшение количества дней с экстремально низкими ночными температурами воздуха. Проведенная оценка показала, что в некоторых случаях факторами климатического риска могут являться не сами опасные природные явления, а создаваемые ими опасные техногенные события.

Ключевые слова: Изменение климата, парниковые газы, отказ оборудования, опасные природные явления, климатический риск, адаптация.

Введение

В настоящее время динамика климатических изменений наблюдается по всему миру, при этом особенностью данного процесса является то, что оно фиксируется как на общемировом, так и на локальном уровне. Драйвером ускорения глобального изменения климата является использование ископаемого топлива в качестве энергоресурса. Это приводит к антропогенно обусловленному росту содержания парниковых газов в атмосфере. При этом следует отметить, что топливно-энергетический комплекс выступает одним из основных секторов экономики России. Реализация концепции устойчивого развития с поэтапным сокращением выбросов парниковых газов может основываться как на принятии дифференцированного подхода к использованию энергоресурсов, так и на внесении корректив в экономическую политику страны.

В ряде исследований [1–3] отмечается, что изменения климата имеют существенные различия в зависимости от региона проявления и существенную значимость на местном уровне, особенно в Арктике. Учет подобных пространственных особенностей позволит более точно прогнозировать последствия глобального изменения климата и реализовывать научно обоснованный подход к разработке мер по смягчению воздействия изменения климата на конкретную территорию или отрасль.

Материалы и методы

Такие опасности, как ураганы, наводнения, аномальная жара, засухи и лесные пожары, в последние годы увеличились по количеству, интенсивности и изменчивости [4]. В связи с тем, что и частота, и интенсивность чрезвычайных ситуаций природного характера растут по всему миру, все больше стран сталкиваются со значительными социально-экономическими последствиями опасных природных явлений и, как следствие, с ростом чрезвычайных ситуаций техногенного характера, в том числе и на транспорте.

Оценочный доклад Межправительственной группы экспертов по изменению климата при ООН [5] прогнозирует существенный рост опасности возникновения пожаров в ряде регионов Евразии (в первую очередь на юге) к 2050 году. Вместе с тем пик опасности возникновения пожаров все больше смещается к середине лета — на фоне увеличения продолжительности пожароопасного периода. Это обуславливается как ростом температуры, так и изменением режима увлажнения почвы.

Кроме того, к климатическим рискам, связанным с ростом частоты и интенсивности чрезвычайных ситуаций природного характера, относятся как аномально высокие и низкие температуры воздуха и почвы, так и экстремальные суточные и годовые амплитуды температуры, что приводит к увеличению вероятности и продолжительности засух. На рис. 1 приведено изменение количества засух в мире с 1900 по 2019 год.

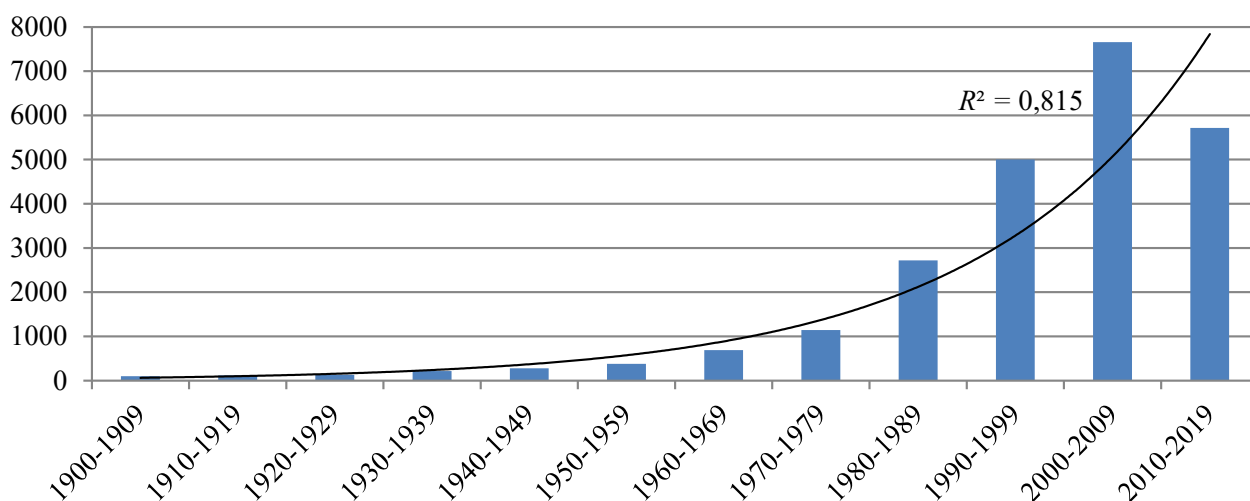
Количество

Рис. 1. Изменение количества засух в мире с 1900 по 2019 год

Как видно из рис. 1, рост количества засух в мире с 1900 по 2019 год описывается экспоненциальной функцией с коэффициентом корреляции 0,96. При этом с 2020 по 2022 год произошло 1479 засух, что составляет 26 % от количества засух, произошедших в предыдущем десятилетии (2010–2019 гг.).

Вместе с тем рост средней мировой температуры обуславливает увеличение частот возникновения чрезвычайных ситуаций техногенного характера. Например, повышение температуры в летний период и более высокая повторяемость экстремально высоких температур являются причинами нарушения функционирования ряда объектов транспортной инфраструктуры. Следует отметить, что при отсутствии стратегии и планов адаптации к изменению климата перегрев зданий, сооружений и технологического оборудования приведет к повышению вероятности отказов на транспорте. Прогнозируемый рост экстремальных летних температур увеличивает риск системных аварий, связанных с увеличением энергопотребления, снижением генерации энергии и существенным ростом потерь при передаче энергии. На рис. 2 приведено изменение количества волн жара и холода (период аномально жаркой (холодной) и/или необычно влажной погоды) в мире с 1950 по 2019 год.

Как видно из рис. 2, рост количества волн жара в мире с 1950 по 2019 год описывается экспоненциальной функцией с коэффициентом корреляции 0,97, рост количества волн холода в мире с 1950 по 2019 год описывается экспоненциальной функцией с коэффициентом корреляции 0,91. При этом с 2020 по 2022 год произошло 11 волн жара, что составляет 18 % от количества волн жара, произошедших в предыдущем десятилетии (2010–2019 гг.), с 2020 по 2022 год произошло 3 волны холода, что составляет 2 % от количества волн холода, произошедших в предыдущем десятилетии (2010–2019 гг.).

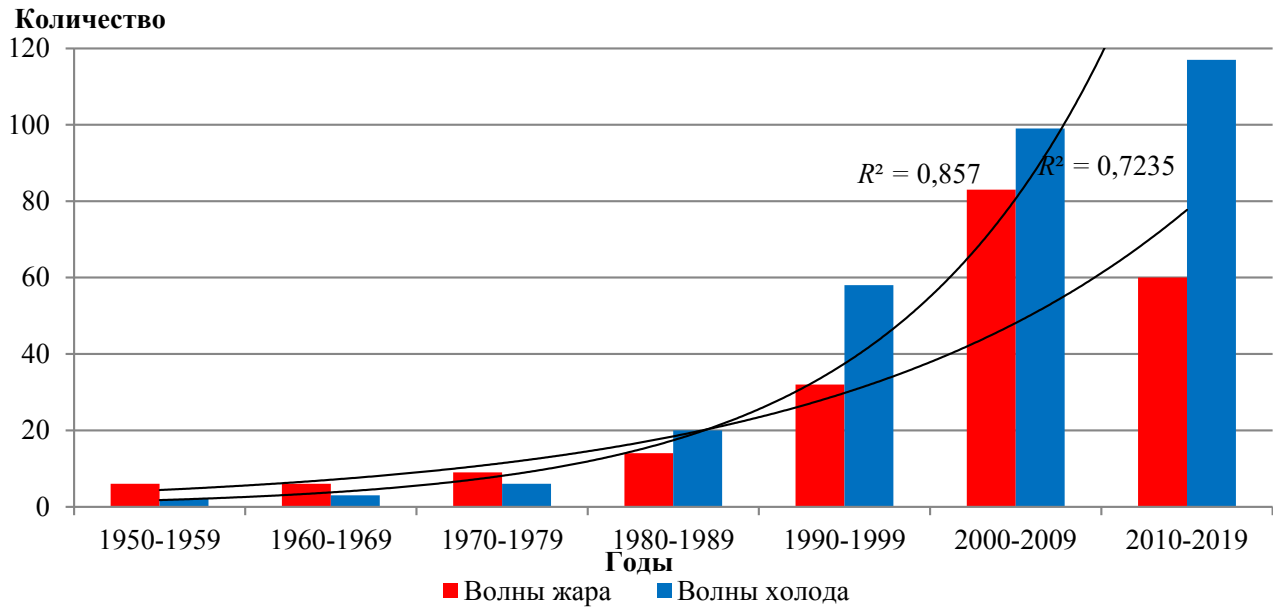


Рис. 2. Изменение количества волн жара и холода в мире с 1950 по 2019 год

Высокие температуры и волны жара могут вызвать многочисленные проблемы для железнодорожной инфраструктуры, такие как коробление пути, провисание воздушных линий и выход из строя электрического оборудования СЦБ. Без учета данных тенденций и разработки мер по адаптации эти проблемы усугубятся в будущем, более теплом климате.

Высокие температуры и волны жара могут вызвать многочисленные проблемы для железнодорожной инфраструктуры. Большинство железнодорожных объектов показывают повышенную частоту отказов даже при умеренно низких температурах, таких как 20 °С, при этом частота аварий значительно возрастает при превышении температуры 26 °С [6]. Эти температуры находятся в пределах климатологических норм температуры, а также в пределах требуемых эксплуатационных характеристик железнодорожной инфраструктуры.

Данные величины температуры влияют на разные типы оборудования по-разному. Например, температура выше 30 °С часто связана с деформацией пути [7]. Высокие температуры и аномальная жара, по прогнозам, станут все более распространенными [5], понимание природы этих связанных с жарой происшествий имеет существенное значение для обеспечения безопасности железнодорожного транспорта.

Под прямыми солнечными лучами в жаркие дни рельсы могут быть на 208 °С теплее, чем температура окружающей среды [8]. Когда сталь нагревается, она расширяется, увеличивая сжимающее напряжение и потенциально вызывая коробление и сход подвижного состава с рельс. Кроме того, если температура очень высока или если путь находится в плохом состоянии, могут возникать искривления пути из-за дополнительной энергии, выделяемой проходящим составом.

Тепловое расширение также может повлиять на воздушные линии. При расширении воздушных линий их натяжение уменьшается, что может привести к чрезмерному провисанию. Частота провисания воздушных линий также выше в городских районах из-за эффекта городского острова тепла, который может привести к тому, что городские районы на несколько градусов теплее, чем их окрестности. Города часто являются важными транспортными узлами, и отказ здесь может быть очень проблематичным, быстро распространяясь на остальную часть сети, вызывая значительные задержки в перевозке пассажиров и грузов. Следовательно, понимание природы связанных с жарой происшествий на таких критических участках пути имеет существенное значение.

Гораздо менее изучено влияние тепла на оборудование СЦБ. В отличие от воздушных линий именно современные виды оборудования СЦБ имеют тенденцию быть более восприимчивыми к сбоям, связанным с нагревом, из-за их повышенной зависимости от электрических и электронных компонентов. Оборудование, находящееся под прямыми солнечными лучами, наиболее уязвимо к перегреву, и, в частности, оборудование внутри контейнеров может испытывать более быстрые изменения температуры и более высокие экстремальные температуры, чем то, которое находится снаружи.

К другим связанным с жарой проблемам, влияющим на железнодорожную сеть, относятся ограниченные возможности для проведения технического обслуживания пути, подверженность персонала тепловым ударам и риск для пассажирских и грузовых перевозок, связанный с отказом оборудования подвижного состава в экстремальных погодных условиях.

Предполагается, что большее количество происшествий, связанных с жарой, произойдет в начале летнего сезона. Как только эти сбои будут устранены, а вышедшее из строя оборудование заменено, инфраструктура на этом участке станет более устойчивой до конца года при сохранении данной температуры. Следовательно, устойчивость железнодорожной сети будет увеличиваться в течение каждого летнего сезона, и теоретически, как только будет достигнута максимальная температура, в конкретном месте больше не должно происходить связанных с жарой отказов.

Данные о температуре окружающей среды с метеорологических станций наблюдения указывают на ежедневные погодные условия, но не на температуру оборудования. Например, в работе [9] отмечается, что температура оборудования была зафиксирована на уровне 38 °C, что на 10 °C выше, чем температура окружающей среды, наблюдаемая на ближайшей метеостанции. Хотя можно приблизительно оценить температуру оборудования по температуре окружающей среды, используя аппроксимацию, отмечается, что большая часть разницы в температурах зависит от затенения растительностью или инфраструктурой.

Поэтому степень нагрева объектов железнодорожной инфраструктуры может значительно различаться в зависимости от конкретного местоположения и типа объекта, а также отличаться от температуры, зарегистрированной на ближайшей метеостанции. Это особенно характерно для инфраструктуры и оборудования, которое может быть расположено в городских или сельских районах и подвержено влиянию такого внешнего фактора, как затенение.

Результаты

Анализ литературных источников [6, 8–10] позволяет сформулировать следующие причины отказов, связанных с последствиями климатических изменений для объектов транспортной инфраструктуры:

1. Большинство происшествий, связанных с жарой, происходит в период с начала до середины лета, а затем снижается, несмотря на то, что температура остается высокой. Это согласуется с гипотезой исправления всех полученных отказов оборудования в наиболее жаркий период и предполагает, что система транспортной инфраструктуры становится все более устойчивой в течение лета, поскольку неисправное оборудование ремонтируется или заменяется. Затенение от искусственных сооружений или деревьев, степень которого может меняться в зависимости от времени суток и времени года, является основной причиной пространственных колебаний температуры пути.

2. Существует значительная уязвимость оборудования СЦБ к теплу. Кроме того, повышается вероятность коробления пути, затрат на ликвидацию аварии, связанных с жарой, и увеличения числа и продолжительности задержек.

3. Широкий спектр оборудования выходит из строя вследствие нагрева, при температурах окружающей среды, находящихся в пределах рабочего диапазона, а также в пределах климатических норм данного региона. Причинами отказов может быть использование устаревшего оборудования, а также то, что процедуры технического обслуживания не всегда могут выполняться при значительных величинах температуры окружающего воздуха.

Обсуждение результатов

По сравнению с оборудованием СЦБ, путевые средства, как правило, выходят из строя при более высоких температурах. Устойчивость системы железнодорожной инфраструктуры повышается в течение летнего сезона. Соответственно, существует потенциальная возможность увеличения этих температурных порогов в зависимости от региона в течение летнего сезона по мере того, как региональная инфраструктура становится устойчивой к более высоким температурам. Такое динамическое управление рисками перегрева уменьшит связанные с жарой перебои в работе.

Существующий подход к обеспечению отказоустойчивости оборудования требует пересмотра в средне- и долгосрочной перспективе, так как без целенаправленной адаптации или смягчения последствий изменения климата случаи отказов оборудования и коробления пути увеличатся в будущем, более теплом климате.

Одним из способов управления климатическими рисками на железнодорожном транспорте является включение мер по адаптации к изменению климата в процесс управления. При этом данные меры должны включать научно обоснованные сведения об изменениях климата и реализовываться параллельно с существующими процедурами управления. Подготовка объектов транспортной инфраструктуры к изменению климата должна быть основана на современных знаниях о процессе изменения климата, передовой международной практике и академических исследованиях. Данная подготовка может состоять из двух разделов:

- разработка стратегии адаптации к изменению климата;
- разработка плана реализации стратегии адаптации к изменению климата [11].

При разработке данных разделов целесообразно учитывать, что возможна стагнация в процессе реализации стратегии адаптации в случае существенной разницы между целями стратегии и мерами по адаптации с имеющимися возможностями отрасли.

Таким образом, цель стратегии адаптации к изменению климата состоит в том, чтобы путем расстановки акцентов на конкретных мероприятиях для конкретных объектов транспортной инфраструктуры установить количественные параметры, в том числе временные, в которых они должны быть реализованы, с учетом приоритетных климатических рисков.

Управление тепловыми рисками в критических узлах является обязательным, особенно в городских районах, где эффект острова тепла может привести к значительно более высоким температурам, чем в окружающей местности.

Прогнозируется, что в будущем железнодорожная сеть столкнется с беспрецедентными проблемами из-за более частых высоких температур, и без целенаправленной адаптации или смягчения последствий изменения климата затраты и задержки, связанные с тепловыми рисками, будут увеличиваться. Таким образом, повышение климатической устойчивости транспортной сети в настоящее время имеет существенное значение.

Пути повышения устойчивости транспортной инфраструктуры и адаптации к изменению климата состоят в разработке научно обоснованного подхода к адаптации. Вместе с тем разработка комплекса мер по адаптации к изменению климата железнодорожной отрасли сталкивается со следующими сложностями:

- осведомленность об изменении климата и климатических рисках недостаточна, отсутствует сеть мониторинга воздействия климата на транспортную инфраструктуру;

- последствия отдельных природных стихийных явлений вызывают озабоченность, но не ведут к комплексной оценке климатических рисков для инфраструктуры железнодорожного транспорта в долгосрочной перспективе;
- значительная часть инфраструктуры проектируется и строится по нормативным документам, в которых отсутствует оценка последствий изменения климата;
- финансирование направляется на техническое обслуживание существующих объектов, при этом не учитываются затраты на меры по адаптации инфраструктуры к последствиям изменения климата.

Поскольку расчетный срок службы транспортной инфраструктуры часто составляет несколько десятилетий, при установке новых объектов следует учитывать динамику климатических изменений, чтобы избежать снижения надежности инфраструктуры или дорогостоящей модернизации. Существующая инфраструктура будет требовать отдельного комплекса мер по адаптации к климатическим рискам. В этой связи целесообразна разработка стратегии адаптации и плана реализации стратегии адаптации к изменению климата с последующей интеграцией в существующие организационные процедуры.

Заключение

Изменение климата повышает вероятность природных чрезвычайных ситуаций и опасных природных процессов, которые могут инициировать чрезвычайные ситуации на транспорте. Рост годовых экстремумов температуры воздуха прогнозируется на большей части территории России. При этом ожидается увеличение количества дней с аномально высокими значениями температуры воздуха и уменьшение количества дней с экстремально низкими ночными температурами воздуха.

Проведенная оценка показала, что в некоторых случаях факторами климатического риска могут являться не сами опасные природные явления, а создаваемые ими опасные техногенные события (отказ элементов транспортной инфраструктуры). Прогнозируемый рост ущерба связан не только с климатическими факторами, но и со снижением надежности и увеличением уязвимости объектов транспортной инфраструктуры. Очевидно, это связано с высокой степенью износа инфраструктуры, отклонением от строительных норм и правил при строительстве объектов, размещением объектов на территориях, находящихся в зоне повышенного климатического риска. Цель разработки и реализации стратегии адаптации к изменению климата состоит в том, чтобы путем расстановки акцентов на конкретных мероприятиях для конкретных объектов транспортной инфраструктуры установить количественные параметры, в том числе временные, в которых они должны быть реализованы, с учетом приоритетных климатических рисков.

Планы адаптации к изменению климата должны учитывать изменения в частоте или масштабах экстремальных погодных явлений, долгосрочные климатические изменения и будущие социально-экономические изменения в управлении и технологиях.

Список литературы

1. Доклад о климатических рисках на территории Российской Федерации. — Санкт-Петербург. 2017. — 106 с.
2. Titova T. Methodical approaches for durability assessment of engineering structures in cold regions / T. Titova, R. Akhtyamov, E. Nasyrova et al. // *Lecture Notes in Civil Engineering*. — 2020. — Iss. 49. — Pp. 473–478. — DOI: 10.1007/978-981-15-0450-1_49.
3. Nasyrova E. Geoenvironmental assessment of urban water bodies / E. Nasyrova, A. Elizaryev, S. Aksenov et al. // *E3S Web of Conferences*. — 2019. — Iss. 110. — Article № 02045. — DOI: 10.1051/e3sconf/201911002045.
4. БДЧС. Центра исследований эпидемиологии катастроф. — URL: <http://www.emdat.be> (дата обращения: 24.02.2023).
5. IPCC, 2021: Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 3–32. — DOI: 10.1017/9781009157896.001.
6. Ferranti E. Heat-related failures on Southeast England’s railway network: insights and implications for heat risk management / E. Ferranti, L. Chapman, C. Lowe et al. // *Weather Clim.* — 2016. — Soc. 8. — Pp. 177–191.
7. Network Rail, 2014b: Weather and climate change resilience. How our routes are mitigating the impact of weather and climate change to maintain an efficient service. Network Rail. — URL: <http://www.networkrail.co.uk/publications/weather-and-climate-change-resilience/> (дата обращения: 24.02.2023).
8. Chapman L. Modelling of rail surface temperatures: A preliminary study / L. Chapman, Y. Huang, X. Cai et al. // *Theor. Appl. Climatol.* — 2008. — Iss. 92. — Pp. 121–131. — DOI: 10.1007/s00704-007-0313-5.
9. Dobney K. Quantifying the effects of high summer temperatures due to climate change on buckling and rail related delays in south-east United Kingdom / K. Dobney, C. Baker, A. Quinn et al. // *Meteor. Appl.* — 2009. — Iss. 16. — Pp. 245–251. — DOI: 10.1002/met.114.
10. Dobney K. The future cost to the United Kingdom’s railway network of heat-related delays and buckles caused by the predicted increase in high summer temperatures owing to climate change / K. Dobney, L. Chapman, A. Quinn // *Proc. Inst. Mech. Eng. Part F*, 2019. — Vol. 224. — Pp. 25–34. — DOI: 10.1243/09544097JRRT292.
11. Ахтямов Р. Г. Разработка подходов к адаптации транспортной инфраструктуры к климатическим изменениям / Р. Г. Ахтямов // *Инновационные транспортные системы и технологии*. — 2023. — Т. 9. — № 1. — С. 34–43. — DOI: 10.17816/transsyst20239134-43.

Дата поступления: 25.03.2023

Решение о публикации: 19.04.2023

Контактная информация:

АХТЯМОВ Расул Гумерович — канд. техн. наук, доц.; ahtamov_zchs@mail.ru

Analysis of Climate Change Consequences for Climate Risk Management in Railway Transportation

R. G. Akhtyamov

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

For citation: Akhtyamov R. G. Analysis of Climate Change Consequences for Climate Risk Management in Railway Transportation. *Bulletin of scientific research results*, 2023, iss. 2, pp. 7–17. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2023-2-7-17

Summary

Purpose: Meta-analysis of the consequences of climate change for climate risk management in railway transportation. **Methods:** Analysis the consequences of climate change, based on an array of statistical data for the period from 1990 to 2019, thermal risks for railway infrastructure facilities have been identified. **Results:** It has been shown that the degree of heating of railway infrastructure objects can vary significantly depending on the specific location and type of object. The causes of failures associated with thermal risks on the railway network have been identified: most of the incidents associated with the heat occur during the period from the beginning to the middle of summer. There is a significant vulnerability of equipment to heat. A wide range of equipment fails due to heating at ambient temperatures within the operating range, as well as within the climatic norms of the given region. **Practical significance:** Ways to increase the stability of transport infrastructure and adaptation to climate change have been formulated. It is shown that climate change increases the likelihood of natural disasters and dangerous natural processes that can initiate emergency situations in transportation. The growth of annual extremums of air temperature is predicted in most of Russia. In this case, an increase in the number of days with abnormally high values of air temperature and a decrease in the number of days with extremely low night air temperatures is expected. The assessment shows that in some cases, the factors of climatic risk may not be dangerous natural phenomena themselves, but the dangerous technogenic events created by them.

Keywords: Climate change, greenhouse gases, equipment failure, dangerous natural phenomena, climatic risk, adaptation.

References

1. *Doklad o klimaticheskikh riskakh na territorii Rossiyskoy Federatsii* [Report on climate risks in the Russian Federation]. Saint Petersburg, 2017, 106 p. (In Russian)
2. Titova T., Akhtyamov R., Nasyrova E. et al. Methodical approaches for durability assessment of engineering structures in cold regions. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2020, Iss. 49, pp. 473–478. DOI: 10.1007/978-981-15-0450-1_49.
3. Nasyrova E., Elizaryev A., Aksenov S. et al. Geoenvironmental assessment of urban water bodies. *E3S Web of Conferences*. 2019, Iss. 110, article № 02045. DOI: 10.1051/e3sconf/201911002045.
4. *BDChS. Tsentra issledovaniy epidemiologii katastrof* [BDChS. Center for Research on the Epidemiology of Catastrophes]. Available at: <http://www.emdat.be> (accessed: February 24, 2023). (In Russian)

5. IPCC, 2021: Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 3–32. DOI: 10.1017/9781009157896.001.

6. Ferranti E., Chapman L., Lowe C. et al. Heat-related failures on Southeast England's railway network: insights and implications for heat risk management. *Weather Clim, 2016, Soc. 8*, pp. 177–191.

7. Network Rail, 2014b: Weather and climate change resilience. How our routes are mitigating the impact of weather and climate change to maintain an efficient service. Network Rail. Available at: <http://www.networkrail.co.uk/publications/weather-and-climate-change-resilience/> (accessed: February 24, 2023).

8. Chapman L., Huang Y., Cai X. et al. Modelling of rail surface temperatures: A preliminary study. *Theor. Appl. Climatol*, 2008, Iss. 92, pp. 121–131. DOI: 10.1007/s00704-007-0313-5.

9. Dobney K., Baker C., Quinn A. et al. Quantifying the effects of high summer temperatures due to climate change on buckling and rail related delays in south-east United Kingdom. *Meteor. Appl*, 2009, Iss. 16, pp. 245–251. DOI: 10.1002/met.114.

10. Dobney K., Chapman L., Quinn A. The future cost to the United Kingdom's railway network of heat-related delays and buckles caused by the predicted increase in high summer temperatures owing to climate change. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part F*, 2019, vol. 224, pp. 25–34. DOI: 10.1243/09544097JRRT292.

11. Akhtyamov R. G. Razrabotka podkhodov k adaptatsii transportnoy infrastruktury k klimaticheskim izmeneniyam [Development of approaches to adaptation of transport infrastructure to climate change]. *Innovatsionnye transportnye sistemy i tekhnologii* [Innovative transport systems and technologies]. 2023, vol. 9, Iss. 1, pp. 34–43. DOI: 10.17816/transsyst20239134-43. (In Russian)

Received: March 25, 2023

Accepted: April 19, 2023

Author's information:

Rasul G. AKHTYAMOV — PhD in Engineering, Associate Professor; ahtamov_zchs@mail.ru

УДК 551.583.2

Оценка геопространственных особенностей изменения климата на примере стран BRICS

Р. Г. Ахтямов

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

Для цитирования: Ахтямов Р. Г. Оценка геопространственных особенностей изменения климата на примере стран BRICS // Бюллетень результатов научных исследований. — 2023. — Вып. 2. — С. 18–27. DOI: 10.20295/2223-9987-2023-2-18-27

Аннотация

Цель: Мета-анализ данных о динамике опасных природных явлений в развивающихся странах, которые испытывают последствия климатических изменений, происходящих в глобальном масштабе. **Методы:** Оценен вклад стран BRICS в глобальные выбросы парниковых газов на основе массива статистических данных за период с 1990 по 2019 год. Суммарная величина выбросов всех видов парниковых газов в странах BRICS с 1990 по 2019 год составляет 391,91 ГтCO₂, при этом вклад стран BRICS в 2019 году составил 52,2 % общемирового выброса парниковых газов. **Результаты:** Определена динамика таких природных стихийных явлений, как наводнения, волны жара и холода, засухи, оползни, ураганы в странах BRICS с 1990 по 2019 год. Приведено описание наиболее разрушительных чрезвычайных ситуаций природного характера в странах BRICS 2021 года. **Практическая значимость:** Обоснование необходимости ограничения глобального потепления, вызванного деятельностью человека, которое требует ограничения кумулятивных выбросов парниковых газов. Антропогенное удаление CO₂ потенциально может удалить CO₂ из атмосферы и надолго сохранить его в естественных резервуарах. Сложный характер климатической системы предопределяет широкий разброс в прогнозах, но даже минимальные прогнозируемые изменения могут приводить к крупномасштабным чрезвычайным ситуациям природного характера в странах BRICS. Странам BRICS целесообразно предпринимать усилия по смягчению изменения климата и сокращению выбросов парниковых газов до уровня, который позволит остановить негативное антропогенное влияние. Одновременно с этим разработка и внедрение подходов к адаптации к последствиям изменения климата позволит снизить климатические риски для социально-экономического и технологического развития стран BRICS.

Ключевые слова: Изменение климата, поглощение углерода, парниковые газы, устойчивое развитие, опасные природные процессы.

Введение

Изменение климата в общемировом масштабе стало последствием активного использования углеводородов в качестве основного вида энергетических ресурсов в индустриальную эпоху (с 1850 года). Анализ научно обоснованных подходов к оценке изменения климата [1–5] показывает существенный антропогенный вклад в изменение природной среды, что ведет к глобальному потеплению. В качестве последствий изменения климата выделено повышение вероятности природных стихийных явлений, таких как повышение интенсивности гроз, разнонаправленные

изменения в сельском хозяйстве (снижение продуктивности в приэкваториальной зоне, повышение продуктивности в средних широтах), снижение доступа к чистой воде для пищевых, хозяйственных и производственных нужд.

Смягчение воздействия глобального потепления и адаптация к данным изменениям являются значимыми составляющими в условиях изменения климата. Так, под смягчением воздействия изменения климата понимается сокращение источников и количества выбросов парниковых газов в атмосферу. Под адаптацией к глобальному изменению климата понимается комплекс мер по приспособлению как природных, так и антропогенных систем к ожидаемым и/или фактическим климатическим воздействиям и по отношению к их последствиям. Смягчение и адаптация позволят ограничить нежелательные эффекты при одновременном использовании благоприятных возможностей, возникающих в связи с повышением концентрации углекислого газа в атмосфере.

Вызванное деятельностью человека изменение климата уже влияет на многие погодные и климатические экстремальные явления во всех регионах земного шара [6].

Материалы и методы

Метаанализ вклада стран BRICS в глобальные выбросы парниковых газов проведен по материалам статистических данных [6–11] за различные временные интервалы.

Направлениями сокращения выбросов может служить, с одной стороны, понимание особенностей каждой из стран, с другой стороны, анализ вклада подходов к регулированию производства, а также итоговое сокращение выбросов парниковых газов. Кроме того, при выборе стратегии декарбонизации необходимо опираться как на экономически целесообразный, так и на технически достижимый потенциал по сокращению углеродоемкости. На рис. 1 приведены общие выбросы всех видов парниковых газов в странах BRICS с 1990 по 2019 год, ГтCO₂.

Анализ рис. 1 показывает, что суммарная величина выбросов всех видов парниковых газов в странах BRICS с 1990 по 2019 год составляет 391,91 ГтCO₂. За 2019 год выбросы парниковых газов в странах BRICS составили 19,36 ГтCO₂. Во всем мире за 2019 год в атмосферу поступило 37,08 ГтCO₂. Таким образом, вклад стран BRICS составляет 52,2 % общемирового выброса парниковых газов.

Результаты

Влияние человека способствовало характеру наблюдаемых изменений осадков с середины XX века. Следы штормов в средних широтах сместились к полюсу в обоих полушариях с 1980-х годов с заметной сезонностью тенденций. Верхние

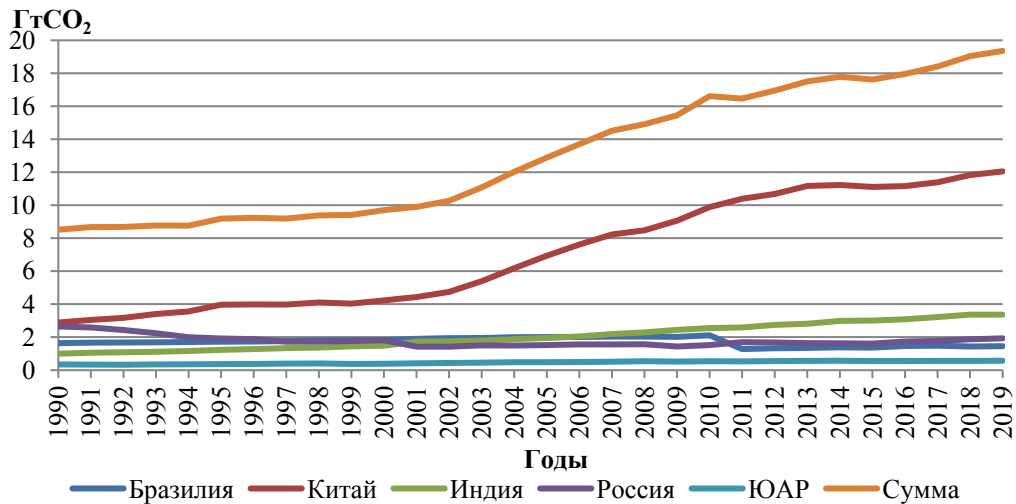


Рис. 1. Общие выбросы всех видов парниковых газов в странах BRICS с 1990 по 2019 год, ГтСО₂

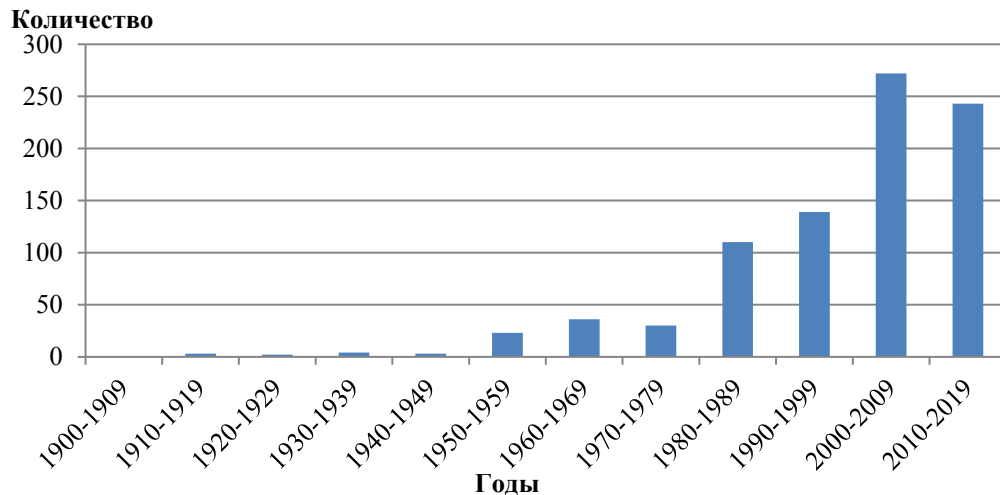


Рис. 2. Изменение количества наводнений в странах BRICS с 1990 по 2019 год

слои океана (0–700 м) потеплели с 1970-х годов. Выбросы парниковых газов являются основной причиной повышения кислотности и снижения концентрации растворенного кислорода в верхних слоях океана. Результаты анализа базы данных о чрезвычайных ситуациях (EM-DAT) показывают динамику опасных природных процессов [7].

Так, наводнение в провинции Хэнань (Китай, 2021) повлекло за собой ущерб 17,6 млрд долларов. В июле 2021 года проливные дожди в китайской провинции Хэнань вызвали сильные наводнения и гибель 302 человек. Более 1 миллиона человек были эвакуированы. По мере того как планета нагревается, большая часть осадков в Китае будет выпадать в виде ливней. Китай является вторым источником

Возникновение и последствия наводнений в странах BRICS в 2022 году

Страна	Период	Количество погибших
Индия	май — август	1354
ЮАР	апрель	501
Бразилия	февраль	272
Бразилия	май	116

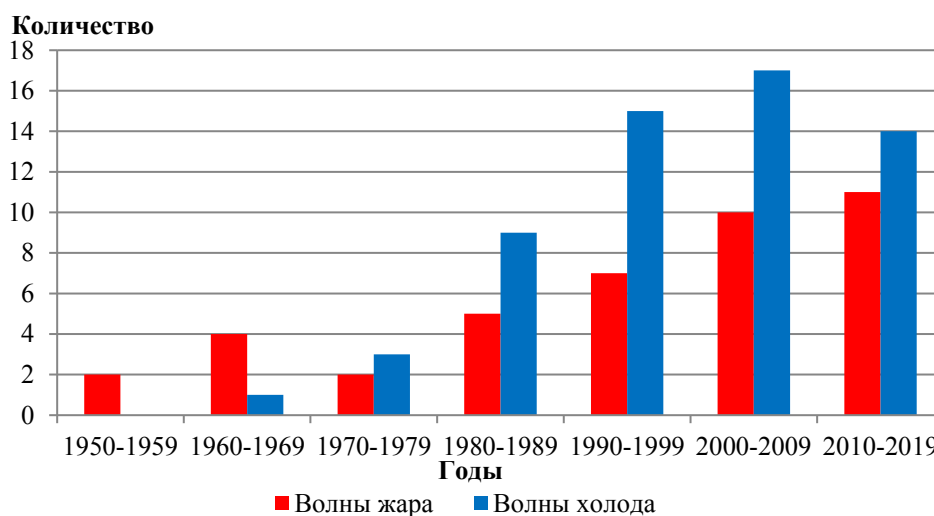


Рис. 3. Изменение количества волн жара и холода в странах BRICS с 1950 по 2019 год

парниковых газов в мире, однако исторический вклад Китая в изменение климата меньше, чем во многих индустриально развитых странах [8]. В таблице приведены данные о периодах и последствиях наводнений в странах BRICS в 2022 году [10].

Изменения в наземной биосфере сопровождаются смещением климатических зон к полюсам и удлинением периода вегетации. Повышаются вероятность и интенсивность экстремально высоких температур (волн жара) в большинстве регионов [6]. Некоторые недавние экстремально высокие температуры, наблюдавшиеся в последнее десятилетие, были бы крайне маловероятными без влияния человека на климатическую систему (рис. 3).

Глобальная приземная температура будет продолжать расти, и ожидается, что потепление до 2 °C будет достигнуто до 2100 года, если резкое сокращение выбросов парниковых газов не произойдет в ближайшие десятилетия. Прирост температуры поверхности суши будет идти быстрее, чем нагрев поверхности океана, при этом в Арктике будет отмечаться рост температуры до двух раз больше, чем в среднем по планете [6]. Каждое приращение температуры на 0,5 °C существенно повышает частоту и интенсивность засух (рис. 4).

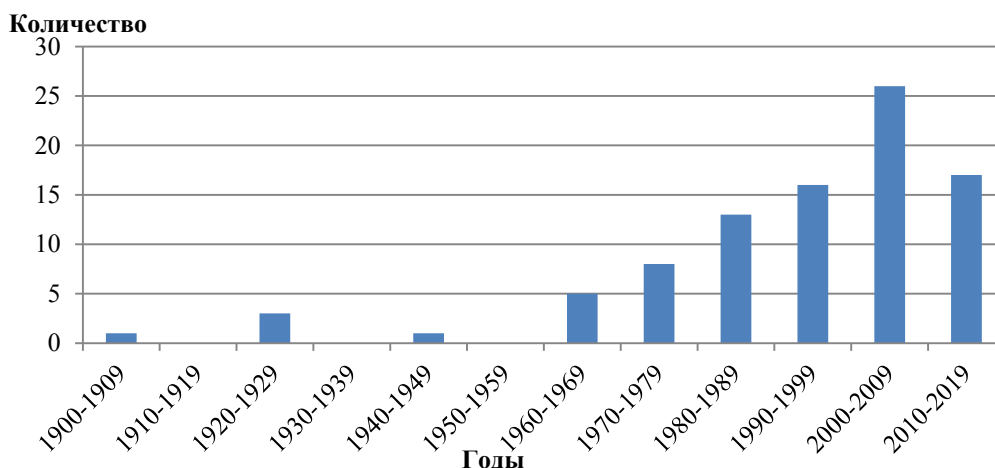


Рис. 4. Изменение количества засух в странах BRICS с 1990 по 2019 год

Так, например, река Парана в настоящее время находится на самом низком уровне водности за последние 77 лет. Река протяженностью более 4880 км пересекает Бразилию, Аргентину и Парагвай и играет важнейшую роль в регионе как источник гидроэнергии и торговый путь. Низкие уровни воды связаны с уменьшением количества осадков [8]. В ЮАР в период с 2002 по 2021 год от засух пострадали 30 450 000 человек [11].

Наводнения и засухи — две крайности гидрологического цикла. Несмотря на разные физические процессы, с учетом пространственных и временных масштабов, их взаимодействие может усилить результирующие вредные каскадные эффекты. По сравнению с предыдущим двадцатилетием (1982–2001), EM-DAT [7] указывает на увеличение временного тренда возникновения наводнений и засух в Африке, с более значительным увеличением паводков (+180 %), чем засух (+30 %).

По прогнозам, в Арктике будет наблюдаться самый высокий рост температуры в самые холодные дни, примерно в три раза превышающий скорость глобального потепления, что сказывается на развитии такого опасного природного процесса, как возникновение оползней (рис. 5).

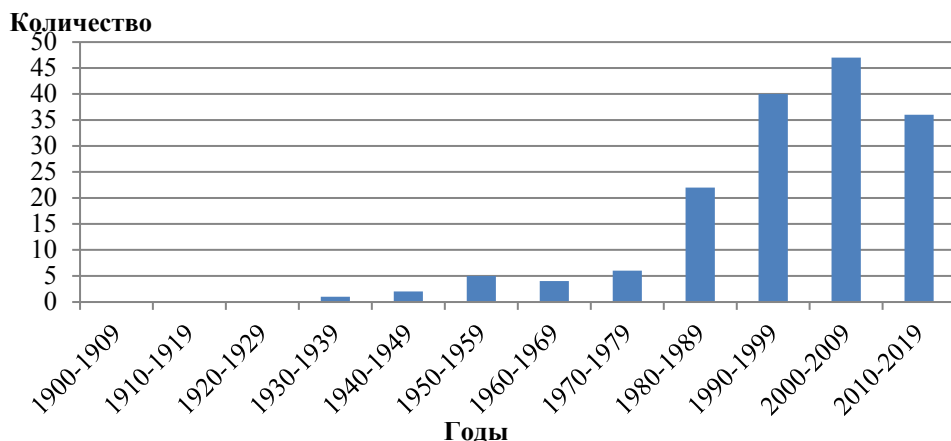


Рис. 5. Изменение количества оползней в странах BRICS с 1990 по 2019 год

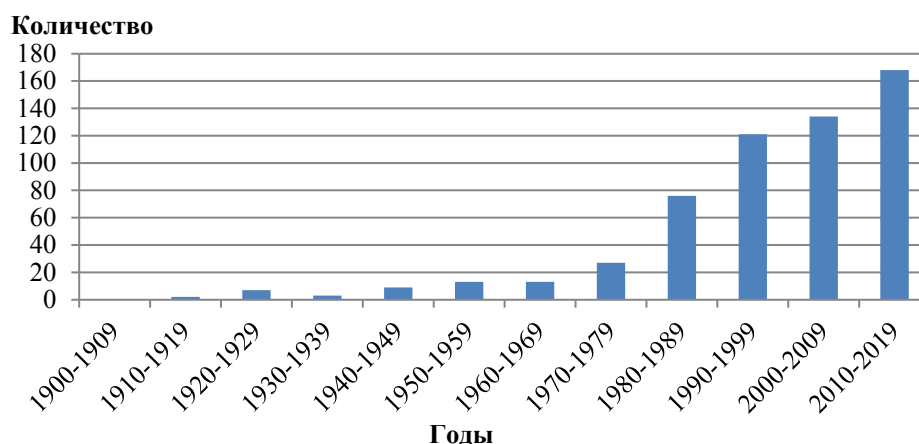


Рис. 6. Изменение количества ураганов в странах BRICS с 1990 по 2019 год

Дополнительное потепление еще больше усилит таяние вечной мерзлоты и потерю сезонного снежного покрова, наземного льда и арктического морского льда. По прогнозам, муссонные осадки увеличатся в среднесрочной и долгосрочной перспективе в глобальном масштабе, особенно в Южной и Юго-Восточной Азии, Восточной Азии и Западной Африке. Прогнозируется, что сезон муссонов начнется с задержкой над Северной и Южной Америкой и Западной Африкой [6].

Прогнозируемый сдвиг к югу и усиление траекторий летних штормов в средних широтах Южного полушария и связанных с ними осадков вероятны в долгосрочной перспективе, но в краткосрочной перспективе влияние восстановления стратосферного озона противодействует этим изменениям.

Специфические для региона изменения включают усиление тропических циклонов или внетропических штормов, увеличение речных паводков, в том числе и ураганов (рис. 6).

Так, циклоны Тауктае и Яас (Индия, 2021) привели к ущербу 4,5 млрд долларов, а наводнение в провинции Хэнань (Китай, 2021) привело к ущербу в 17,6 млрд долларов. Ущерб от тайфуна Ин-фа (Китай, 2021) составил 2 млрд долларов.

В мае 2021 года в Аравийском море сформировался тропический циклон Тауктае и двинулся к западному побережью Индии, затронув также Мальдивы и Шри-Ланку. Не менее 198 человек погибли. Было эвакуировано более 200 000 человек. Циклон Тауктае подвергся процессу, называемому быстрой активизацией, такие тропические циклоны набирают скорость и силу ветра в относительно короткие периоды времени, что затрудняет подготовку к выходу на сушу и становится все более частым из-за изменения климата. В настоящее время Индия является третьим по величине источником выбросов парниковых газов в мире. Однако исторический вклад Индии в выбросы углерода относительно небольшой, особенно учитывая размер страны и ее большое население.

В мае 2021 года в Бенгальском заливе сформировался тропический циклон Яас и двинулись в сторону Бангладеш и Индии. Погибло 19 человек, скорость ветра достигала 140 км/ч, и более 1,2 миллиона человек были эвакуированы. Благодаря своему географическому положению и социально-экономическим условиям, страны Бенгальского залива являются одним из самых уязвимых регионов мира к изменению климата.

В июле 2021 года тропический циклон Ин-фа затронул несколько стран Азии, в том числе Китай. Скорость ветра достигала 176 км/ч, были эвакуированы десятки тысяч человек, 6 человек пострадали [8].

Обсуждение результатов

Обусловленное изменением климата повышение относительного уровня моря будет продолжаться на протяжении XXI века, за исключением регионов с ярко выраженными темпами геологического поднятия суши. Приблизительно на двух третях глобальной береговой линии прогнозируется региональное повышение относительного уровня моря в пределах $\pm 20\%$ глобального среднего повышения. Прогнозируется, что из-за относительного повышения уровня моря экстремальные явления уровня моря, которые происходили один раз в столетие, будут происходить, по крайней мере, ежегодно. Повышение относительного уровня моря способствует увеличению вероятности и интенсивности наводнений в прибрежных и низменных районах, а также эрозии берегов.

Существование «островов тепла», приуроченных к городам, усиливает потепление на локальном уровне, а рост урбанизации и повышение вероятности экстремально жарких периодов обусловят нарастание пиковых значений волн жара. Урбанизация также повышает вероятность сильных осадков над городами и, как следствие, рост количественной составляющей поверхностного стока урбанизированных территорий. В прибрежных городах увеличение частоты наводнений будет обусловлено как повышением уровня моря и штормовыми нагонами, так и экстремальными величинами дождевого и речного стока.

Антропогенное удаление CO_2 потенциально может удалить CO_2 из атмосферы и надолго сохранить его в естественных резервуарах. Антропогенное удаление направлено на компенсацию остаточных выбросов для достижения нулевых чистых выбросов CO_2 . Достижение глобальных нулевых выбросов CO_2 , при котором антропогенные выбросы CO_2 уравниваются антропогенным удалением CO_2 , является требованием для стабилизации глобального повышения приземной температуры, вызванного CO_2 .

Заключение

Сложный характер климатической системы предопределяет широкий разброс в прогнозах, но даже минимальные прогнозируемые изменения могут приводить к затоплению прибрежных районов, перебоям в снабжении продовольствием и водой, исчезновению биологических видов и повышению вероятности опасных природных процессов и явлений. Со своей стороны странам BRICS целесообразно предпринимать усилия по смягчению изменения климата и сокращению выбросов парниковых газов до уровня, который позволит остановить негативное антропогенное влияние. Одновременно с этим разработка и внедрение подходов к адаптации к последствиям изменения климата позволят снизить климатические риски для социально-экономического и технологического развития странам BRICS.

Список литературы

1. CO₂ and Greenhouse Gas Emissions Country Profiles. — URL: <https://ourworldindata.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions#co2-and-greenhouse-gas-emissions-country-profiles> (дата обращения: 24.02.2023).
2. Titova T. Methodical approaches for durability assessment of engineering structures in cold regions / T. Titova, R. Akhtyamov, E. Nasyrova et al. // *Lecture Notes in Civil Engineering*. — 2020. — Iss. 49. — Pp. 473–478. — DOI: 10.1007/978-981-15-0450-1_49.
3. Nasyrova E. Geoenvironmental assessment of urban water bodies / E. Nasyrova, A. Elizaryev, S. Aksenov et al. // *E3S Web of Conferences*. — 2019. — Vol. 110. — Article № 02045. — DOI: 10.1051/e3sconf/201911002045.
4. Titova T. Accident at river-crossing underwater oil pipeline / T. Titova, R. Akhtyamov, E. Nasyrova et al. // *MATEC Web of Conferences*. — 2018. — Vol. 239. — Article № 06003. — DOI: 10.1051/matecconf/201823906003.
5. Kolos A. The effect of different additives on the swelling process of heavy clays / A. Kolos, V. Alpysova, G. Osipov et al. // *Lecture Notes in Civil Engineering*. — 2020. — Vol. 50. — Pp. 295–306. — DOI: 10.1007/978-981-15-0454-9_31.
6. IPCC, 2021: Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 3–32. — DOI: 10.1017/9781009157896.001.
7. БДЧС. Центра исследований эпидемиологии катастроф. — URL: <http://www.emdat.be> (дата обращения: 24.02.2023).
8. Counting the cost 2021. A year of climate breakdown. December 2021. Dr Kat Kramer, Joe Ware. — URL: <https://reliefweb.int/report/world/counting-cost-2021-year-climate-breakdown-december-2021> (дата обращения: 24.02.2023).

9. Technological Disasters: Trends & Transport accidents. Cred Crunch. — 2022. — № 65. — URL: <https://www.cred.be/publications> (дата обращения: 24.02.2023).

10. Natural Hazards & Disasters. An overview of the first half of 2022. Cred Crunch. — 2022. — № 68. — URL: <https://www.cred.be/publications> (дата обращения: 24.02.2023).

11. The interplay of drought-flood extreme events in Africa over the last twenty years (2002–2021). Cred Crunch. — 2022. — № 69. — URL: <https://www.cred.be/publications> (дата обращения: 24.02.2023).

Дата поступления: 25.03.2023

Решение о публикации: 19.04.2023

Контактная информация:

АХТЯМОВ Расул Гумерович — канд. техн. наук, доц.; ahtamov_zchs@mail.ru

Assessment of the Geospatial Features of Climate Change, on the Example of BRICS

R. G. Akhtyamov

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

For citation: Akhtyamov R. G. Assessment of the Geospatial Features of Climate Change, on the Example of BRICS. *Bulletin of scientific research results*, 2023, iss. 2, pp. 18–27. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2023-2-18-27

Summary

Purpose: Meta-analysis of data on the dynamics of dangerous natural phenomena in developing countries that experience the consequences of climatic changes occurring on a global scale. **Methods:** The contribution of BRICS to global greenhouse gas emissions based on an array of statistical data for the period from 1990 to 2019 has been evaluated. The total emissions of all types of greenhouse gases in BRICS countries from 1990 to 2019 is 391.91 GtCO₂, while the contribution of the BRICS countries in 2019 amounted to 52.2% of the global emissions of greenhouse gases. **Results:** Dynamics of such natural disasters such as floods, waves of heat and cold, droughts, landslides, hurricanes in BRICS from 1990 to 2019 have been determined. A description of the most destructive emergency situations in the countries of the BRICS 2021 is given. **Practical significance:** Justification of the need to limit global warming caused by human activities, which requires limiting the cumulative emissions of greenhouse gases. Anthropogenic removal of CO₂ can potentially remove CO₂ from the atmosphere and preserve it in natural tanks for a long time. The complex nature of the climatic system determines a wide scatter in forecasts, but even minimal predicted changes can lead to large-scale natural emergency situations. In the BRICS it is advisable to make efforts to mitigate the climate change, stabilize the concentration of greenhouse gases in the atmosphere at a level that will prevent a dangerous anthropogenic effect on the climatic system, reduce greenhouse gas emissions, intensify activities aimed at adaptation to adverse consequences of climate change and promote cooperation in the countries research activities and systematic observations of the climatic system.

Keywords: Climate change, carbon absorption, greenhouse gases, sustainable development, dangerous natural processes.

References

1. CO2 and Greenhouse Gas Emissions Country Profiles. Available at: <https://ourworldindata.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions#co2-and-greenhouse-gas-emissions-country-profiles> (accessed: February 24, 2023).
2. Titova T., Akhtyamov R., Nasyrova E. et al. Methodical approaches for durability assessment of engineering structures in cold regions. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2020, Iss. 49, pp. 473–478. DOI: 10.1007/978-981-15-0450-1_49.
3. Nasyrova E., Elizaryev A., Aksenov S. et al. Geoenvironmental assessment of urban water bodies. *E3S Web of Conferences*. 2019, vol. 110, article № 02045. DOI: 10.1051/e3sconf/201911002045.
4. Titova T., Akhtyamov R., Nasyrova E. et al. Accident at river-crossing underwater oil pipeline. *MATEC Web of Conferences*. 2018, vol. 239, article № 06003. DOI: 10.1051/matecconf/201823906003.
5. Kolos A., Alpysova V., Osipov G. et al. The effect of different additives on the swelling process of heavy clays. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2020, vol. 50, pp. 295–306. DOI: 10.1007/978-981-15-0454-9_31.
6. IPCC, 2021: Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 3–32. DOI: 10.1017/9781009157896.001.
7. *BDChS. Tsentra issledovaniy epidemiologii katastrof* [BDChS. Center for Research on the Epidemiology of Catastrophes]. Available at: <http://www.emdat.be> (accessed: February 24, 2023). (In Russian)
8. Counting the cost 2021. A year of climate breakdown. December 2021. Dr Kat Kramer, Joe Ware. Available at: <https://reliefweb.int/report/world/counting-cost-2021-year-climate-breakdown-december-2021> (accessed: February 24, 2023).
9. Technological Disasters: Trends & Transport accidents. *Cred Crunch*. 2022, № 65. Available at: <https://www.cred.be/publications> (accessed: February 24, 2023).
10. Natural Hazards & Disasters. An overview of the first half of 2022. *Cred Crunch*. 2022, № 68. Available at: <https://www.cred.be/publications> (accessed: February 24, 2023).
11. The interplay of drought-flood extreme events in Africa over the last twenty years (2002–2021). *Cred Crunch*. 2022, № 69. Available at: <https://www.cred.be/publications> (accessed: February 24, 2023).

Received: March 25, 2023

Accepted: April 19, 2023

Author's information:

Rasul G. AKHTYAMOV — PhD in Engineering, Associate Professor; ahtamov_zchs@mail.ru

УДК 159.9.656.13

Межличностные отношения, переживание одиночества и темперамент студентов транспортного вуза

Т. В. Слотина, И. Д. Васильева

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

Для цитирования: Слотина Т. В., Васильева И. Д. Межличностные отношения, переживание одиночества и темперамент студентов транспортного вуза // Бюллетень результатов научных исследований. — 2023. — Вып. 2. — С. 28–40. DOI: 10.20295/2223-9987-2023-2-28-40

Аннотация

Цель: Исследование субъективной оценки межличностных отношений, переживания одиночества и характеристик темперамента у студентов транспортного вуза. Объектом эмпирического исследования выступили: юноши и девушки в возрасте от 17 до 22 лет, 56 человек, из которых 25 девушек и 31 юношей ПГУПС. **Методы.** Аналитико-теоретический, тестирование. Анализ результатов осуществлялся с помощью математико-статистической обработки данных с применением критериев различия (t -критерий Стьюдента), корреляционного анализа (критерий корреляции Пирсона). Методики, используемые в исследовании: субъективная оценка межличностных отношений, С. В. Духновского, опросник переживания одиночества в адаптации Е. А. Манаковой, личностный опросник Г. Айзенка. **Результаты:** Доказано, что показатели всех респондентов находятся на среднем уровне, что характеризует современных студентов как людей с умеренной степенью выраженности напряженности, отчужденности, конфликтности во взаимоотношениях, не ярко переживающих все типы одиночества. Получены различия по половому признаку: результаты девушек значимо выше по шкалам «Нейротизм», «Напряженность», «Переживание одиночества как негативного чувства», что характеризует женскую выборку как более уязвимую с точки зрения стрессоустойчивости. Юношам свойственно при увеличении стремления дистанцироваться от других людей, отсутствие доверия, переживать большинство из типов одиночества. При этом, для всех исследуемых студентов характерно развитие негативных межличностных проявлений при возрастании чувства одиночества во взаимоотношениях. **Практическая значимость:** Результаты данного исследования могут быть использованы в рамках воспитательной и коррекционно-развивающей работы в вузе, а также как основа программ, направленных на развитие саморегуляции, особенно в группе девушек и коммуникативных тренингов для юношей, что в дальнейшем поможет будущим специалистам сферы транспорта стать успешными профессионалами.

Ключевые слова: Межличностные отношения, одиночество, студенты, темперамент, отчужденность, нейротизм, девушки, юноши.

Введение

В современной России сложилась крайне сложная обстановка, обусловленная периодом пандемии, которая оказала существенное влияние на возникновение дефицита общения у самой уязвимой части населения — подростков и юношей. Последние классы в школе и первые курсы в высших и средних учебных заведениях им пришлось обучаться дистанционно, в изоляции от сверстников. В этой

связи появилось большое количество работ, посвященных социально-психологическим аспектам студенчества в этот сложный период неопределенности [1–8].

Сегодня студенческой молодежи, прошедшей эти испытания, приходится жить в период социально-политического мирового кризиса, когда экзистенциальные вопросы встают как никогда остро и затрагивают каждую семью. Эти обстоятельства имеют огромное влияние на формирование межличностных отношений студенческой молодежи: напряженности, чувства отчужденности, переживания ими одиночества. При этом одним из важных аспектов перехода во взрослую возрастную группу является установление взрослых социальных взаимоотношений [9]. Юношеское одиночество начинает носить массовый характер. Это обусловлено тем, что в данный период актуализируется потребность в сотрудничестве с людьми, активно происходит поиск спутника жизни, появляется чувство интимности и укрепляются связи со своей социальной группой. И. Н. Ишмухаметов указывает, что переживание одиночества наиболее ярко проявляется в юношеском возрасте вследствие неустойчивого социального положения, индивидуализации деятельности и формализации социальных ролей, тогда как потребность в близких отношениях остается неудовлетворенной [10]. Изучением переживания одиночества занимались многие ученые, например Е. Н. Осин, Д. А. Леонтьев, Т. Л. Крюкова, Е. В. Рыжак, А. О. Харланова [11–14] и многие другие. Л. А. Пьянкова пишет, что одиночество можно рассматривать как социально-психологическое явление, связанное с личностными особенностями. Одиночество дуально: оно выступает и в виде преграды, и в виде стимула развития. Как психическое образование данный феномен проявляется в стремлении индивида осознать свои возможности и своеобразие, иметь свою личную позицию [15]. В исследовании А. А. Любякина обнаружено, что причиной одиночества студентов являются сложности в общении, проблемы с самооценкой, неуверенность в себе, отсутствие близких друзей [16]. Кроме того, в современных исследованиях доказаны половые особенности проявления одиночества, в частности выделены типично мужские реакции на одиночество: игра в компьютерные игры, прогулка по городу на машине/велосипеде и типично женские реакции: чтение, заполнение времени учебой или работой, поход в магазин за покупками, телефонный звонок другу [17].

В этой связи очевидно, что вопрос одиночества в студенческой среде является связанным в целом с межличностными отношениями и может рассматриваться как один из аспектов дезадаптации в вузе.

Кроме объективных факторов трудностей межличностных отношений современных юношей, перечисленных выше, существуют субъективные факторы, связанные с индивидуально-личностными особенностями каждого человека. В современной отечественной психологии в рамках деятельностного подхода продолжают проводиться исследования, посвященные формированию и проявлению различных индивидуально-личностных свойств в конкретной деятельности

человека и тому, как они оказывают влияние на эффективность этой деятельности. Студенты транспортного вуза — это те специалисты, которые в дальнейшем будут связаны в той или иной степени с транспортными средствами, в этой связи их деятельность определенным образом соотносится со стрессовыми факторами и ответственностью за жизни людей. Данный факт подчеркивает актуальность выбора данной темы.

Центральное место в сфере индивидуально-личностных характеристик человека занимают свойства темперамента [18–20]. Ведь именно стержневые характеристики темперамента — интровертированность и экстравертированность — являются биологической основой взаимоотношений. Темперамент принадлежит к биологически обусловленным структурам личности. Благодаря знанию особенностей темперамента мы усматриваем многие психические отличия между людьми, связанные с устойчивостью и силой эмоциональной сферы, с характеристиками подвижности, ригидности и направленности свойств индивида и личности.

В предложенной Г. Айзенком модели, состоящей из трех факторов, два из них включают в себя некоторые характеристики эмоциональности и общения. Так, при факторе «нейротизма» эмоциональная стабильность характеризуется склонностью к злости и раздражению на одном полюсе и эмоциональной стабильностью на другом. Интроверсия-экстраверсия наряду с другими чертами содержит и некоторые динамические параметры межличностного общения [21].

Традиционно темперамент рассматривается как совокупность прежде всего наследственных, биологических свойств, а межличностные отношения, складывающиеся в процессе общения, как имеющие максимально социальное происхождение [22]. С теоретической точки зрения изучение связи этих категорий психологической науки друг на друга позволит по-новому взглянуть на соотношение биологического и социального в личности.

В результате можно заключить, что анализ вопроса связи межличностных отношений, переживания одиночества и свойств темперамента у студентов, будущая специальность которых будет связана с транспортной сферой, приобретает существенное значение, поскольку эта деятельность требует стрессоустойчивости, ответственности и высокого уровня профессионализма, от которых зависит жизнь людей.

Материалы и методы

Цель: исследование субъективной оценки межличностных отношений, переживания одиночества и характеристик темперамента у студентов. Объектом выступили: юноши и девушки в возрасте от 17 до 22 лет, всего 56 человек, из которых 25 девушек и 31 юношей, обучающихся в ПГУПС. Предмет: субъективная оценка межличностных отношений, переживание одиночества и характеристики

темперамента у юношей и девушек — студентов транспортного вуза. Сформулированы две гипотезы. Во-первых, юноши и девушки различаются по проявлению межличностных отношений и по-разному переживают одиночество. Во-вторых, структура и содержание связей характеристик темперамента, компонентов переживания одиночества и межличностных отношений у юношей и девушек имеют свои особенности. Методики, используемые в исследовании: субъективная оценка межличностных отношений, автор — С. В. Духновский [23], опросник переживания одиночества в адаптации Е. А. Манаковой [24], личностный опросник Г. Айзенка [25]. Результаты для интерпретации были получены с помощью математико-статистической обработки данных с применением критериев различия (t -критерий Стьюдента), корреляционного анализа (критерий корреляции Пирсона).

Результаты исследования

Первым этапом при описании результатов исследования было изучение описательной статистики. Выявлены средние показатели по методике С. В. Духновского, а также по опроснику «Переживания одиночества» Е. А. Манаковой. Это позволяет говорить о том, что для студентов всей выборки не характерно остро испытывать отчужденность, конфликтность, напряженность в отношениях, а также болезненное переживание одиночества.

Сравнительный анализ по половому признаку продемонстрировал следующие различия. По показателю «Нейротизм» у юношей результаты значимо ниже, чем у девушек ($t = 4,57$, при $p \leq 0,01$), таким образом, девушки более склонны к характеристикам и поведению, свойственным невротическим людям, чем юноши. По шкале «Напряженность» у девушек также показатель выше, чем у юношей ($t = 2,06$, при $p \leq 0,05$), т. е. девушки чувствуют больше напряженности в межличностных отношениях, чем представители мужской группы. С точки зрения исследования показателей одиночества, у девушек также были обнаружены более высокие показатели по шкале «Переживание одиночества как негативного чувства» ($t = 2,24$ при $p \leq 0,05$). В результате мы можем говорить о том, что девушки чаще переживают одиночество именно как негативное чувство, чем юноши. Вероятно, это связано с тем, что для женского пола более характерными являются эмоциональность, чувствительность в межличностных отношениях и в целом они больше склонны к долгим и глубоким эмоциональным переживаниям, чем большинство молодых людей мужского пола. Возможно, это является одной из причин того, что сфера транспорта, как правило, включает в себя мужской контингент.

Далее мы проанализировали полученные связи между шкалами методик отдельно в группе девушек и группе юношей. В группе юношей были обнаружены пять слабых положительных связей. Показатель «Отчужденность» связан со шкалами «Отрицание переживания одиночества» ($r = 0,36$ при $p \leq 0,05$) и

«Одиночество как результат страха брать ответственность за других» ($r = 0,362$ при $p \leq 0,05$), «Одиночество вследствие внешней непривлекательности» и «Духовное одиночество как отсутствие поддержки понимания» ($r = 0,376$ при $p \leq 0,05$). Шкала «Напряженность» связана прямой связью со шкалой «Духовное одиночество как отсутствие поддержки, понимания» ($r = 0,451$ при $p \leq 0,05$).

Любопытной выглядит первая связь, которая демонстрирует, что чем более выражено стремление дистанцироваться от других людей, чем меньше доверия, понимания, близости в межличностных отношениях, тем сильнее происходит отрицание своего переживания одиночества у юношей. Можно предположить, что речь идет о психологической защите по типу отрицания: «Я не одинок, просто хочу побыть один, мне никто не нужен». Данный факт отчетливо показывает, что молодым людям очень важно чувствовать свою причастность к другим людям, быть нужным и т. д.

Тревожным также выглядит тип одиночества как следствие внешней непривлекательности. По данным Е. А. Манаковой, данное чувство является очень тяжелым переживанием, особенно в юношеском возрасте [11]. Таким людям необходима психологическая поддержка с целью повышения самооценки развития коммуникативной сферы.

В целом центральным показателем, получившим наибольшее количество связей, является отчужденность. Это говорит о том, что его изменение является наиболее значимым с точки зрения переживания одиночества у юношей. Другими словами, чем выше значение по показателю «Отчужденность», тем сильнее респонденты мужского пола испытывают одиночество как результат страха брать ответственность за других, одиночество как следствие внешней непривлекательности и духовное одиночество как отсутствие поддержки и понимания. Следовательно, для юношей очень важны близкие, чувственные, доверительные отношения с другими людьми, им необходимо чувствовать, что их понимают или стараются понять. Именно в таких отношениях нет чувства одиночества и изолированности от других людей. Интересно, что С. В. Духновский описывает снижение отчужденности как демонстрацию зависимости, конформности с целью избегания одиночества и «ненужности», а также стремления подчеркнуть свою причастность к интересам большинства [2]. Логичным в этой связи выглядит следующий вывод: чем сильнее молодые люди испытывают духовное одиночество как отсутствие поддержки и понимания, тем выше становится их напряженность в межличностных отношениях, которая проявляется в излишней сосредоточенности, поглощенности мыслями об отношениях, что доставляет беспокойство и дискомфорт. Важно отметить, что данные переживания могут быть одной из субъективных причин повышенной стрессоустойчивости в будущем на рабочем месте в сфере транспорта, что является основанием для необходимости проведения психопрофилактических мероприятий.

Далее были проанализированы результаты корреляционного анализа в женской группе выборки. Выявлено, что параметр «Экстраверсия» связан с «Отчужденностью» ($r = -0,468$ при $p \leq 0,05$), слабой отрицательной связью и агрессией ($r = 0,524$ при $p \leq 0,05$). Такие связи свидетельствуют о том, что для девушек-экстравертов более характерно проявление агрессии, при этом чем выше экстраверсия, тем ниже отчужденность.

Также были обнаружены связи шкалы «Нейротизм» с результатами по шкале «Переживание одиночества как негативного чувства» ($r = 0,429$ при $p \leq 0,05$) и со шкалой «Духовное одиночество как отсутствие поддержки, понимания» ($r = 0,454$ при $p \leq 0,05$), которая, в свою очередь, связана с отчужденностью ($r = 0,441$ при $p \leq 0,05$) и напряженностью ($r = 0,498$ при $p \leq 0,05$). Наличие вышперечисленных связей показывает, что чем выше у девушек уровень нейротизма, который предполагает высокую эмоциональность, импульсивность, неуверенность в себе, тем выше у них переживание одиночества как негативного чувства и духовного одиночества. В это же время духовное одиночество вызывает у девушек отчужденность и напряженность. Е. А. Манакова пишет, что духовное одиночество переживают люди, которые знают или могут то, что непонятно и недоступно большинству. Эти обстоятельства вызывают непонимание, неприятие или пренебрежение со стороны окружающих, несовместимость в системе ценностей [11], а это вызывает напряжение и отчужденность. Можно предположить, что профилактикой развития межличностного одиночества будет развитие саморегуляции девушек студенческого возраста, а также развитие коммуникативной сферы, что позволит повысить их стрессоустойчивость и снизить степень отчужденности во взаимоотношениях с людьми.

Также в женской группе выборки выявлены связи между шкалой «Переживание одиночества как временного вынужденного явления» и шкалами «Конфликтность» ($r = -0,523$ при $p \leq 0,01$), «Агрессия» ($r = -0,637$ при $p \leq 0,01$). Другими словами, повышение переживания одиночества как временного вынужденного явления влечет за собой ориентацию на свои интересы, стремление навязать свои взгляды и даже открытую борьбу за реализацию своих интересов, а также стремление обрести контроль, власть над другими людьми. Можно предположить, что речь идет о некой компенсации одиночества через негативные проявления относительно других людей в сфере межличностных отношений.

В целом женская группа выборки характеризуется большим количеством связей между шкалами методик, что может свидетельствовать об определенной стереотипности их поведения в рамках изучаемой темы.

Заключение и обобщение

Эмпирическое исследование показало, что, с одной стороны, для студентов всей выборки не характерно остро испытывать отчужденность, конфликтность,

напряженность в отношениях, а также болезненное, переживание одиночества. Данные результаты можно рассматривать как позитивные с точки зрения комфортности переживания межличностных отношений в целом для студентов транспортного вуза. С другой стороны, сравнительный аспект по половому признаку позволил увидеть сложившуюся ситуацию более детально. Девушкам свойственны характеристики и поведение, которые могут быть отнесены к невротическим личностям. Девушки чувствуют больше напряженности в межличностных отношениях, чаще переживают одиночество как негативное чувство, чем юноши. Для девушек-экстравертов более характерно проявление агрессии. Профилактикой межличностного одиночества будет развитие навыков саморегуляции девушек студенческого возраста, а также работа над коммуникативной сферой, что позволит повысить их стрессоустойчивость и снизить степень отчужденности во взаимоотношениях с людьми, в частности и в будущем на рабочем месте.

При этом юношам очень важно чувствовать свою причастность к другим людям, быть нужным и т. д., им необходима психологическая поддержка с целью повышения самооценки развития коммуникативной сферы.

В целом женская группа выборки характеризуется большим количеством связей между шкалами методик, что может свидетельствовать об определенной стереотипности их поведения в рамках изучаемой темы.

Исследование продемонстрировало актуальность проблемы связи межличностных отношений, переживания одиночества и характеристик темперамента студентов в сравнительном аспекте по половому признаку. Перспективным видится дальнейшее изучение вышеназванного вопроса как в контексте сравнения полов, так и в рамках лонгитюдного исследования, а также через увеличение выборки респондентов. В рамках коррекционно-развивающей работы полезными могут стать программы, направленные на развитие саморегуляции, особенно в группе девушек, и коммуникативные тренинговые занятия для юношей, что в дальнейшем поможет будущим специалистам сферы транспорта стать успешными профессионалами.

Библиографический список

1. Ермакова Е. С. Совладающее поведение как фактор личностно-профессионального развития студентов транспортного вуза в условиях социально-психологической и экономической неопределенности и кризисных явлений / Е. С. Ермакова // Развитие человека в условиях социально-психологической и экономической неопределенности и кризисных явлений. — СПб.: АНО «София», Издательский проект «Твой текст», 2022. — С. 73–99.
2. Карагачева М. В. Технология проведения социально-психологических тренингов в дистанционном формате / М. В. Карагачева, Н. Б. Казначеева // Пространство образования и личностного развития: практики исследования и сотрудничества: материалы межрегиональной

научно-практической конференции, Ярославль, 09–10 декабря 2021 года. — Ярославль: Государственное автономное учреждение дополнительного профессионального образования Ярославской области «Институт развития образования», 2022. — С. 93–98.

3. Бендюков М. А. Развитие человека в условиях социально-психологической и экономической неопределенности и кризисных явлений / М. А. Бендюков, Е. С. Ермакова, М. В. Иванов и др. — СПб.: АНО «София», Издательский проект «Твой текст», 2022. — 192 с.

4. Синельникова Е. С. Самоорганизация и удовлетворенность жизнью студентов на самоизоляции / Е. С. Синельникова // Психология саморегуляции в контексте актуальных задач образования: материалы научной конференции, Москва, 27–28 апреля 2021 года. — Москва: Психологический институт Российской академии образования, 2021. — С. 170–175.

5. Церфус Д. Н. Психологическое благополучие и локус контроля студентов транспортного вуза / Д. Н. Церфус, М. В. Карагачева // III Бетанкуровский международный инженерный форум: сборник трудов, Санкт-Петербург, 02–03 декабря 2021 года. — СПб.: Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2021. — С. 183–185.

6. Яценко Е. Ф. Проблема самоактуализации, психологического благополучия и субъективного счастья в период пандемии и социальной изоляции / Е. Ф. Яценко // Проблемы социальной психологии и социальной работы, Санкт-Петербург, 16 апреля 2021 года. — СПб., 2021. — С. 34–35.

7. Яценко Е. Ф. Смыслжизненные ориентации и толерантность к неопределенности в период пандемии у студентов транспортного вуза / Е. Ф. Яценко, Е. С. Синельникова, М. Е. Шумов // Транспорт БРИКС. — 2023. — Т. 1. — Вып. 1. — Ст. 6. — DOI: 10.46684/2023.1.6.

8. Komarova A. V. Features of Coping Strategies of Students of a Technical University with Different Experience of Participation in Group Activities / A. V. Komarova, T. V. Slotina, K. P. Zakharov et al. // Mobility for Smart Cities and Regional Development — Challenges for Higher Education. Proceedings of the 24th International Conference on Interactive Collaborative Learning (ICL2021), Volume 2: Proceedings of the 24th International Conference on Interactive Collaborative, Dresden, Germany, September 22–24, 2021. — Dresden, Germany: Springer Nature Switzerland, 2022. — Pp. 275–282. — DOI: 10.1007/978-3-030-93907-6_29.

9. Шаймарданова А. В. Одиночество студентов в процессе социально-психологической адаптации к новым условиям / А. В. Шаймарданова, Е. Н. Кулакова // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. — 2010. — № 3. — С. 50.

10. Ишмухаметов И. Н. Психометрические характеристики шкалы одиночества UCLA (версия 3): изучение студентов вуза / И. Н. Ишмухаметов // Computer Modelling and New Technologies. — 2006. — Т. 10. — № 3. — С. 89–95.

11. Крюкова Т. Л. Психология совладания с одиночеством / Т. Л. Крюкова // Психологические исследования. — 2016. — Т. 9. — № 49. — С. 1.

12. Осин Е. Н. Дифференциальный опросник переживания одиночества: структура и свойства / Е. Н. Осин, Д. А. Леонтьев // Психология. Журнал Высшей школы экономики. — 2013. — Т. 10. — № 1. — С. 55–81.

13. Рыжакова Е. В. Проблема одиночества современной студенческой молодежи / Е. В. Рыжакова // Нижегородский психологический альманах. — 2018. — № 1. — С. 1–6.

14. Харланова А. О. Исследование одиночества у студентов 1 курса / А. О. Харланова // Теоретико-методологические и практические проблемы развития психологии и педагогики: сборник статей по итогам Международной научно-практической конференции, Казань, 26 сентября 2017 года. — Казань: Общество с ограниченной ответственностью «Агентство международных исследований», 2017. — С. 162–164.
15. Пьянкова Л. А. Проблема одиночества в молодежной студенческой среде / Л. А. Пьянкова // Вестник Томского государственного педагогического университета. — 2012. — № 6(121). — С. 102–107.
16. Любякин А. А. Исследование одиночества у студентов / А. А. Любякин, Л. В. Оконечникова // Педагогическое образование в России. — 2016. — № 2. — С. 149–156.
17. Любякин А. А. Исследование субъективного ощущения одиночества и адаптивности у студентов / А. А. Любякин, О. Г. Бердугина, Н. О. Дубинина // Педагогическое образование в России. — 2018. — № 9. — С. 101–107. — DOI: 10.26170/ro18-09-14.
18. Балкизова Ф. Б. Влияние темперамента на межличностные отношения у студентов / Ф. Б. Балкизова // Проблемы и перспективы развития образования в России. — 2014. — № 27. — С. 8–12.
19. Милованова О. А. Влияние различных типов темперамента на стиль межличностного общения / О. А. Милованова // Вестник Ульяновского государственного технического университета. — 2018. — № 2(82). — С. 21–22.
20. Молоканов А. В. Исследование влияния свойств темперамента на межличностные отношения в группе студентов / А. В. Молоканов // Научно-методический электронный журнал «Концепт». — 2015. — № Т18. — С. 1–5.
21. Духновский С. В. Диагностика межличностных отношений / С. В. Духновский. — СПб.: Речь, 2010. — 141 с.
22. Чернова Г. Р. Психология общения / Г. Р. Чернова, Т. В. Слотина. — СПб.: Питер, 2017. — 240 с.
23. Духновский С. В. Субъективная оценка межличностных отношений: описание методики / С. В. Духновский // Вестник Курганского государственного университета. — 2006. — С. 84–89.
24. Манакова Е. А. Опросник переживания одиночества / Е. А. Манакова // Сибирский психологический журнал. — М., 2018. — С. 149–167.
25. Лихтенштейн В. И. Определение типа темперамента по тесту Г. Айзенка / В. И. Лихтенштейн, В. В. Конашков. — М.: Учебное электронное текстовое издание. — 2012. — С. 1–16.

Дата поступления: 06.05.2023

Решение о публикации: 26.05.2023

Контактная информация:

СЛОТИНА Татьяна Викторовна — канд. психол. наук, доц.;

кафедра «Прикладная психология»; vladislava-97@mail.ru

ВАСИЛЬЕВА Ирина Дмитриевна — студент; wasdirina@gmail.com

Interpersonal Relationships, Loneliness Experience and Temperament of Transport University Students

T. V. Slotina, I. D. Vasilieva

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

For citation: Slotina T. V., Vasilyeva I. D. Interpersonal Relationships, Loneliness Experience and Temperament of Transport University Students. *Bulletin of scientific research results*, 2023, iss. 2, pp. 28–40. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2023-2-28-40

Summary

Purpose: To study the subjective assessment of interpersonal relationships, loneliness experiences and temperament characteristics among students of a transport university. The object of empirical research were: boys and girls aged from 17 to 22 years, 56 people, of which 25 girls and 31 boys of PGUPS. Methods. Analytical-theoretical, testing. The analysis of the results was carried out using mathematical and statistical data processing using the criteria of difference (Student's t-test), correlation analysis (Pearson correlation criterion). **Methods:** Subjective assessment of interpersonal relationships, S. V. Dukhnovsky, questionnaire of loneliness experiences in adaptation by E. A. Manakova, personality questionnaire by G. Aizenka. **Results:** It is proved that the indicators of all respondents are at an average level, which characterizes modern students as people with a moderate degree of intensity of tension, alienation, conflict in relationships, not vividly experiencing all types of loneliness. Gender differences were obtained: the results of the girls were significantly higher on the scales of "Neuroticism", "Tension", "Experiencing loneliness as a negative feeling", which characterizes the female sample as more vulnerable from the point of view of stress resistance. Young men tend to experience most of the types of loneliness with an increase in the desire to distance themselves from other people, lack of trust. At the same time, all the studied students are characterized by the development of negative interpersonal manifestations with increasing feelings of loneliness in relationships. **Practical significance:** The results of this study can be used in the framework of educational and correctional-developmental work at the university, as well as as the basis of programs aimed at the development of self-regulation, especially in a group of girls and communicative trainings for young men, which in the future will help future specialists in the field of transport to become successful professionals.

Keywords: Interpersonal relationships, loneliness, students, temperament, alienation, neuroticism, girls, boys.

References

1. Ermakova E. S. Sovladayushchee povedenie kak faktor lichnostno-professional'nogo razvitiya studentov transportnogo vuza v usloviyakh sotsial'no-psikhologicheskoy i ekonomicheskoy neopredelennosti i krizisnykh yavleniy [Coping behavior as a factor in the personal and professional development of students of a transport university in the context of socio-psychological and economic uncertainty and crisis phenomena]. *Razvitie cheloveka v usloviyakh sotsial'no-psikhologicheskoy i ekonomicheskoy neopredelennosti i krizisnykh yavleniy* [Development of a person in conditions of socio-psychological and economic uncertainty and crisis phenomena]. St. Petersburg: ANO "Sofiya", Izdatel'skiy projekt "Tvoy tekst", 2022, pp. 73–99. (In Russian)

2. Karagacheva M. V., Kaznacheeva N. B. *Tekhnologiya provedeniya sotsial'no-psikhologicheskikh treningov v distantsionnom formate. Prostranstvo obrazovaniya i lichnostnogo razvitiya: praktiki issledovaniya i sotrudnichestva: materialy mezhhregional'noy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Yaroslavl', 09–10 dekabrya 2021 goda* [Technology of conducting socio-psychological trainings in a remote format. The space of education and personal development: research and cooperation practices: materials of the interregional scientific and practical conference, Yaroslavl, December 09–10, 2021]. Yaroslavl': Gosudarstvennoe avtonomnoe uchrezhdenie dopolnitel'nogo professional'nogo obrazovaniya Yaroslavskoy oblasti "Institut razvitiya obrazovaniya" Publ., 2022, pp. 93–98. (In Russian)

3. Bendyukov M. A., Ermakova E. S., Ivanov M. V. et al. *Razvitie cheloveka v usloviyakh sotsial'no-psikhologicheskoy i ekonomicheskoy neopredelennosti i krizisnykh yavleniy* [Development of a person in conditions of socio-psychological and economic uncertainty and crisis phenomena]. St. Petersburg: ANO "Sofiya", Izdatel'skiy proekt "Tvoy tekst", 2022, 192 p. (In Russian)

4. Sinel'nikova E. S. *Samoorganizatsiya i udovletvorennost' zhizn'yu studentov na samoizolyatsii. Psikhologiya samoregulyatsii v kontekste aktual'nykh zadach obrazovaniya: materialy nauchnoy konferentsii, Moskva, 27–28 aprelya 2021 goda* [Self-organization and life satisfaction of students in self-isolation. Psychology of self-regulation in the context of actual tasks of education: materials of a scientific conference, Moscow, April 27–28, 2021]. Moscow: Psikhologicheskii institut Rossiyskoy akademii obrazovaniya Publ., 2021, pp. 170–175. (In Russian)

5. Tserfus D. N., Karagacheva M. V. *Psikhologicheskoe blagopoluchie i lokus kontrolya studentov transportnogo vuza. III Betankurovskiy mezhdunarodnyy inzhenernyy forum: sbornik trudov, Sankt-Peterburg, 02–03 dekabrya 2021 goda* [Psychological well-being and locus of control of students of a transport university. III Betancourt International Engineering Forum: Proceedings, St. Petersburg, December 02–03, 2021]. St. Petersburg: Peterburgskiy gosudarstvennyy universitet putey soobshcheniya Imperatora Aleksandra I Publ., 2021, pp. 183–185. (In Russian)

6. Yashchenko E. F. *Problema samoaktualizatsii, psikhologicheskogo blagopoluchiya i sub'ektivnogo schast'ya v period pandemii i sotsial'noy izolyatsii. Problemy sotsial'noy psikhologii i sotsial'noy raboty, Sankt-Peterburg, 16 aprelya 2021 goda* [The problem of self-actualization, psychological well-being and subjective happiness during a pandemic and social isolation. Problems of social psychology and social work, St. Petersburg, April 16, 2021]. St. Petersburg, 2021, pp. 34–35. (In Russian)

7. Yashchenko E. F., Sinel'nikova E. S., Shumov M. E. *Smyslozhiznennyye orientatsii i tolerantnost' k neopredelennosti v period pandemii u studentov transportnogo vuza* [Life orientation and tolerance to uncertainty during the pandemic period among students of a transport university]. *Transport BRIKS* [Transport BRICS]. 2023, vol. 1, Iss. 1, article 6. DOI: 10.46684/2023.1.6. (In Russian)

8. Komarova A. V., Slotina T. V., Zakharov K. P. et al. *Features of Coping Strategies of Students of a Technical University with Different Experience of Participation in Group Activities. Mobility for Smart Cities and Regional Development — Challenges for Higher Education. Proceedings of the 24th International Conference on Interactive Collaborative Learning (ICL2021), Volume 2: Proceedings of the 24th International Conference on Interactive Collaborative, Dresden, Germany, September 22–24,*

2021. Dresden, Germany: Springer Nature Switzerland, 2022, pp. 275–282. DOI: 10.1007/978-3-030-93907-6_29.

9. Shaymardanova A. V., Kulakova E. N. Odinochestvo studentov v protsesse sotsial'no-psikhologicheskoy adaptatsii k novym usloviyam [Loneliness of students in the process of social and psychological adaptation to new conditions]. *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy* [International Journal of Applied and Fundamental Research]. 2010, Iss. 3, p. 50. (In Russian)

10. Ishmukhametov I. N. *Psikhometricheskie kharakteristiki shkaly odinochestva UCLA (versiya 3): izuchenie studentov vuza* []. Computer Modelling and New Technologies, 2006, vol. 10, Iss. 3, pp. 89–95. (In Russian)

11. Kryukova T. L. Psikhologiya sovladaniya s odinochestvom [Psychology of coping with loneliness]. *Psikhologicheskie issledovaniya* [Psychological research]. 2016, vol. 9, Iss. 49, p. 1. (In Russian)

12. Osin E. N., Leont'ev D. A. Differentsial'nyy oprosnik perezhivaniya odinochestva: struktura i svoystva [Differential questionnaire of experiencing loneliness: structure and properties]. *Psikhologiya. Zhurnal Vysshey shkoly ekonomiki* [Psychology. Journal of the Higher School of Economics]. 2013, vol. 10, Iss. 1, pp. 55–81. (In Russian)

13. Ryzhakova E. V. Problema odinochestva sovremennoy studencheskoy molodezhi [The problem of loneliness of modern student youth]. *Nizhegorodskiy psikhologicheskiy al'manakh* [Nizhny Novgorod psychological almanac]. 2018, Iss. 1, pp. 1–6. (In Russian)

14. Kharlanova A. O. *Issledovanie odinochestva u studentov I kursa. Teoretiko-metodologicheskie i prakticheskie problemy razvitiya psikhologii i pedagogiki: sbornik statey po itogam Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Kazan', 26 sentyabrya 2017 goda* [The study of loneliness among 1st year students. Theoretical, methodological and practical problems of the development of psychology and pedagogy: a collection of articles based on the results of the International Scientific and Practical Conference, Kazan, September 26, 2017]. Kazan': Obshchestvo s ogranichennoy otvetstvennost'yu "Agentstvo mezhdunarodnykh issledovaniy" Publ., 2017, pp. 162–164. (In Russian)

15. P'yankova L. A. Problema odinochestva v molodezhnoy studencheskoy srede [The problem of loneliness in the youth student environment]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta* [Bulletin of the Tomsk State Pedagogical University]. 2012, Iss. 6(121), pp. 102–107. (In Russian)

16. Lyubyakin A. A., Okonechnikova L. V. Issledovanie odinochestva u studentov [Study of student loneliness]. *Pedagogicheskoe obrazovanie v Rossii* [Pedagogical education in Russia]. 2016, Iss. 2, pp. 149–156. (In Russian)

17. Lyubyakin A. A., Berdyugina O. G., Dubinina N. O. Issledovanie sub"ektivnogo oshchushcheniya odinochestva i adaptivnosti u studentov [The study of the subjective feeling of loneliness and adaptability among students]. *Pedagogicheskoe obrazovanie v Rossii* [Pedagogical education in Russia]. 2018, Iss. 9, pp. 101–107. DOI: 10.26170/po18-09-14. (In Russian)

18. Balkizova F. B. Vliyanie temperamenta na mezhlichnostnye otnosheniya u studentov [The influence of temperament on interpersonal relationships among students]. *Problemy i perspektivy*

razvitiya obrazovaniya v Rossii [Problems and prospects for the development of education in Russia]. 2014, Iss. 27, pp. 8–12. (In Russian)

19. Milovanova O. A. Vliyanie razlichnykh tipov temperamenta na stil' mezhlichnostnogo obshcheniya [Influence of different types of temperament on the style of interpersonal communication]. *Vestnik Ul'yanovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Ulyanovsk State Technical University]. 2018, Iss. 2(82), pp. 21–22. (In Russian)

20. Molokanov A. V. Issledovanie vliyaniya svoystv temperamenta na mezhlichnostnyye otnosheniya v gruppe studentov [Study of the influence of temperament properties on interpersonal relationships in a group of students]. *Nauchno-metodicheskiy elektronnyy zhurnal "Kontsept"* [Scientific and methodological electronic journal "Concept"]. 2015, Iss. T18, pp. 1–5. (In Russian)

21. Dukhnovskiy S. V. *Diagnostika mezhlichnostnykh otnosheniy* [Diagnostics of interpersonal relations]. St. Petersburg: Rech' Publ., 2010, 141 p. (In Russian)

22. Chernova G. R., Slotina T. V. *Psikhologiya obshcheniya* [Psychology of communication]. St. Petersburg: Piter Publ., 2017, 240 p. (In Russian)

23. Dukhnovskiy S. V. Sub'ektivnaya otsenka mezhlichnostnykh otnosheniy: opisanie metodiki [Subjective assessment of interpersonal relations: description of the methodology]. *Vestnik Kurganskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of the Kurgan State University]. 2006, pp. 84–89. (In Russian)

24. Manakova E. A. Oprosnik perezhivaniya odinochestva [Questionnaire for experiencing loneliness]. *Sibirskiy psikhologicheskiy zhurnal* [Siberian psychological journal]. Moscow, 2018, pp. 149–167. (In Russian)

25. Likhtenshteyn V. I., Konashkov V. V. *Opreделение tipa temperamenta po testu G. Ayzenka* [Determining the type of temperament according to the G. Eysenck test]. Moscow: Uchebnoe elektronnoe tekstovoe izdanie Publ., 2012, pp. 1–16. (In Russian)

Received: May 06, 2023

Accepted: May 26, 2023

Author's information:

Tatiana V. SLOTINA — PhD in Psychology, Associate Professor, Department of Applied Psychology; vladislava-97@mail.ru

Irina D. VASILYEVA — Student; wasdirina@gmail.com

УДК 625.033.34

О работе сборных водопропускных труб в теле насыпи двухпутного земляного полотна

Н. А. Перминов

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

Для цитирования: Перминов Н. А. О работе сборных водопропускных труб в теле насыпи двухпутного земляного полотна // Бюллетень результатов научных исследований. — 2023. — Вып. 2. — С. 41–53. DOI: 10.20295/2223-9987-2023-2-41-53

Аннотация

Цель: Установить особенности работы сборных железобетонных водопропускных труб во вмещающем грунтовом массиве двухпутной насыпи с учетом взаимодействия сборных конструкций тела трубы с грунтом. Проанализировать разнонаправленное относительно первого и второго путей сочетание воздействий горизонтальных составляющих поездных нагрузок при встречном прохождении поездов в зоне трубы. Дать предложения по выбору способов усиления конструкций сборных труб с учетом условий их работы в двухпутном земляном полотне. **Методы:** Анализ и использование аналитических и экспериментальных методов исследований для оценки работы водопропускных труб в теле земляного полотна, в том числе на двухпутных участках. Аналитическое сопоставление результатов исследований и данных инструментальных наблюдений. **Результаты:** Установлены особенности взаимодействия тела сборной водопропускной трубы с телом двухпутной насыпи при разнонаправленной горизонтальной составляющей поездной нагрузки, проанализирован характер распределения вдоль тела трубы напряженно-деформированного состояния вмещающего массива грунта двухпутного земляного полотна. Показано негативное влияние на тело сборной водопропускной трубы в насыпи на двухпутных участках сочетания разнонаправленного воздействия относительно первого и второго путей горизонтальных составляющих поездных нагрузок при встречном прохождении поездов. **Практическая значимость:** Полученные результаты о картине напряженно-деформированного состояния вмещающего грунтового массива и распределения усилий вдоль тела трубы при сочетании разнонаправленных горизонтальных воздействиях на двухпутной земляном полотне позволили установить характер их совместной работы. Это явилось основой для разработки предложения по выбору способов усиления конструкций труб с учетом условий их работы в земляном полотне двухпутных участков пути.

Ключевые слова: Сборная водопропускная труба, двухпутное земляное полотно, поездная нагрузка, горизонтальная составляющая нагрузки, активное и пассивное давления, методы усиления конструкции.

Введение. Общие черты рассматриваемой проблемы

Сборные железобетонные водопропускные трубы характеризуются особыми условиями работы в теле двухпутных насыпей. Проявление этих условий особо ощутимо для длительно эксплуатируемых сборных труб, находящихся в теле двухпутного земляного полотна. Известно, что само двухпутное земляное полотно проявляет специфику напряженно-деформированного состояния (НДС) в условиях вибродинамического воздействия от подвижной нагрузки на участке

встречного движения поездов. При этом экспериментальными исследованиями зафиксировано от 1,5- до 2-кратного увеличения горизонтальной составляющей амплитуды колебаний грунтов земляного полотна в зоне междупутья. Вибродатчиками характер этого увеличения зафиксирован на глубине до 2,5 м от уровня основной площадки [1, 2]. Поскольку грунты земляного полотна достаточно однородны и имеют высокую степень распределительной способности за счет природной геотехнической зернистости, позволяющей осуществлять перераспределение напряжений в геомассиве, то факт наложения вибродинамического воздействия при встречном движении поездов не вызывает нарушения прочности и деформативности земляного полотна [3]. Иная картина формирования напряженно-деформированного состояния наблюдается в зоне взаимодействия земляного полотна с контактирующими с ним или включенными в его тело конструктивными элементами с отличающимися на несколько порядков (от 25 до 150 МПа для грунтов насыпи и от 17 000 до 32 000 МПа для бетонных сопряжений и включений) величинами упругих деформаций. Это относится к бетонным конструкциям искусственных сооружений, например устоям мостов и бетонным водопропускным трубам. При контактном взаимодействии «разнотвердых» материалов тела насыпи и устоя моста происходит «скачок жесткости». Этот вопрос достаточно изучен при действии поездных нагрузок в условиях двухпутного движения поездов. Даны рекомендации для предотвращения деформаций насыпи земляного полотна в зоне контакта с устоем моста путем устройства различных конструкции переходной жесткости [4].

При встречном движении поездов в зоне расположения сборной водопропускной трубы в двухпутном земляном полотне так же, как и в выше рассмотренных случаях, имеет место ситуация воздействия разнонаправленной горизонтальной составляющей поездной нагрузки, в том числе с вибродинамической составляющей, на систему «тело сборной железобетонной трубы — тело насыпи двухпутного земляного полотна». Последствия этого отрицательного воздействия отмечены многочисленными исследованиями, в том числе выполненными автором статьи [5–7]. Анализ опытно-экспериментальных исследований показал, что характерным дефектом сборных водопропускных труб, длительно эксплуатируемых в двухпутных участках земляного полотна, является разрушение стыковых соединений между звеньями, вызывающее нарушение целостности тела трубы и приводящее к смещению секций тела трубы. Сопровождающееся при этом нарушение гидроизоляции и вынос частиц грунта из насыпи в полость тела трубы приводят к образованию пазух и нарушению целостности насыпи в зонах сопряжения. В силу особенностей сборной конструкции железобетонных водопропускных труб в статье делается попытка рассмотреть характер их работы в теле двухпутного земляного полотна для случая одновременного разнонаправленного воздействия поездной нагрузки при встречном движении поездов. На этой основе

автором статьи даются предложения по выбору способов усиления конструкций сборных труб с учетом условий их работы в земляном полотне двухпутных участков пути.

О характере распределения напряжений в массиве грунта относительно тела трубы при разнонаправленной полосовой нагрузке

Возьмем для качественной оценки характера распределения разнонаправленных напряжений от полосовой нагрузки условно-упрощенную задачу, где рассмотрим характер распределения напряжений в массиве грунта в зоне боковой поверхности сечений звеньев трубы, но без учета их контактного взаимодействия, возникающих от разнонаправленных нагрузок, имитирующих воздействие нагрузок от шпал через тело насыпи на сборные звенья относительно 1-го и 2-го путей (рис. 1).

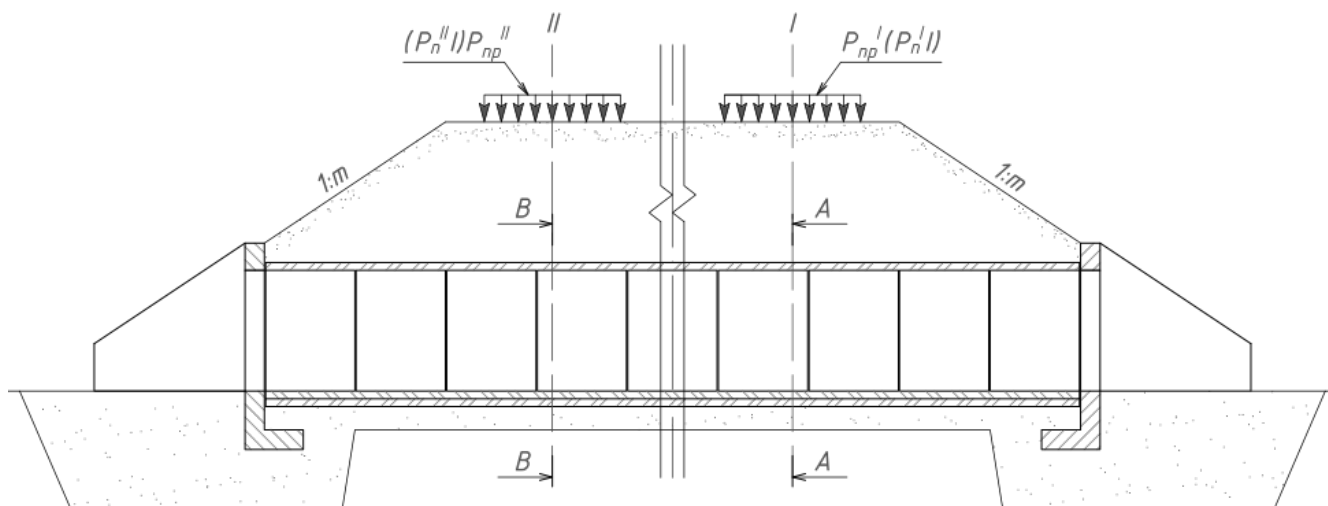


Рис. 1. Схема сборной водопропускной трубы с теле двухпутной насыпи с встречной поездной нагрузкой P' и P''

Воспользуемся одним из решений, принадлежащих Митчелу и позволяющих провести исследования вертикальных напряжений в земляном полотне с учетом распределяющей способности грунтов [8]. Для определения характера распределения напряжений в массиве грунта двухпутной насыпи от разнонаправленной полосовой нагрузки выполним серию расчетов. Используя предложенные решения, задаемся в соответствии с принятой схемой (рис. 1) следующими параметрами: P — равномерно распределенная нагрузка, соответственно P' и P'' от 1 и 2 осей, интенсивностью Па; α_B — угол видимости, рад; β_B — угол, расположенный между главными осями 1 или 3 и осями начальной системы координат Z или X , рад. (рис. 2).

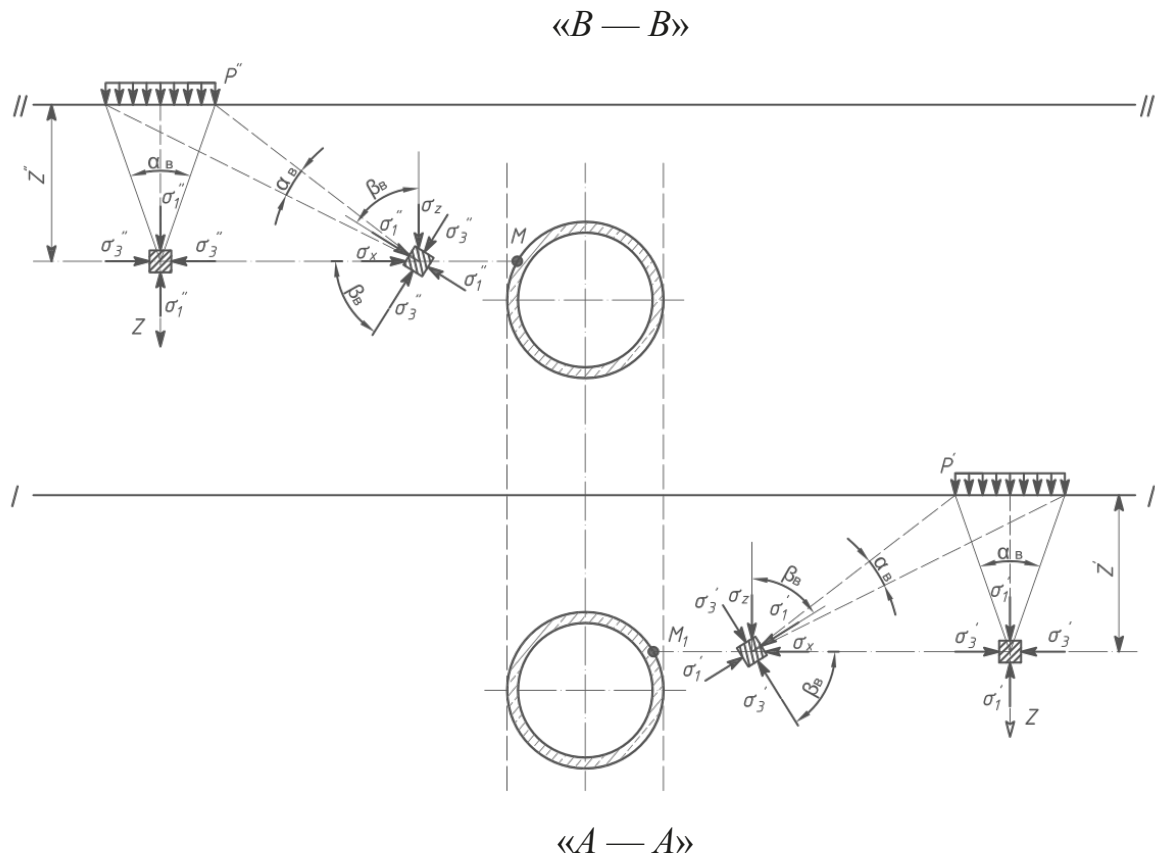


Рис. 2. Определение распределения напряжений по Митчеллу в массиве грунта от полосовой нагрузки в зоне боковой поверхности сечений звеньев, возникающих от разнонаправленных нагрузок, имитирующих воздействия нагрузок P' и P'' на сборные звенья относительно 1-го и 2-го путей

Составленные с использованием методики Митчелла расчетные схемы (рис. 2) применялись в расчетах по определению характера распределения напряжений в расчетных сечениях «A — A» по 1-му пути и «B — B» по 2-му пути. По результатам выполненных расчетов можно судить о закономерностях изменения величин главных напряжений с приближением к оси трубы со стороны 1 и 2 путей. Для установления общей динамики этих изменений были построены графики зависимости главных напряжений в относительных величинах: σ_1/p и σ_3/p от угла видимости нагрузки α_B (рис. 3).

Характер кривых на графиках «а» и «б» (рис. 3) справедлив при одинаковой удаленности и величины нагрузки и показывает идентичность картины изменения относительных величин главных напряжений σ_1/p' и σ_3/p'' от угла видимости α_B прикладываемых нагрузок. При этом следует иметь в виду, что зоны приложения этих нагрузок симметричны относительно оси трубы, но имеют разностороннюю направленность в зонах сечения трубы «A — A» и «B — B». Сочетание разностороннего приложения нагрузок к не цельно несущей, а к сборной конструкции трубы вызывает особенности в ее работе с сопряженными элементами и в контактном взаимодействии с вмещающим массивом грунта насыпи.

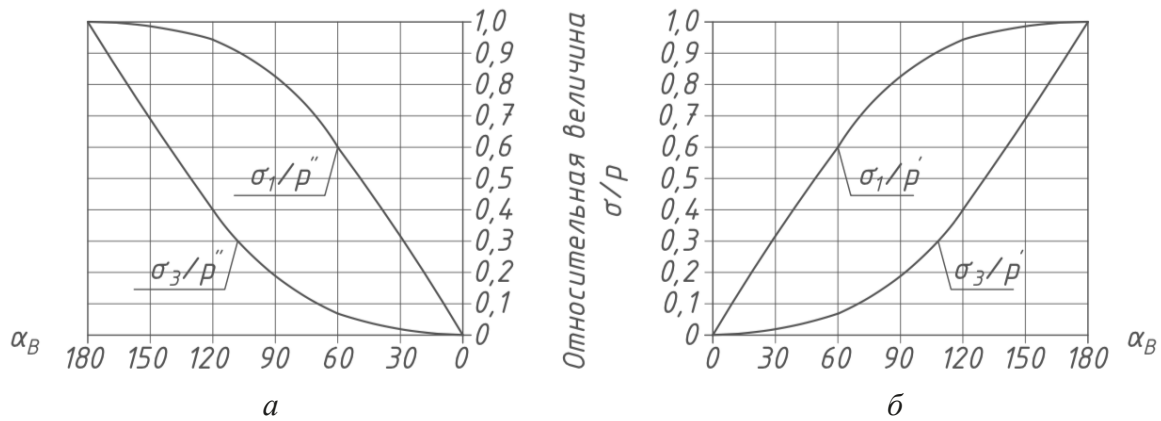


Рис. 3. Характер изменения относительной величины главных напряжений σ_1/p' и σ_3/p'' в зависимости от удаленности (угла видимости — α_B) нагрузки: a — зона сечения « $A — A$ »; b — зона сечения « $B — B$ »

Для частного случая расположения проездных нагрузок по оси трубы в зонах сечения « $A — A$ » и « $B — B$ » воздействие будет носить однонаправленный характер. Этот случай отражен в СП 35.13330. 2011, и для поверочных расчетов в нем предложены формулы определения главных напряжений в массиве грунта насыпи от нагрузки действующей по оси трубы.

На рис. 4 представлен характер изменений главных напряжений, вычисленных по выше отмеченной методике, в зависимости от относительной глубины Z/R и относительной удаленности приложения нагрузки L/R . Из анализа зависимостей (рис. 4, a, b) следует, что с изменением относительной глубины при Z/R от 0,25 до 2,5 и относительной удаленности нагрузки изменение динамики как приращения, так и уменьшения главных максимальных и минимальных напряжений носит разнонаправленный и знакопеременный характер.

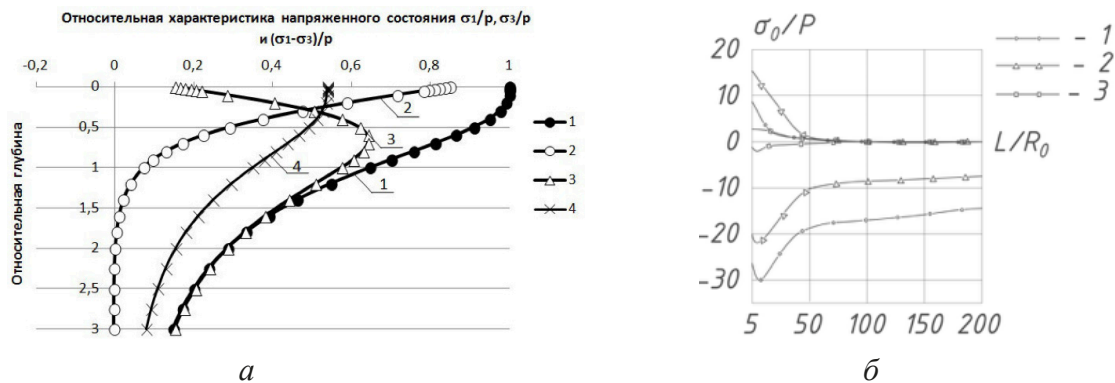


Рис. 4. Кривые изменения характеристик напряженного массива условно однородного грунта: a — при изменении приложении осевых нагрузок по относительной глубине Z/R соответственно относительных главных напряжений и девиатора напряжений — 1, 2, 3, 4; b — при изменении относительной удаленности приложения относительных нагрузок L/R соответственно от оси по сечениям « $A — A$ » и « $B — B$ » (при различных относительных глубинах 1, 2, 3)

Рассмотренный характер распределения напряжений в массиве грунта относительно тела трубы при разнонаправленной полосовой нагрузке выполнен с использованием условно-упрощенной модели, не учитывающей распределения контактных напряжений в массиве грунта в зоне взаимодействия с боковой поверхностью сечений звеньев трубы, возникающих от разнонаправленных нагрузок. Одновременное воздействие разнонаправленных нагрузок на тело трубы в сочетании с ее не цельно несущей, а сборной конструкцией вызывает нестационарные режимы в работе сопряженных элементов и нуждается в учете их контактного взаимодействия с вмещающим массивом грунта двухпутной насыпи.

Оценка воздействия на сборную трубу веса грунта двухпутной насыпи и встречной поездной нагрузки

Прочность и деформативность конструкции трубы, ее геометрическую изменчивость необходимо рассчитывать не только на данный период эксплуатации, а на всю историю нагружения поездной нагрузкой с учетом процесса контактного взаимодействия оболочки звеньев трубы грунтовым массивом

По общей теории [8] давление грунта насыпи на тело трубы в состоянии покоя можно определить из выражения:

$$\sigma_0(z) = \sigma_x(z, u_x) \Big|_{u_x=0} = \lambda_0 \gamma z. \quad (1)$$

где λ_0 — коэффициент бокового давления грунта в состоянии покоя;

γ — удельный вес грунта;

z — расстояние от поверхности грунта до рассматриваемой точки.

Проведем оценку воздействия на водопропускную трубу от веса грунта насыпи и поездной нагрузки. Рассмотрим влияние активного и пассивного давлений с точки зрения возможного проявления смещений звеньев сборной трубы при нарушении сплошности стыковых соединений. Активное и пассивное давление грунта на ограждение составляют предельные величины давлений, то есть эффективное давление всегда находится в диапазоне:

$$\sigma_a(z) \leq \sigma_x(z, u_x) \leq \sigma_p(z). \quad (2)$$

С некоторым допущением, принятым в современной теории бокового давления грунта [10], функцию давления грунта от смещения представим как:

$$f(u_x) = \sigma_0 - k u_x, \quad (3)$$

где k — коэффициент жесткости грунта;

σ_0 — давление грунта в состоянии покоя.

В качестве коэффициента жесткости грунта можно использовать коэффициент постели грунта (отпора). Результирующим давлением по образующей верхнего, среднего и нижнего участков тела трубы является сумма эффективных давлений от грунтового массива и поездной нагрузки.

Построим функцию $\sigma_x(z, u_x)$ в виде кусочно-заданной функции для любого значения z .

Для описания эффективных давлений $\sigma_x(z, u_x)$ для отдельных участков диаграммы, находящихся в интервалах между предельными активным $\sigma_a(z) = \lambda_a \gamma z - c\lambda_{ac}$ и пассивным $\sigma_p(z) = \lambda_p \gamma z + c\lambda_{pc}$ давлениями вместо индексов "l", "r" для слагаемых, относящихся к звеньям для участков трубы над осями I и II путей. В том случае величины давления σ_x на боковую поверхность звена на некоторой глубине z от перемещений $\sigma_x(z, u_x)$ получают вид:

$$\sigma_x(z, u_x) = \begin{cases} \sigma_p^l(z) - \sigma_a^r(z - h_k), & u_x \leq u_1 \\ \sigma_0^l(z) - \sigma_a^r(z - h_k) - u_x k^l, & u_1 < u_x < u_2 \\ \sigma_0^l(z) - \sigma_a^r(z - h_k) - u_x(k^l + k^r), & u_2 < u_x < u_3. \\ \sigma_a^l(z) - \sigma_0^r(z - h_k) - u_x k^r, & u_3 < u_x < u_4 \\ \sigma_a^l(z) - \sigma_p^r(z - h_k), & u_4 \leq u_x \end{cases} \quad (4)$$

При раздельном рассмотрении результирующие давления на участки тела трубы от верхней до нижней грани ($z \leq h_k$), то выражение (7) примет вид:

$$\sigma_x(z, u_x) = \begin{cases} \sigma_p^l(z), & u_x \leq u_1 \\ \sigma_0^l(z) - k^l u_x, & u_1 < u_x < u_3. \\ \sigma_a^l(z), & u_3 \leq u_x \end{cases} \quad (5)$$

После общего преобразования выражения (4) и (5) получают следующий вид:

$$\sigma_x(z, u_x) = \begin{cases} \lambda_{pl} \gamma z + c\lambda_{pcl}, & u_x \leq u_1 \\ \lambda_{0l} \gamma z + k_l u_x, & u_1 < u_x < u_3. \\ \lambda_{al} \gamma z + c\lambda_{acl}, & u_3 \leq u_x \end{cases} \quad (6)$$

$$\sigma_x(z, u_x) = \begin{cases} \lambda_p^l \gamma z - \lambda_a^r \gamma (z - h_k) + c\lambda_{pc}^l + c\lambda_{ac}^l, & u_x \leq u_1 \\ \lambda_0^l \gamma z - \lambda_a^r \gamma (z - h_k) + c\lambda_{ac}^r - u_x k^l, & u_1 < u_x < u_2 \\ \lambda_0^l \gamma z - \lambda_a^r \gamma (z - h_k) - u_x(k^l + k^r), & u_2 < u_x < u_3. \\ \lambda_a^l \gamma z - \lambda_0^r \gamma (z - h_k) - c\lambda_{ac}^r - u_x k^r, & u_3 < u_x < u_4 \\ \lambda_a^l \gamma z - \lambda_p^r \gamma (z - h_k) - c\lambda_{ac}^l - c\lambda_{ac}^r, & u_4 \leq u_x \end{cases} \quad (7)$$

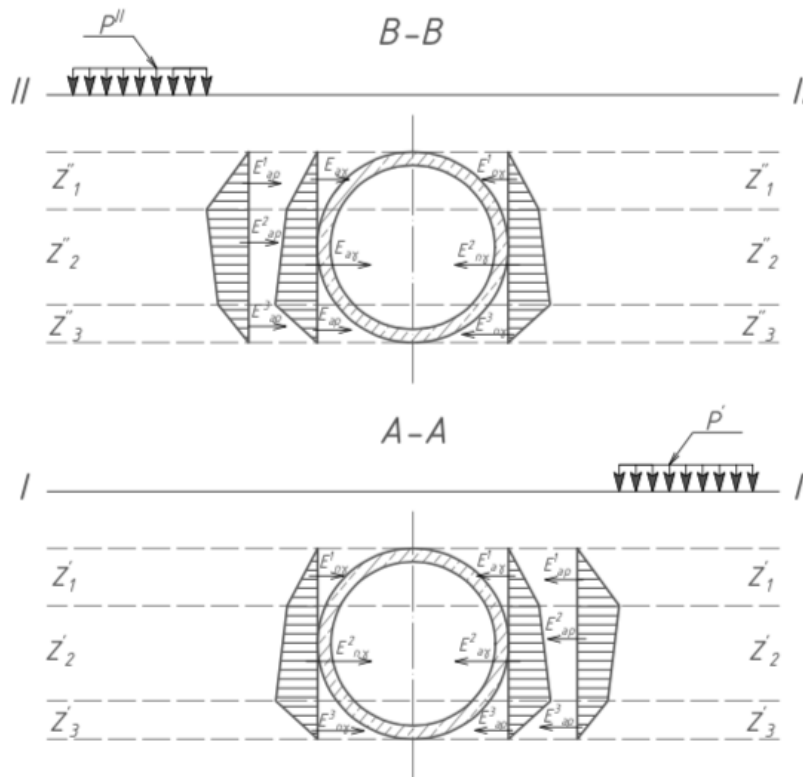


Рис. 5. Результирующие давления по образующей верхнего, среднего и нижнего участков тела трубы соответственно по сечениям «А — А» и «В — В» сумма эффективных давлений от грунтового массива и поездной нагрузки для первого — I и второго — II путей

После внесения соответствующих индексов, одних — указывающих положение участка сборной трубы относительно I и II путей, других — характеризующих направления и зоны действия результирующих величин активного и пассивного давлений от воздействия горизонтальной составляющей расчетного веса массива грунта и горизонтальной (продольной) составляющей поездной нагрузки в зоне ее максимального влияния, производятся уточнения составляющих формул (6) и (7). На рис. 5 представлены эпюры давлений в соответствии с характером потенциальных смещений тела сборной водопропускной трубы. Вибродинамический характер горизонтальных составляющих активного и пассивного давлений от грунтового массива и поездной нагрузки на боковую поверхность смежных звеньев трубы вызывают знакопеременные НДС стыковых соединений и скачкообразный характер перемещений: разнонаправленные деформации, смещения участков тела сборной трубы под I и II путями для случая одновременного воздействия поездной нагрузки на боковую поверхность звеньев при встречном прохождении составов в зоне активного влияния. Путем использования полученных выражений и зависимостей создается возможность определения результирующих разнонаправленных воздействий на тело сборной трубы в двухпутной насыпи для случая одновременного встречного прохождения поездов по насыпи

над трубой в зоне активного влияния горизонтальной составляющей поездной нагрузки и их использование в расчетном обосновании усиления конструкций при ремонте и реконструкции длительно эксплуатируемых водопропускных труб. На основании анализа условий нестационарной работы сборных водопропускных труб в теле двухпутного земляного полотна явно просматривается проблема необходимости защиты стыковых соединений от разнонаправленного и знакопеременного воздействия поездной нагрузки при встречном движении поездов [12, 13].

Заключение

Проведенный анализ позволил установить особенности работы водопропускных труб во вмещающем грунтовом массиве двухпутной насыпи с учетом взаимодействия сборных конструкций тела трубы с грунтом для случая разнонаправленного относительно первого и второго путей сочетания воздействий горизонтальных составляющих поездных нагрузок при встречном прохождении поездов в зоне трубы.

Показано, что сумма эффективных давлений на тело сборной трубы, находящейся в массиве грунта насыпи двухпутного земляного полотна, носит асимметричный и знакопеременный относительно оси тела трубы. Нестационарность воздействия проявляется как в противоположных осевых направлениях, так и в верхнем, среднем и нижнем частях трубы и вызывает скачки напряженно-деформированного состояния в теле сборной трубы.

При расчетном обосновании выбора конструктивного решения и способа усиления длительно эксплуатируемых конструкций труб указана необходимость учета знакопеременного характера напряженно-деформированного состояния тела сборной трубы для обеспечения конструктивной безопасности водопропускного сооружения при работе в насыпи двухпутного земляного полотна. В качестве конструктивного решения предлагается система восстановления и усиления тела сборной трубы, включающая поверхностное армирование зон стыковых соединений углепластиковым материалом типа Wrab, футеровка внутренней поверхности трубы, например полимерной навивкой по технологии «Сатурн» с последующим заполнением межтрубного пространства полимерцементным раствором. Способ усиления водопропускных труб успешно применяется в ОАО «РЖД» Октябрьской железной дороге на Мурманском, Московском и Витебском направлениях [14].

Библиографический список

1. Прокудин И. В. Распространение в железнодорожных насыпях колебаний, возникающих от проходящих поездов / И. В. Прокудин // Вопросы земляного полотна и геотехники на железнодорожном транспорте. — 1980. — Вып. 208/29. — С. 24–30.

2. Смолин Ю. П. Исследование колебаний двухпутных железнодорожных насыпей от поездной нагрузки / Ю. П. Смолин // Известия вузов. Серия: Строительство и архитектура. — 1986. — № 5. — С. 1–20.
3. Кузахметова Э. К. Учет особенностей механического отклика слабых грунтов на действие внешней нагрузки на примере линейных транспортных сооружений / Э. К. Кузахметова, Я. О. Пономарев, Н. С. Степаненко // Полевые и лабораторные методы исследования грунтов: материалы Общероссийской научно-практической конференции. — 2019. — С. 15–25.
4. Дыдышко П. И. Осадки пути и горизонтальные перемещения рельсовпод поездной нагрузкой / П. И. Дыдышко, В. В. Макаров // Вестник ВНИИЖТА. — 2010. — № 1. — С. 19–21.
5. Коншин Г. Г. Работа земляного полотна под поездами / Г. Г. Коншин. — Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2012. — 208 с.
6. Колос А. Ф. Прогнозирование несущей способности и деформативности подшпального основания при повышенных вибродинамических нагрузках / А. Ф. Колос, Е. И. Шехтман, В. В. Говоров и др. // Бюллетень результатов научных исследований. — 2018. — № 2. — С. 60–66.
7. Серебряков Д. В. Исследование колебательных процессов в земляном полотне на участках сопряжения с мостами / Д. В. Серебряков, А. А. Конон, В. В. Ганчиц // Путь и путевое хозяйство. — 2017. — № 9. — С. 9–11.
8. Александров А. С. Исследование вертикальных напряжений в земляном полотне с учетом распределяющей способности грунтов / А. С. Александров, Н. П. Александрова, Н. В. Кузин и др. // Транспортное строительство. — 2010. — № 8. — С. 18–21.
9. Справочник геотехника. Основания, фундаменты и подземные сооружения / Под общей ред. В. А. Ильичева и Р. А. Мангушева. — М.: АСВ, 2016. — 1040 с.
10. Караулов А. М. Определение предельных давлений на ограждения учетом сейсмических воздействий / А. М. Караулов, К. В. Королев, Ю. П. Смолин // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. — 2017. — № 4(43). — С. 49–53.
11. Саммаль А. С. Аналитический метод определения напряженного состояния многослойной обделки, создаваемой в результате восстановительного ремонта коллекторного тоннеля / А. С. Саммаль, О. М. Левищева, Т. Г. Саммаль // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. — 2013. — № 1. — С. 158–163.
12. Патент № 2016100526 Российская Федерация RU 2620478 С1. Конструкция для внутренней защиты водопропускных систем и способ восстановительных работ с ней (варианты). Заявка № от 11.01.2016.
13. Церех С. Г. Прогнозирование поведения водопропускных труб с учетом деформаций и повреждений эксплуатационного характера / С. Г. Церех, И. Г. Овчинников // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. — 2022. — № 3. — С. 79–87.
14. Перминов Н. А. Инновационная геотехнология ремонта водопропускных сооружений / Н. А. Перминов, И. П. Сафонов, А. Н. Перминов // Путь и путевое хозяйство. — 2017. — № 9. — С. 16–21.

Дата поступления: 04.04.2023

Решение о публикации: 10.05.2023

Контактная информация:

ПЕРМИНОВ Николай Алексеевич — канд. техн. наук, доц.; perminov-n@mail.ru

On the Operation of a Combined Culvert in the Body of a Double-Track Embankment

N. A. Perminov

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

For citation: Perminov N. A. On the Operation of a Combined Culvert in the Body of a Double-Track Embankment. *Bulletin of scientific research results*, 2023, iss. 2, pp. 41–53. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2023-2-41-53

Summary

Purpose: To find out features of operation of precast reinforced concrete culverts in the embedding soil bulk of the two-track embankment with account of interaction of precast culvert structures and soil for the case of oppositely directed towards the first and second tracks combination of horizontal components of train loads at opposite transit of trains in the culvert area; to propose on selection of methods of reinforcement of culvert structures with account of conditions of their operation in the two-track subgrade. **Methods:** The analysis and use of analytical and experimental research methods for evaluating operation of culverts in the body of the subgrade including two-track sections of railway. Analytical comparison of research results and data of instrumental observations. **Results:** There have been identified the features of interaction of the body of the precast culvert with the body of the two-track embankment at oppositely directed horizontal components of the train load, there has been analyzed the nature of distribution of stress-strain state of the embedding soil bulk of the two-track subgrade along the culvert body. There has been demonstrated a negative influence of the combination of oppositely directed towards the first and second tracks combination of horizontal components of train loads at opposite transit of trains on the body of the precast culvert in the embankment of two-track sections. **Practical significance:** The obtained results concerning the stress-strain behavior of the embedding soil bulk and distribution of forces along the culvert body at combination of oppositely directed horizontal actions at the two-track subgrade allowed identifying the nature of their joint operation and, based on it, proposing on selection of methods of reinforcement of culvert structures with account of conditions of their operation in the subgrade of two-track parts of railways.

Keywords: Precast culvert, two-track subgrade, train load, horizontal component of load, active/passive pressures, methods of reinforcement of structures.

References

1. Prokudin I. V. Rasprostranenie v zheleznodorozhnykh nasypakh kolebaniy, voz-nikayushchikh ot prokhodyashchikh poezdov [Propagation in railway embankments of oscillations arising from passing trains]. *Voprosy zemlyanogo polotna i geotekhniki na zheleznodorozhnom transporte* [Issues of subgrade and geo-technics in railway transport]. 1980, Iss. 208/29, pp. 24–30. (In Russian)
2. Smolin Yu. P. Issledovanie kolebaniy dvukhputnykh zheleznodorozhnykh nasypey ot poezdnoy nagruzki [Study of vibrations of double-track railway embankments from train loads]. *Izvestiya vuzov. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura* [Izvestiya vuzov. Series: Construction and architecture tour]. 1986, Iss. 5, pp. 1–20. (In Russian)

3. Kuzakhmetova E. K., Ponomarev Ya. O., Stepanenko N. S. Uchet osobennostey mekhanicheskogo otklika slabykh gruntov na deystvie vneshney nagruzki na primere lineynykh transportnykh sooruzheniy [Taking into account the peculiarities of the mechanical response of weak soils to the action of an external load on the example of linear transport structures]. *Polevye i laboratornye metody issledovaniya gruntov: materialy Obshcherossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Field and laboratory methods of soil research: materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference]. 2019, pp. 15–25. (In Russian)

4. Dydyshko P. I., Makarov V. V. Osadki puti i gorizontal'nye peremeshcheniya rel'sovpod poezdnoy nagruzkoj [Settlement of the track and horizontal movement of rails under train load]. *Vestnik VNIIZhTA* [Vestnik VNIIZhTA]. 2010, Iss. 1, pp. 19–21. (In Russian)

5. Konshin G. G. *Rabota zemlyanogo polotna pod poezdami* [Work of subgrade under trains]. Uchebno-metodicheskiy tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte, 2012, 208 p. (In Russian)

6. Kolos A. F., Shekhtman E. I., Govorov V. V. Prognozirovaniye nesushchey sposobnosti i deformativnosti podshpal'nogo osnovaniya pri povyshennykh vibrodinamicheskikh nagruzkakh [Forecasting the bearing capacity and deformability of the under-sleeper base under increased vibrodynamic loads]. *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy* [Bulletin of scientific research results]. 2018, Iss. 2, pp. 60–66. (In Russian)

7. Serebryakov D. V., Konon A. A., Ganchits V. V. Issledovanie kolebatel'nykh protsessov v zemlyanom polotne na uchastkakh sopryazheniya s mostami [Study of oscillatory processes in the subgrade at the intersections with bridges]. *Put'i i putevoe khozyaystvo* [Way and track facilities]. 2017, Iss. 9, pp. 9–11. (In Russian)

8. Aleksandrov A. S., Aleksandrova N. P., Kuzin N. V. et al. Issledovanie vertikal'nykh napryazheniy v zemlyanom polotne s uchetom raspredelyayushchey sposobnosti gruntov [Study of vertical stresses in the subgrade, taking into account the distribution capacity of soils]. *Transportnoe stroitel'stvo* [Transport Construction]. 2010, Iss. 8, pp. 18–21. (In Russian)

9. *Spravochnik geotekhnika. Osnovaniya, fundamente i podzemnye sooruzheniya; pod obshchey red. V. A. Il'icheva i R. A. Mangusheva* [Handbook of geotechnics. Foundations, Foundations and Underground Structures. Ed. V. A. Ilyichev and R. A. Mangushev]. Moscow: ASV Publ., 2016, 1040 p. (In Russian)

10. Karaulov A. M., Korolev K. V., Smolin Yu. P. Opredeleniye predel'nykh davleniy na ograzhdeniya uchetom seysmicheskikh vozdeystviy [Determination of limiting pressures on fences taking into account seismic impacts]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* [Bulletin of the Siberian State University of Communications]. 2017, Iss. 4(43), pp. 49–53. (In Russian)

11. Sammal' A. S., Levisheva O. M., Sammal' T. G. Analiticheskiy metod opredeleniya napryazhennogo sostoyaniya mnogoslnoy obdelki, sozdavaemoy v rezul'tate vosstanovitel'nogo remonta kollek-tornogo tonnelya [Analytical method for determining the stress state of a multilayer lining created as a result of the restoration repair of a collector tunnel]. *Izvestiya Tul'skogo*

gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle [Izvestiya Tula State University. Earth Sciences]. 2013, Iss. 1, pp. 158–163. (In Russian)

12. Perminov N. A. *Konstruktsiya dlya vnutrenney zashchity vodopropusknykh sistem i sposob vosstanovitel'nykh rabot s ney (varianty)* [Structure for internal protection of culvert systems and method of restoration work with it (options)]. Patent RF, no. 2016100526, 2016. (In Russian)

13. Tserekh S. G., Ovchinnikov I. G. *Prognozirovanie povedeniya vodopropusknykh trub s uchetom de-formatsiy i povrezhdeniy ekspluatatsionnogo kharaktera* [Forecasting the behavior of culverts, taking into account deformations and operational damage]. *Transport. Transportnye sooruzheniya. Ekologiya* [Transport. Transport facilities. Ecology]. 2022, Iss. 3, pp. 79–87. (In Russian)

14. Perminov N. A., Safonov I. P., Perminov A. N. *Innovatsionnaya geotekhnologiya remonta vodopropusknykh sooruzheniy* [Innovative geotechnology for the repair of culverts]. *Put' i putevoe khozyaystvo* [Path and track facilities]. 2017, Iss. 9, pp. 16–21. (In Russian)

Received: April 04, 2023

Accepted: May 10, 2023

Author's information:

Nikolai A. PERMINOV — PhD in Engineering, Associate Professor; perminov-n@mail.ru

УДК 629.4.053.3

Уточнение математической модели межвагонной связи с пружинно-фрикционными поглощающими аппаратами для исследования продольных колебаний грузового поезда

С. В. Беспалько, Н. О. Жухин, О. Е. Пудовиков

Российский университет транспорта РУТ (МИИТ), Российская Федерация, 127994, Москва, ул. Образцова, 9

Для цитирования: Беспалько С. В., Жухин Н. О., Пудовиков О. Е. Уточнение математической модели межвагонной связи с пружинно-фрикционными поглощающими аппаратами для исследования продольных колебаний грузового поезда // Бюллетень результатов научных исследований. — 2023. — Вып. 2. — С. 54–70. DOI: 10.20295/2223-9987-2023-2-54-70

Аннотация

Цель: Разработка усовершенствованной модели межвагонной связи, оборудованной пружинно-фрикционными поглощающими аппаратами типа ПМК-110. Данная модель должна учитывать как особенности силовой характеристики поглощающих аппаратов этого типа, так и деформации кузовов экипажей, а также диссипацию энергии возникающих в поезде продольных сил за счет вязкого сопротивления деформированию конструкции экипажей. **Методы:** Анализ, математическое и имитационное моделирование. **Результаты:** На основе двух известных математических моделей межвагонных связей с пружинно-фрикционными поглощающими аппаратами разработана усовершенствованная модель межвагонной связи, оборудованная пружинно-фрикционными поглощающими аппаратами типа ПМК-110. Показано, что данная модель повышает достоверность расчета величин продольных сил, возникающих в поглощающих аппаратах межвагонных связей поезда. **Практическая значимость:** Предложенная модель межвагонной связи может быть использована в исследованиях продольных колебаний поезда, поскольку дает более достоверные результаты расчетов применительно ко всем режимам нагружения.

Ключевые слова: Математическая модель поезда, математическая модель поглощающего аппарата, межвагонные связи поезда, продольные силы в поезде, продольная динамика поезда, поглощающий аппарат.

Железнодорожный поезд представляет собой сложную механическую систему, состоящую из локомотивов и вагонов, взаимодействующих друг с другом посредством упруго-диссипативных нелинейных связей с зазором (поглощающие аппараты и автосцепки). В процессе движения поезда в нем возникают динамические процессы, обусловленные изменениями тяговых и тормозных сил, а также сил сопротивления движению. Различают установившийся и неустановившийся (переходной) режимы движения поезда, первый из которых (равномерное или равноускоренное движение) осуществляется под действием постоянных или изменяющихся внешних сил при условии завершения переходного процесса, а второй (трогание с места, торможение, соударения) — непосредственно переходной процесс под действием быстро изменяющихся внешних сил.

Колебания, возникающие в переходных режимах движения грузовых поездов, вызывают продольные силы значительной амплитуды, при определенных условиях превышающие величины, максимально допустимые по условиям прочности элементов конструкции подвижного состава. Величины продольных сил зависят от темпов изменения сил тяги и торможения, режима движения, характеристик профиля пути, на котором располагается поезд, параметров межвагонных связей, скоростей перемещения экипажей поезда друг относительно друга и множества других факторов [1]. Необходимость определения продольных сил возникает при обосновании весовых норм поездов и установлении безопасных скоростей движения поездов [2, 3], разработке способов управления тяговыми и тормозными средствами поезда [4]. Для решения данных задач разработан целый ряд моделей поезда, отражающих различные его особенности как объекта исследования.

Так, профессор Н. Е. Жуковский рассматривал поезд в виде упругого стержня с отдельной массой локомотива или в виде отдельных масс вагонов, соединенных упругими связями, допускающими свободные относительные перемещения. Данные модели позволяли оценить максимальные силы, возникающие при трогании растянутого поезда, и не учитывали затухание возникающих в поезде продольных колебаний [5]. В. А. Лазарян в своих работах представлял поезд как упруго-вязкий стержень с грузами на обоих концах. При этом учитывалось гашение продольных колебаний из-за рассеяния энергии, а также постепенное нарастание силы тяги. Такая модель позволяла оценивать продольные силы, возникающие при трогании с места и торможении, а также при аварийных соударениях вагонов [6, 7].

С. В. Вершинский, исследуя движение поезда по переломному профилю пути, рассматривал поезд как многозвенный шарнирно-стержневой механизм. Такой подход позволял оценить взаимные перекосы экипажей и деформирование пружин рессорного подвешивания под действием сжимающих и растягивающих продольных сил [8]. Влияние нелинейности характеристик межвагонных связей было изучено Н. А. Панькиным. Он показал, что в поезде могут возникать ударные волны и определил, при каких характеристиках межвагонных связей возникновение ударных волн маловероятно [9]. В работах А. У. Галеева и Ю. И. Першица при решении задачи трогания с места осаженого поезда поезд рассматривался как система твердых тел [10]. При этом впервые учитывалось наличие зазоров в межвагонных связях, а деформация связей рассматривалась только при первом нагружении. Но в данной модели не учитывались упругие свойства экипажей поезда, а также распространение вдоль поезда волн растяжения и сжатия.

В работах Е. П. Блохина, Л. А. Манашкина, Л. А. Мугинштейна и многих других ученых проводилось дальнейшее совершенствование математических моделей поезда, широко рассматривалось изучение динамических процессов в поезде с помощью ЭВМ. В этих исследованиях использована дискретная многомассовая модель поезда [1, 4]. В данной модели поезд рассматривается в виде цепочки масс

экипажей (локомотивов и вагонов), соединенных упруго-вязкими межвагонными связями. Каждый экипаж совершает движение под действием силы тяги и силы сопротивления движению, а также под действием реакций, возникающих в межвагонных связях при взаимном перемещении экипажей. Принимается допущение, что экипажи являются абсолютно твердыми телами, а межвагонные связи поезда не имеют массы. Движение экипажей поезда в этом случае описывается следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} \dot{v}_i = \frac{S_{i+1} - S_i + F_i}{m_i}, \quad i = \overline{1, n}; \quad S_{n+1} = 0, \\ \dot{x}_1 = v_1 = -\dot{q}_1 \end{cases}, \quad (1)$$

где v_i — скорость центра масс i -го экипажа;
 S_i — продольная сила в i -й межвагонной связи;
 F_i — равнодействующая сил тяги, торможения и сопротивления движению, действующая на i -й экипаж;
 m_i — масса i -го экипажа;
 n — число экипажей в поезде;
 q_1 — деформация 1-й межвагонной связи;
 x_i — координата центра масс i -го экипажа.

Величины деформаций межвагонных связей для каждого межвагонного соединения q_i определяются на основе координат центров масс и длины соседних экипажей [1]:

$$q_i = x_i - x_{i-1} - \frac{l_i + l_{i-1}}{2}, \quad i = \overline{2, n}, \quad (2)$$

где l_i — длина i -го экипажа.

Зная величины деформаций межвагонных связей, можно по силовой характеристике межвагонной связи определить величину продольной силы для каждой связи в каждый момент времени. Для этого математическая модель поезда дополняется математическими моделями межвагонных связей. Характеристики межвагонных связей во многом определяют характер изменения продольных сил, возникающих в поезде.

Рассмотрим модели межвагонных соединений, оборудованных пружинно-фрикционными поглощающими аппаратами, в настоящее время достаточно широко распространенными на железных дорогах РФ и стран СНГ. Ряд пружинно-фрикционных поглощающих аппаратов оборудованы дополнительными фрикционными элементами [12], поэтому ветви их силовой характеристики имеют два участка различной крутизны.

Так, для ряда поглощающих аппаратов без дополнительных фрикционных элементов (например, поглощающих аппаратов типа Ш-2-В) известна математическая модель межвагонного соединения [1]. Величина продольной силы в каждой межвагонной связи определяется из выражения:

$$S_i = S_{\phi i}(q_{\phi i}) \text{sign } q_i, \tag{3}$$

где S_i — продольная сила, возникающая в i -м межвагонном соединении;
 $S_{\phi i}$ — продольная сила, возникающая в поглощающих аппаратах межвагонного соединения;
 $q_{\phi i}$ — фактическая деформация поглощающих аппаратов и кузовов экипажей. Величина деформации поглощающего аппарата $q_{\phi i}$ определяется из условий (4):

$$q_{\phi i} = \begin{cases} q_i, & \text{если } q_i \geq \delta_{0i} \\ 0, & \text{если } q_i < \delta_{0i} \\ -q_i, & \text{если } q_i < 0 \end{cases}, \tag{4}$$

где q_i — перемещение центров масс соседних экипажей относительно друг друга. Максимальная величина q_i равна сумме зазора в межвагонной связи и удвоенного максимального хода поглощающих аппаратов;
 δ_{0i} — зазор в автосцепках i -го межвагонного соединения.
 Продольная сила $S_{\phi i}$, возникающая в поглощающих аппаратах вычисляется с использованием уравнений [1]:

$$S_{\phi i} = \begin{cases} \min \{S_{\text{ни}}; S_{\text{ки}}\}, & \text{если } (q_{\phi i} < \Delta_i) \wedge (q_{\phi i}(t) \geq q_{\phi i}(t-h)) \\ \max \{S_{\text{пи}}; S_{\text{ки}}\}, & \text{если } (q_{\phi i} < \Delta_i) \wedge (q_{\phi i}(t) < q_{\phi i}(t-h)); \\ S_{\text{ки}}, & \text{если } (q_{\phi i} \geq \Delta_i) \end{cases} \tag{5}$$

$$\begin{cases} S_{\text{ни}} = S_{0i} + k_{\text{ни}} q_{\phi i} \\ S_{\text{пи}} = (1 - \eta_i) k_{\text{ни}} q_{\phi i} \\ S_{\text{ки}} = S_i + k_{\text{ки}} (q_{\phi i}(t) - q_{\phi i}(t-h)) + \beta_i \dot{q}_i \text{sign } q_i \\ S_i = S_{\text{ни}}(t-h) \vee S_{\text{пи}}(t-h), & \text{если } S_{\phi i}(t-h) = S_{\text{ни}}(t-h) \vee S_{\text{пи}}(t-h) \\ \text{иначе } S_i = S_{\phi i}(t-h) - \beta_i \dot{q}_i(t-h) \text{sign } q_i(t-h) \end{cases}, \tag{6}$$

где $S_{\text{ни}}$ и $S_{\text{пи}}$ — силы на ветвях нагрузки и разгрузки характеристики поглощающего аппарата;

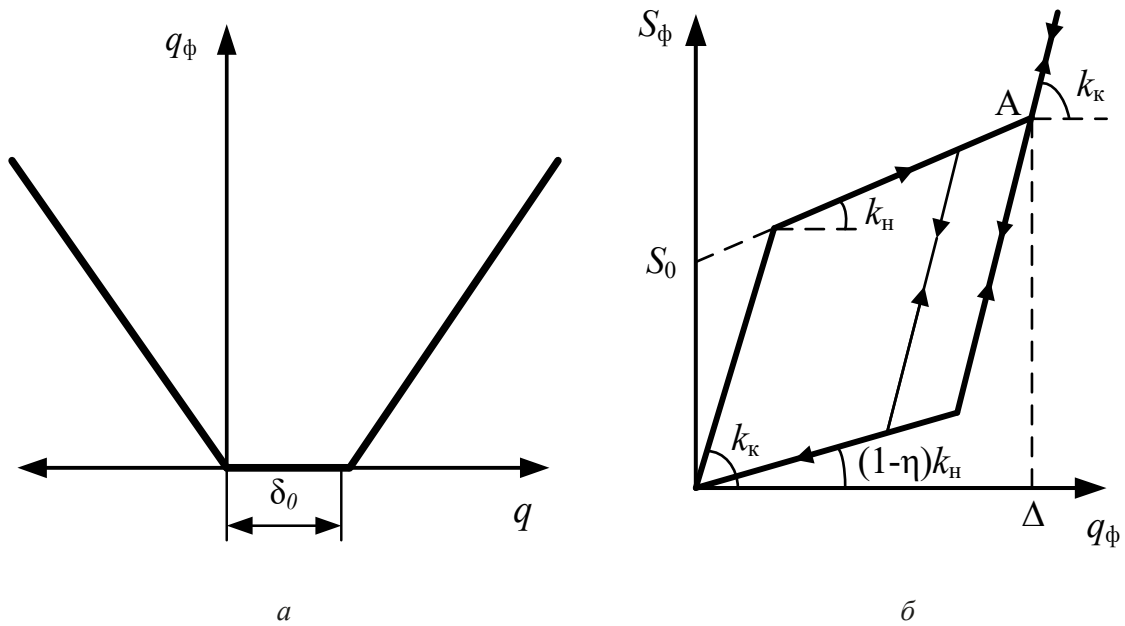


Рис. 1. Общий вид характеристик межвагонной связи с поглощающими аппаратами типа Ш-2-В: графики зависимостей деформации поглощающих аппаратов от деформации межвагонной связи (а) и продольной силы от деформации поглощающих аппаратов (б)

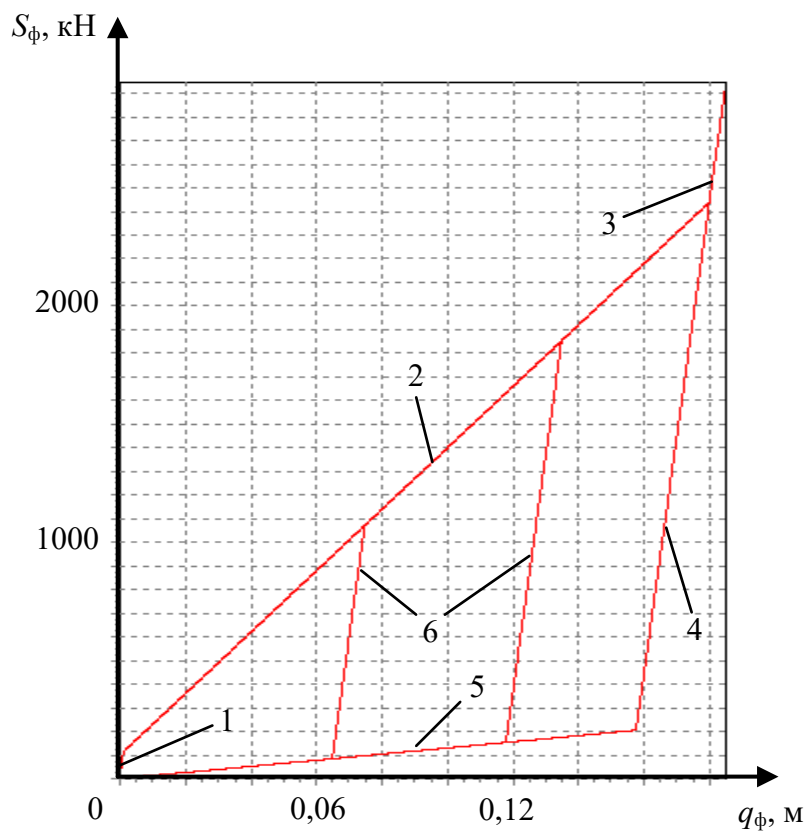


Рис. 2. График расчетной силовой характеристики модели межвагонной связи, оборудованной поглощающими аппаратами типа Ш-2-В

S_{ki} — сила в момент перехода от режима нагрузки к режиму разгрузки поглощающего аппарата (и наоборот);

Δ_i — величина деформаций поглощающих аппаратов, при которой поглощающие аппараты закрываются (максимальный ход обоих аппаратов);

t — текущее время;

h — шаг интегрирования по времени;

S_0 — сила начальной затяжки поглощающего аппарата;

k_{ni} — коэффициент жесткости аппарата на ветви нагружения;

k_{pi} — то же, на ветви разгружения;

k_{ki} — коэффициент жесткости кузовов экипажей;

β — коэффициент вязкого сопротивления при деформации кузовов экипажей;

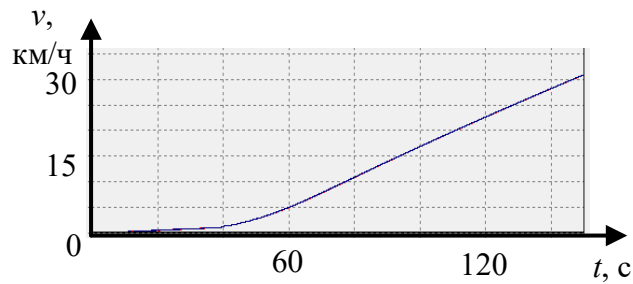
η — коэффициент рассеивания энергии при работе поглощающих аппаратов.

Общий вид характеристик межвагонной связи, описываемых этой системой уравнений, приведен на рис. 1.

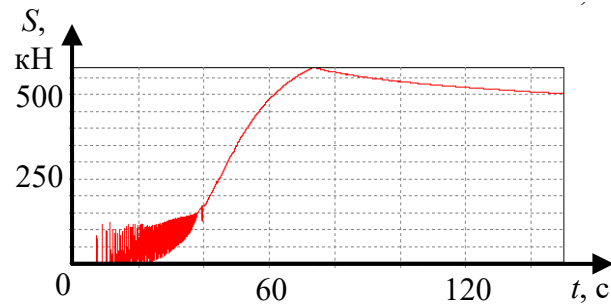
На рис. 2 приведена расчетная силовая характеристика модели межвагонной связи, оборудованной поглощающими аппаратами типа Ш-2-В, полученная с использованием имитационной модели, реализующей систему уравнений (1) — (6).

Рассмотрим полученную силовую характеристику межвагонной связи при работе на растяжение (рис. 2, цикл полной разгрузки и нагрузки). Примем, что начальная деформация связи равна нулю, а деформация связи при растяжении положительна. По мере увеличения деформации межвагонной связи происходит выбор зазора в автосцепках (начальный зазор примем равным 65 мм). Поэтому при величине деформации, равной 65 мм, зазор полностью выбран и в межвагонной связи появляется продольная растягивающая сила. Поскольку поглощающие аппараты имеют начальную затяжку 100 кН, в начале силовой характеристики (участок 1, до значения $S = 130$ кН) происходит только деформация кузовов экипажей. Крутизна силовой характеристики, определяемая жесткостью кузовов, будет достаточно велика. Как только величина продольной силы несколько превысит величину начальной затяжки аппарата, начинается деформация поглощающего аппарата (участок 2). При этом крутизна силовой характеристики уменьшается, поскольку жесткость поглощающих аппаратов значительно меньше жесткости кузовов. Когда величина деформации аппаратов составит 180 мм (а межвагонной связи — 245 мм), произойдет закрытие поглощающих аппаратов. С этого момента при дальнейшем нагружении происходит только деформация кузовов экипажей (участок 3). Крутизна силовой характеристики снова возрастает.

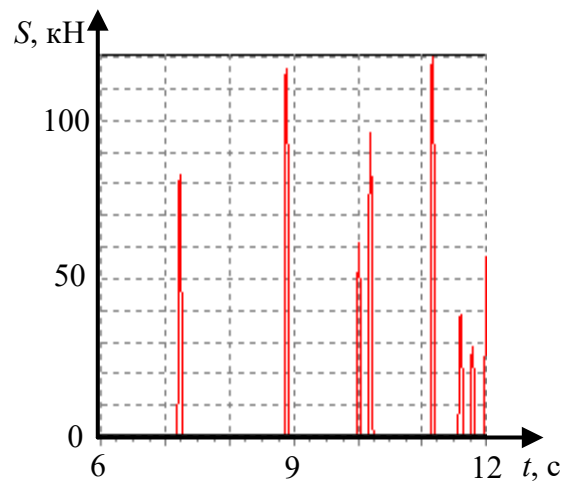
При разгрузке межвагонной связи величина ее деформации уменьшается. Сначала происходит только разгрузка кузовов экипажей (участок 4), при этом незначительное уменьшение деформации аппарата соответствует значительному уменьшению продольной силы. Со значения $S = 350$ кН в работу вступают и поглощающие аппараты, поэтому крутизна силовой характеристики резко уменьшается



а



б



в

Рис. 3. График зависимости скорости движения моделируемого поезда от времени (а), графики зависимости величины продольной силы в первом межвагонном соединении поезда от времени (б, в), полученные с использованием модели межвагонной связи с аппаратами типа Ш-2-В

(участок 5). При дальнейшем разгрузении продольная сила уменьшается по ветви разгрузки до нуля. Линиями б показаны переходы от нагрузки к разгрузке аппаратов и, наоборот, при неполном разгрузении (нагрузении) аппаратов. В данной модели этот переход также происходит с учетом жесткости кузовов экипажей.

На рис. 3, б приведен график зависимости от времени продольной силы, возникающей в автосцепке за локомотивом при трогании поезда, оборудованного поглощающими аппаратами с такой характеристикой. На рис. 3, в также показано

изменение этой силы в интервале времени 6–12 с. График зависимости скорости движения поезда от времени приведен на рис. 3, а. Моделировалось трогание с места поезда массой 6390 т, состоящего из электровоза массой 180 тонн и 71 вагона массой 90 тонн каждый. Как видно из рис. 3, при трогании поезда в нем возникают продольные колебания, при этом величина продольной силы в автосцепке за локомотивом достигает 130 кН. К моменту времени 40 с поезд полностью растянут и продольные колебания затухают. По мере увеличения силы тяги продольная сила в первой межвагонной связи также возрастает (до значения 580 кН), после чего несколько уменьшается из-за уменьшения силы тяги.

Следует отметить, что данная модель поглощающего аппарата позволяет учитывать не только деформации межвагонных связей, но и деформации кузовов экипажей, а также гашение возникающих в поезде продольных сил за счет вязкого сопротивления деформированию конструкции экипажей. В то же время эта модель не учитывает особенности силовой характеристики современных конструкций упруго-фрикционных поглощающих аппаратов, оборудованных дополнительными фрикционными элементами — подвижными фрикционными пластинами. Эти пластины начинают перемещаться и создавать дополнительное трение только при определенной степени деформации аппарата, поэтому ветви нагружения и разгрузки силовой характеристики таких аппаратов являются нелинейными и имеют два участка с различной жесткостью [11]. При этом участок с меньшей крутизной (и, следовательно, с меньшей жесткостью) соответствует деформации аппарата, при которой подвижные фрикционные пластины не работают, а участок с большей крутизной (и, следовательно, с большей жесткостью) — соответствует деформации аппарата, при которой вступают в работу подвижные фрикционные пластины, создавая дополнительное трение.

Особенности работы фрикционного поглощающего аппарата с дополнительными фрикционными элементами учитывает модель межвагонной связи, рассмотренная в [12]. Величина продольной силы в каждой межвагонной связи и величина деформации поглощающих аппаратов x_i определяются из выражений, аналогичных (3) и (4).

При нагружении (если $q_i \geq 0$) величина силы, возникающей в поглощающих аппаратах, определяется выражениями (8):

$$R_i = \begin{cases} Y_B + \frac{Y_C - Y_B}{x_C} \cdot x, & \text{если } x \leq x_C \\ Y_C + \frac{Y_D - Y_C}{x_D - x_C} (x - x_C), & \text{если } (x > x_C) \wedge (x \leq x_D). \\ Y_B + k_k (x - x_D), & \text{если } x > x_D \end{cases} \quad (8)$$

При разгрузке (если $q_i < 0$) величина силы, возникающей в поглощающих аппаратах, определяется выражениями (9):

$$R_i = \begin{cases} Y_G + \frac{Y_F - Y_G}{x_F} \cdot x, & \text{если } x \leq x_F \\ Y_F + \frac{Y_E - Y_F}{x_D - x_F} (x - x_F), & \text{если } (x > x_F) \wedge (x \leq x_D) \\ Y_D + k_k (x - x_D), & \text{если } x > x_D \end{cases} \quad (9)$$

где R_i — продольная сила, возникающая в поглощающих аппаратах межвагонного соединения;

Y_B — величина начальной затяжки поглощающего аппарата при нагружении, $Y_B = 100$ кН;

Y_C — величина продольной силы в режиме нагружения, при которой вступают в работу дополнительные фрикционные элементы;

x_C — величина деформации аппаратов в режиме нагружения, соответствующая силе Y_C , $x_C = 50$ мм;

Y_D — величина продольной силы, при которой закрываются поглощающие аппараты;

x_D — величина деформации аппаратов в режиме нагружения, соответствующая силе Y_D , $x_D = 220$ мм;

Y_G — величина начальной затяжки поглощающего аппарата при разгрузке, $Y_G = 50$ кН;

Y_F — величина продольной силы в режиме разгрузки, при которой вступают в работу дополнительные фрикционные элементы;

x_F — величина деформации аппаратов в режиме разгрузки, соответствующая силе Y_F , $x_F = 210$ мм.

Общий вид силовой характеристики межвагонной связи, описываемой этой системой уравнений, приведен на рис. 4.

На рис. 5 приведена расчетная силовая характеристика, полученная с использованием данной модели межвагонной связи. На рис. 6, а приведен график зависимости от времени продольной силы, возникающей в первой межвагонной связи поезда, в процессе трогания поезда, оборудованного межвагонными связями с такой характеристикой. На рис. 6, б также показано изменение этой силы в интервале времени 6–12 с. Составность поезда аналогична рассмотренной выше.

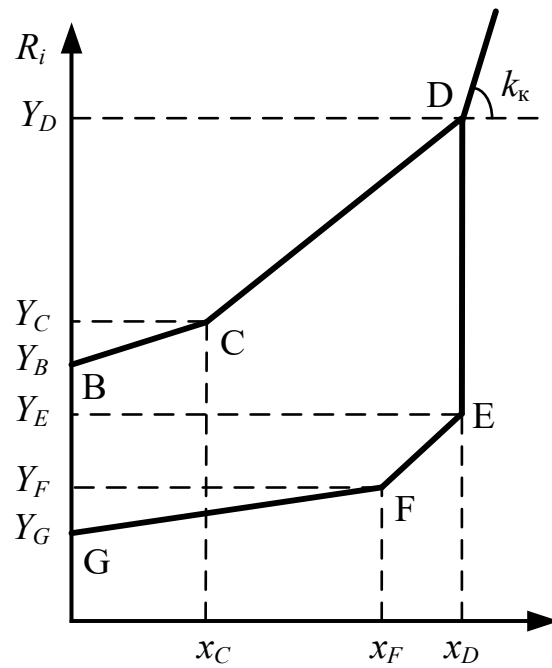


Рис. 4. Общий вид силовой характеристики модели межвагонной связи с поглощающими аппаратами типа ПМК-110

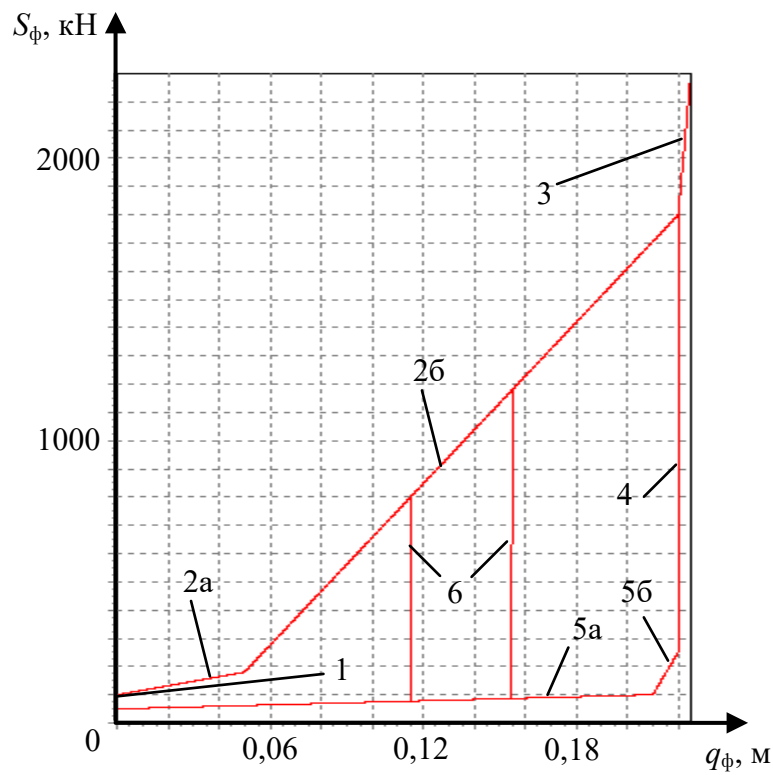


Рис. 5. График расчетной силовой характеристики модели межвагонной связи, оборудованной поглощающими аппаратами типа ПМК-110

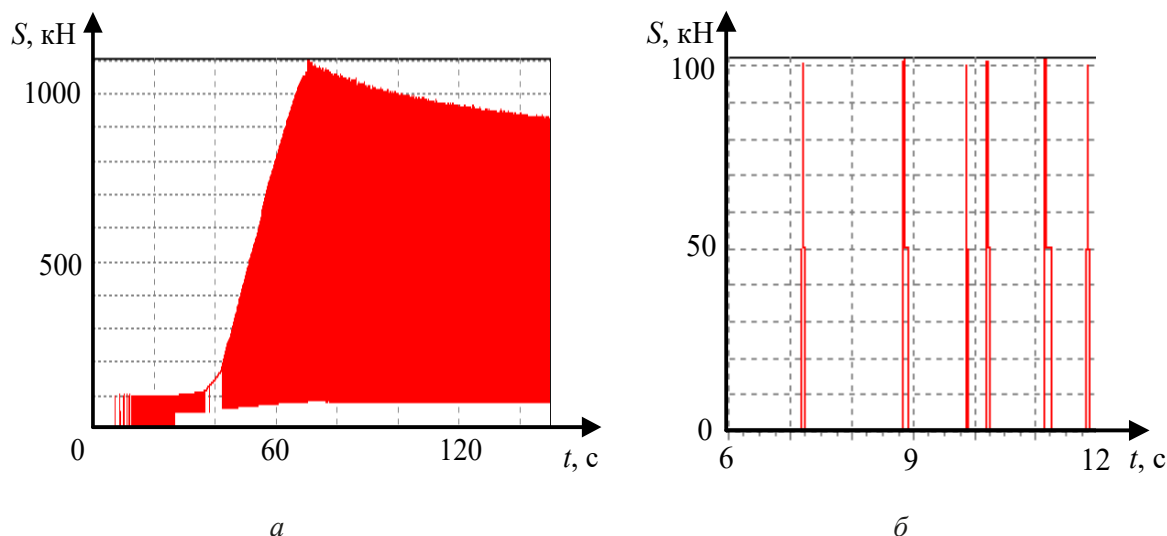


Рис. 6. Графики зависимости величины продольной силы в первом межвагонном соединении поезда от времени, полученные с использованием математической модели межвагонной связи, оборудованной поглощающими аппаратами типа ПМК-110

Анализ рис. 5 показывает, что полученная силовая характеристика данной модели полностью совпадает с представленной выше теоретической. Данная модель учитывает особенности кусочно-линейной силовой характеристики современных конструкций поглощающих аппаратов. В то же время эта модель не учитывает жесткость кузовов экипажей при переходе от режима нагрузки к режиму разгрузки (и наоборот). Переход с учетом жесткости кузовов экипажей оказывает значительное влияние на протекание переходных процессов в поезде, что подтверждается сравнительным анализом рис. 3 и 6. Так, на рис. 6 в диапазоне времени 65–150 с при переходе поглощающих аппаратов от режима нагрузки к режиму разгрузки и наоборот происходит мгновенное изменение величины продольной силы в диапазоне от 50–100 до 900–1000 кН. В моделях межвагонных связей, учитывающих жесткость кузовов экипажей при переходе от нагружения к разгрузению, такого процесса не наблюдается (что подтверждается рис. 3, где величина продольной силы в установившемся режиме не имеет высокочастотных колебаний).

Поэтому при изучении продольной динамики поезда с упруго-фрикционными поглощающими аппаратами целесообразно использовать модель межвагонной связи, учитывающую как особенности силовых характеристик аппаратов, так и жесткость кузовов экипажей при переходе от нагружения к разгрузению. В качестве исходной выберем модель межвагонной связи, рассмотренную в [1] и доработанную с целью учета особенностей конструкции современных поглощающих аппаратов.

В данной модели величины продольной силы и деформации поглощающих аппаратов определяются аналогично из выражений (3) и (4). Уравнения (5) и (6) заменяются доработанными, учитывающими особенности работы пружин современных поглощающих аппаратов:

$$S_{\Phi i} = \begin{cases} \min \{S_{\text{н}i}; S_{\text{к}i}\}, \text{если } (q_{\Phi i} < \Delta_i) \wedge (q_{\Phi i}(t) \geq q_{\Phi i}(t-h)) \\ \max \{S_{\text{р}i}; S_{\text{к}i}\}, \text{если } (q_{\Phi i} < \Delta_i) \wedge (q_{\Phi i}(t) < q_{\Phi i}(t-h)). \\ S_{\text{к}i}, \text{если } (q_{\Phi i} \geq \Delta_i) \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} S_{\text{н}i} = S_{01i} + k_{\text{н}1i}q_{\Phi i}, \text{если } (q_{\Phi i} < \Delta_{1i}) \\ S_{\text{н}i} = S_{01i} + k_{\text{н}1i}\Delta_{1i} + k_{\text{н}2i}q_{\Phi i}(q_{\Phi i} - \Delta_{1i}), \text{если } (q_{\Phi i} \geq \Delta_{1i}) \wedge (q_{\Phi i} < \Delta_i) \\ S_{\text{р}i} = S_{02i} + k_{\text{р}1i}q_{\Phi i}, \text{если } (q_{\Phi i} < \Delta_{2i}) \\ S_{\text{р}i} = S_{02i} + k_{\text{р}1i}\Delta_{2i} + k_{\text{р}2i}q_{\Phi i}(q_{\Phi i} - \Delta_{2i}), \text{если } (q_{\Phi i} \geq \Delta_{2i}) \wedge (q_{\Phi i} < \Delta_i). \\ S_{\text{к}i} = S_i + k_{\text{к}i}(q_{\Phi i}(t) - q_{\Phi i}(t-h)) + \beta_i \dot{q}_i \text{sign } q_i \\ S_i = S_{\text{н}i}(t-h) \vee S_{\text{р}i}(t-h), \text{если } S_{\delta_i}(t-h) = S_{\text{н}i}(t-h) \vee S_{\text{р}i}(t-h) \\ \text{иначе } S_i = S_{\Phi i}(t-h) - \beta_i \dot{q}_i(t-h) \text{sign } q_i(t-h) \end{cases} \quad (11)$$

где Δ_{1i} — сумма деформаций поглощающих аппаратов, при которой вступают в работу дополнительные фрикционные элементы каждого аппарата при нагрузке;

Δ_{2i} — сумма деформаций поглощающих аппаратов, при которой вступают в работу дополнительные фрикционные элементы каждого аппарата при разгрузке;

$k_{\text{н}1i}$ и $k_{\text{н}2i}$ — коэффициенты жесткости при работе одной и двух пружин аппарата на ветви нагружения;

$k_{\text{р}1i}$ и $k_{\text{р}2i}$ — то же, на ветви разгружения;

S_{01i} и S_{02i} — сила начальной затяжки поглощающего аппарата на ветвях нагружения и разгружения.

Общий вид силовой характеристики межвагонной связи, описываемой этой системой уравнений, приведен на рис. 7.

Расчетная силовая характеристика усовершенствованной математической модели межвагонной связи, оборудованной поглощающими аппаратами типа ПМК-110, приведена на рис. 8. На рис. 9, а приведен график зависимости от времени продольной силы, возникающей в первой межвагонной связи при трогании поезда, оборудованного поглощающими аппаратами с уточненной характеристикой. На рис. 9, б также показано изменение этой силы в интервале времени 6–12 с. По сравнению с поездом, оборудованным поглощающими аппаратами типа Ш-2-В (рис. 3), продольные силы в поезде с аппаратами ПМК-110 несколько уменьшаются, а затухание продольных колебаний происходит быстрее и практически завершается к моменту времени 35 с.

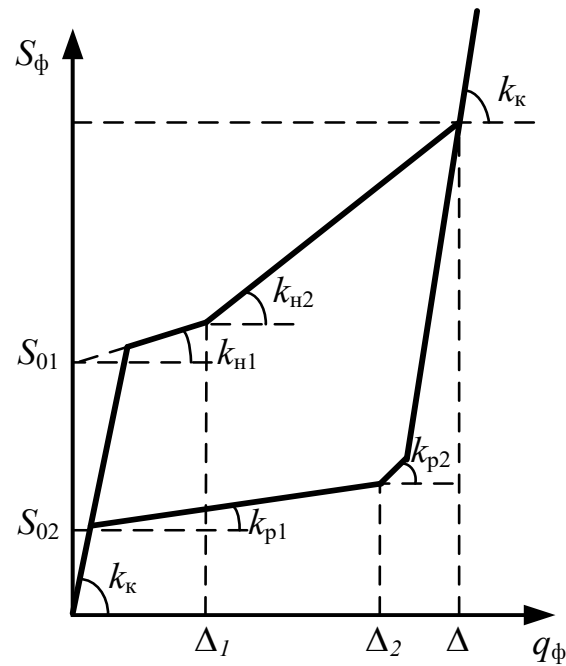


Рис. 7. Общий вид силовой характеристики усовершенствованной модели межвагонной связи с поглощающими аппаратами типа ПМК-110

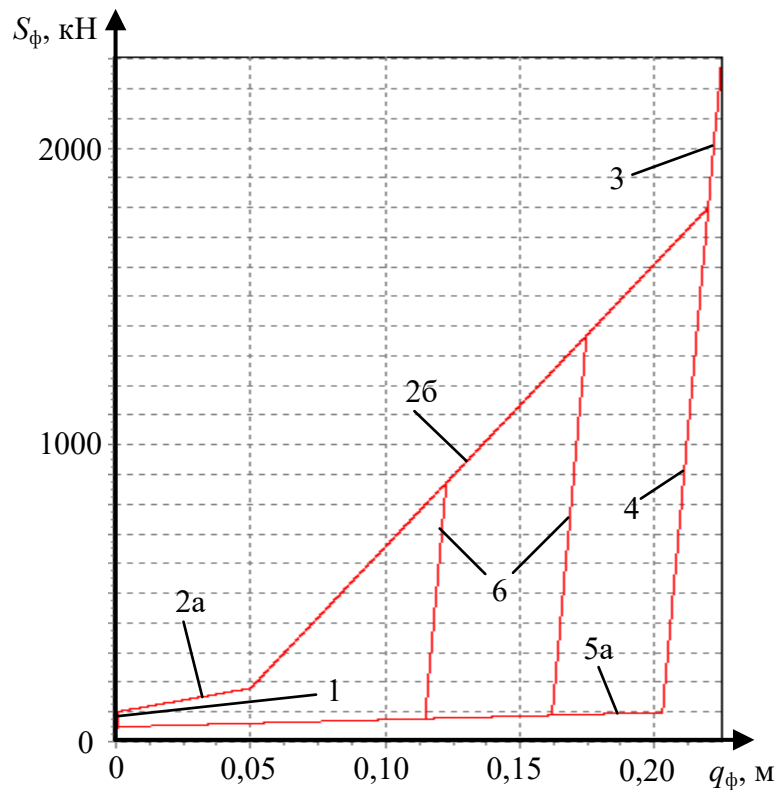


Рис. 8. График расчетной силовой характеристики усовершенствованной модели межвагонной связи, оборудованной поглощающими аппаратами типа ПМК-110

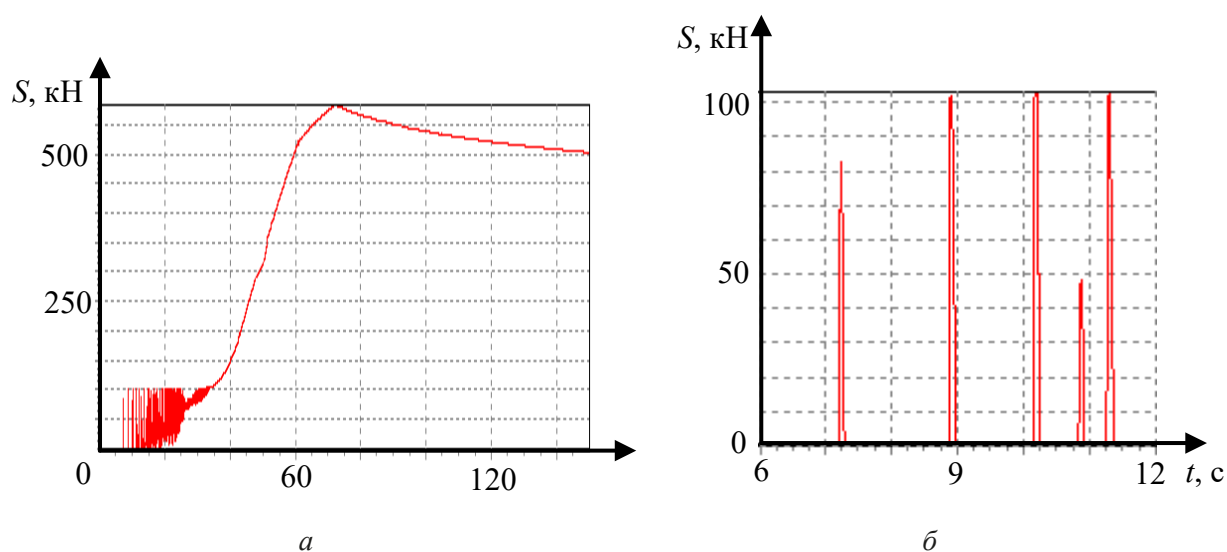


Рис. 9. Графики зависимости величины продольной силы в первом межвагонном соединении поезда от времени, полученные с использованием усовершенствованной математической модели межвагонной связи, оборудованной поглощающими аппаратами типа ПМК-110

Из анализа графика силовой характеристики усовершенствованной модели межвагонной связи следует, что данная модель, по сравнению с вышерассмотренными, учитывает как особенности силовой характеристики пружинно-фрикционного поглощающего аппарата современной конструкции, так и наличие деформаций кузовов экипажей при переходе к ветви разгрузки либо нагружения. В ходе пробных расчетов эта модель показывает удовлетворительные результаты.

Таким образом, усовершенствованная модель межвагонной связи, оборудованной пружинно-фрикционными поглощающими аппаратами с дополнительными фрикционными элементами, дает более достоверные результаты расчетов применительно ко всем режимам нагружения и может быть использована при исследованиях продольных колебаний поезда.

Библиографический список

1. Блохин Е. П. Динамика поезда (нестационарные продольные колебания): учебное пособие / Е. П. Блохин, Л. А. Манашкин. — М.: Транспорт, 1982. — 222 с.
2. Патент № 2265874 Российская Федерация, МПК G05B 17/00. Способ определения максимальной скорости и способ регулирования скорости движения поезда по участку / Л. А. Мугинштейн, В. М. Абрамов, М. С. Пястик и др. — Заявл. 17.04.2003; опубл. 10.12.2005. — Бюл. № 34.
3. Лисицын А. Л. Нестационарные режимы тяги (Тяговое обеспечение перевозочного процесса): монография / А. Л. Лисицын, Л. А. Мугинштейн; под ред. Г. И. Нарских, И. К. Петушковой. — М.: Интекст, 1996. — 159 с.

4. Блохин Е. П. Расчеты и испытания тяжеловесных поездов: монография / Е. П. Блохин, Л. А. Манашкин, Е. Л. Стамблер и др.; под ред. Е. П. Блохина. — М.: Транспорт, 1986. — 263 с.
5. Жуковский Н. Е. Полное собрание сочинений: в 10 т. Т. 8. Теория упругости. Железные дороги. Автомобили / Н. Е. Жуковский; под ред. проф. А. П. Котельникова. — Москва — Ленинград: ОНТИ НКТП СССР, Главная редакция авиационной литературы, 1937. — 292 с.
6. Лазарян В. А. Исследование усилий, возникающих в переходных режимах движения в стержнях с различными упругими несовершенствами / В. А. Лазарян // Сборник научных трудов ДИИТ. — 1956. — Вып. 25. — С. 5–50.
7. Лазарян В. А. Совершенствование норм проектирования железных дорог: монография / В. А. Лазарян, Е. П. Блохин. — М.: Транспорт, 1974. — 150 с.
8. Вершинский С. В. Динамика вагона: учебное пособие / С. В. Вершинский, В. Н. Данилов, В. Д. Хусидов; под ред. С. В. Вершинского. — 3-е изд. перераб. и доп. — М.: Транспорт, 1991. — 360 с.
9. Гребенюк П. Т. Метод исследования процессов распространения возмущений в сверхдлинных и соединенных поездах / П. Т. Гребенюк, Н. А. Панькин, А. М. Филимонов // Вестник ВНИИЖТ. — 1977. — № 1. — С. 1–4.
10. Галеев А. У. Вопросы механики поезда: монография / Галеев А. У., Першиц Ю. И. — М.: Трансжелдориздат, 1958. — 232 с.
11. Кеглин Б. Г. Повышение эффективности комбинированных фрикционных поглощающих аппаратов на базе ПМК-110А / Б. Г. Кеглин и др. // Наука и прогресс транспорта. Вестник ДИИТ. — 2004. — № 5. — С. 85–95.
12. Беспалько С. В. Разработка и анализ моделей повреждающих воздействий на котлы цистерн для перевозки криогенных продуктов: специальность 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация»: автореф. дисс. ... д-ра техн. наук / С. В. Беспалько; Московский государственный университет путей сообщения. — М., 2000.

Дата поступления: 01.05.2023

Решение о публикации: 20.05.2023

Контактная информация:

БЕСПАЛЬКО Сергей Валерьевич — д-р техн. наук, проф.; besp-alco@mail.ru

ЖУХИН Никита Олегович — аспирант; rzd1997@mail.ru

ПУДОВИКОВ Олег Евгеньевич — д-р техн. наук, доц.; oleger@mail.ru

Refinement of the Mathematical Model of Inter-Car Coupling with Spring-Friction Absorbing Devices for the Study of Longitudinal Vibrations of a Freight Train

S. V. Bepal'ko, N. O. Zhukhin, O. E. Pudovikov

Russian University of Transport RUT (MIIT), 9/9, Obraztsova str., Moscow, 127994, Russian Federation

For citation: Bepal'ko S. V., Zhukhin N. O., Pudovikov O. E. Refinement of the Mathematical Model of Inter-Car Coupling with Spring-Friction Absorbing Devices for the Study of Longitudinal Vibrations of a Freight Train. *Bulletin of scientific research results*, 2023, iss. 2, pp. 54–70. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2023-2-54-70

Summary

Purpose: To develop an improved model of inter-car coupling equipped with spring-friction absorbing devices of the PMK-110 type. This model should take into account both the features of the power characteristics of absorbing devices of this type and the deformation of the carriage bodies, as well as the energy dissipation of longitudinal forces arising in the train due to the viscous resistance to deformation of the car structure.

Methods: Methods of analysis, mathematical and simulation modeling. **Results:** Based on two existing mathematical models of inter-car couplings with spring-friction absorbing devices, an improved model of inter-car coupling equipped with spring-friction absorbing devices of the PMK-110 type has been developed. It is shown that this model increases the reliability of calculating the values of the longitudinal forces arising in the absorbing devices of the intercar couplings of the train. **Practical significance:** The proposed model of inter-car coupling can be used in studies of longitudinal vibrations of a train, since it gives more reliable calculation results for all loading modes.

Keywords: Mathematical model of the train, mathematical model of the absorbing device, inter-car couplings of the train, longitudinal forces in the train, longitudinal train dynamics, absorbing device.

References

1. Blochin E. P., Manashkin L. A., *Dinamika poyezda* [Train dynamics]. Moscow: Transport Publ., 1982, 222 p. (In Russian)
2. Muginstein L. A., Abramov V. M., Pyasik M. S. et al. *Sposob opredeleniya maksimal'noy skorosti i sposob regulirovaniya skorosti dvizheniya poezda po uchastku* [The method for determining the maximum speed and the method for regulating the speed of the train along the section]. Patent RF, no. 2265874, 2003. (In Russian)
3. Lisitsyn A. L., Muginstein L. A.; edited by Narskikh G. I., Petushkova I. K. *Nestatsionarnye rezhimy tyagi (Tyagovoe obespechenie perevozchnogo protsessa): monografiya* [Non-stationary traction modes (Traction support of the transportation process): monograph]. Moscow: Intext Publ., 1996, 159 p. (In Russian)
4. Blochin E. P., Manashkin L. A., Stambler E. L. *Rascheti i ispitania tyajelovesnih poezdov* [Calculations and tests of heavy trains]. Moscow: Transport Publ., 1986, 263 p. (In Russian)
5. Zhukovsky N. E. *Polnoe sobranie sochineniy: v 10 t. T. 8. Teoriya uprugosti. Zheleznye dorogi. Avtomobili* [Complete works: in 10 volumes, vol. 8. Theory of elasticity. Railways. Cars].

Moscow — Leningrad: ONTI NKTP of the USSR, Main aviation literature Publ., 1937, 292 p. (In Russian)

6. Lazaryan V. A. Issledovanie usilii, vznikayushih v perehodnih rejimakh dvizhenia v sterzhiah s razlichnymi upugimi nesovershenstvami [Investigation of forces arising in transient modes of motion in rods with various elastic imperfections]. *Sbornik nauchnih trudov DIIT* [Bulletin of scientific papers of the Dnepropetrovsk Institute of Transport Engineers]. 1956, Iss. 25, pp. 5–50. (In Russian)

7. Lazaryan V. A., Blokhin E. P. *Sovershestvovanie norm proektirovaniya jeleznykh dorog: monografiya* [Improvement of railway design standards: monograph]. Moscow: Transport Publ., 1974, 150 p. (In Russian)

8. Vershinskii S. V., Danilov V. N., Husidov V. D. *Dinamica vagona: uchebnoe posobie* [The dynamics of the car: textbook]. Moscow: Transport Publ., 1991, 360 p. (In Russian)

9. Grebenyuk P. T., Pankin N. A., Filimonov A. M. Method issledovaniya processov raprostraneniya vozmusheniya v sverhdlinnykh i soedinennykh poezdakh [Method of investigation of the processes of propagation of disturbances in super-long and connected trains]. *Vestnik VNIIZhT* [Bulletin of the All-Russian Research Institute of Railway Transport]. 1977, Iss. 1, pp. 1–4. (In Russian)

10. Galeev A. U., Pershits Yu. I. *Voprosi mekhaniki porezda: monografiya* [Questions of train mechanics: monograph]. Moscow: Transzheldorizdat Publ., 1958, 232 p. (In Russian)

11. Keglin B. G. et al. Povishenie effektivnosti kombinirovannykh fictionnykh pogloshayushih apparatov na baze PMK-110A [Improving the efficiency of combined friction absorbing devices based on PMK-110A]. *Sbornik nauchnih trudov DIIT* [Science and progress of transport. Bulletin of scientific papers of the Dnepropetrovsk Institute of Transport Engineers]. 2004, Iss. 5, pp. 85–95. (In Russian)

12. Bespal'ko S. V. *Razrabotka i analiz modeley povrezhdayushchikh vozdeystviy na kotly tsistern dlya perevozki kriogennykh produktov: spetsial'nost' 05.22.07 "Podvizhnoy sostav zheleznykh dorog, tyaga poezdov i elektrifikatsiya: avtoref. diss. ... d-ra tekhn. nauk"* [Development and analysis of models of damaging effects on the boilers of tanks for the transportation of cryogenic products: specialty 05.22.07 "Railway rolling stock, train traction and electrification: author. diss." ... Dr. tech. Sciences]. Moscow: Moskovskiy gosudarstvennyy universitet putey soobshcheniya Publ., 2000. (In Russian)

Received: May 01, 2023

Accepted: May 20, 2023

Author's information:

Sergey V. BESPAL'KO — Dr. Sci. in Engineering, Professor; besp-alco@yandex.ru

Nikita O. ZHUKHIN — Postgraduate Student; rzd1997@mail.ru

Oleg E. PUDOVNIKOV — Dr. Sci. in Engineering, Associate Professor; olegep@yandex.ru

ПРОБЛЕМАТИКА ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

УДК 625.721

Анализ эффективности развития сети автомобильных дорог

П. А. Пегин, Д. М. Немчинов, А. А. Ильин

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

Для цитирования: Пегин П. А., Немчинов Д. М., Ильин А. А. Анализ эффективности развития сети автомобильных дорог // Бюллетень результатов научных исследований. — 2023. — Вып. 2. — С. 71–80. DOI: 10.20295/2223-9987-2023-2-71-80

Аннотация

Цель: Выявить влияние на уровень социально-экономического развития как отдельных регионов, так и страны в целом следующих факторов: административно-функциональной принадлежности автомобильных дорог, транспортно-эксплуатационных показателей автомобильных дорог и состояния дорожного хозяйства. **Методы:** Анализ и обобщение результатов о влиянии автомобильных дорог на уровень социально экономического-развития государства. **Результаты:** Разработан блок схемы, показывающий воздействие автомобильных дорог на экономику страны, уровень ее обороноспособности, благосостояния и социальных возможностей ее жителей. **Практическая значимость:** Полученные результаты можно использовать для улучшения значений макро- и микроэкономических показателей регионов.

Ключевые слова: Сеть автомобильных дорог, дороги регионального значения, логистика пассажирских и грузовых перевозок, транспортная инфраструктура, модальные и интермодальные транспортные коридоры.

Введение

Высокая экономическая эффективность строительства автомобильных дорог в Российской Федерации и других странах мира является общеизвестным фактом. Ежегодно Росавтодор РФ публикует соответствующую информацию по этому вопросу, но в основном в чисто «дорожном» аспекте. Однако еще в 2003 году была опубликована так называемая спираль автомобилизации, указывающая на влияние дорог на экономику страны и жизнь населения.

В настоящем исследовании сделана попытка осветить этот вопрос более широко, рассматривая роль дорожного хозяйства в жизни государства и общества.

Нововведения в области развития страны и регионов

Все нововведения можно разделить на несколько групп по уровню новизны, продолжительности и масштабам их последствий. По уровню новизны выделим новые технические решения в существующих отраслях народного хозяйства, могущие: 1) повысить производительность труда на предприятии (группе предприятий); 2) облегчить труд; 3) явиться основой новых технологий, новых технических и других направлений деятельности. Объекты первой и второй групп нововведений, как правило, представляют собой образцы новой техники, усовершенствования существующих технических решений (более или менее крупные, от образцов конструктивно новых машин и механизмов до частичного совершенствования существующих конструкций и основанных на их использовании технологий). Объекты третьей группы нововведений представляют собой проекты, последствия которых трудно или даже невозможно предвидеть. Например, кто мог предвидеть и оценить последствия появления в первой половине XX века (даже в 30-х годах прошлого века) вычислительных машин? Или открытий в области генетики (вплоть до клонирования живых организмов)?

К последнему разряду нововведений следует отнести и строительство сети автомобильных дорог. Хотя сами по себе автомобильные дороги ничего не производят, но они, как, например, вычислительная техника, которая стимулирует и обеспечивает развитие производственных процессов отраслей народного хозяйства, влияют на уровень организации производства, социальное и экономическое развитие на территории их строительства, обеспечивая более высокий уровень производства и жизни населения [1–10]. Поэтому экономическую оценку эффективности можно проводить лишь по частным показателям, указывающим общий реальный эффект от строительства новой или реконструкции существующей автомобильной дороги, сети дорог.

Влияние показателей дорожной сети на экономические процессы в обществе и государстве

Понятия «эффект», «эффективность» подразумевают оценку суммы многочисленных и разнообразных, положительных и отрицательных воздействий сети автомобильных дорог на окружающую среду обитания, включая хозяйственную деятельность, логистику, социальные аспекты жизни и деятельности, факторы обороны и антитеррора, экологию территории, на которой осуществляются нововведения.

Ранее уже указывалось на широкий спектр воздействия автомобильных дорог на экономику страны, уровень ее обороноспособности, благосостояния

и социальных возможностей ее жителей. В целях детализации покажем это влияние на блок-схемах, включая эффекты влияния на логистику пассажиров и грузов.

Одним из важных показателей положительного эффекта от строительства разветвленной сети автомобильных дорог является наличие дублирующих маршрутов, соответствующих потребительским и транспортно-эксплуатационным качествам: протяжению (прямолинейности), скорости движения, затраченному времени в пути, безопасности дорожного движения и т. п. (рис. 1–3).



Рис. 1. Влияние на экономические процессы в обществе и государстве

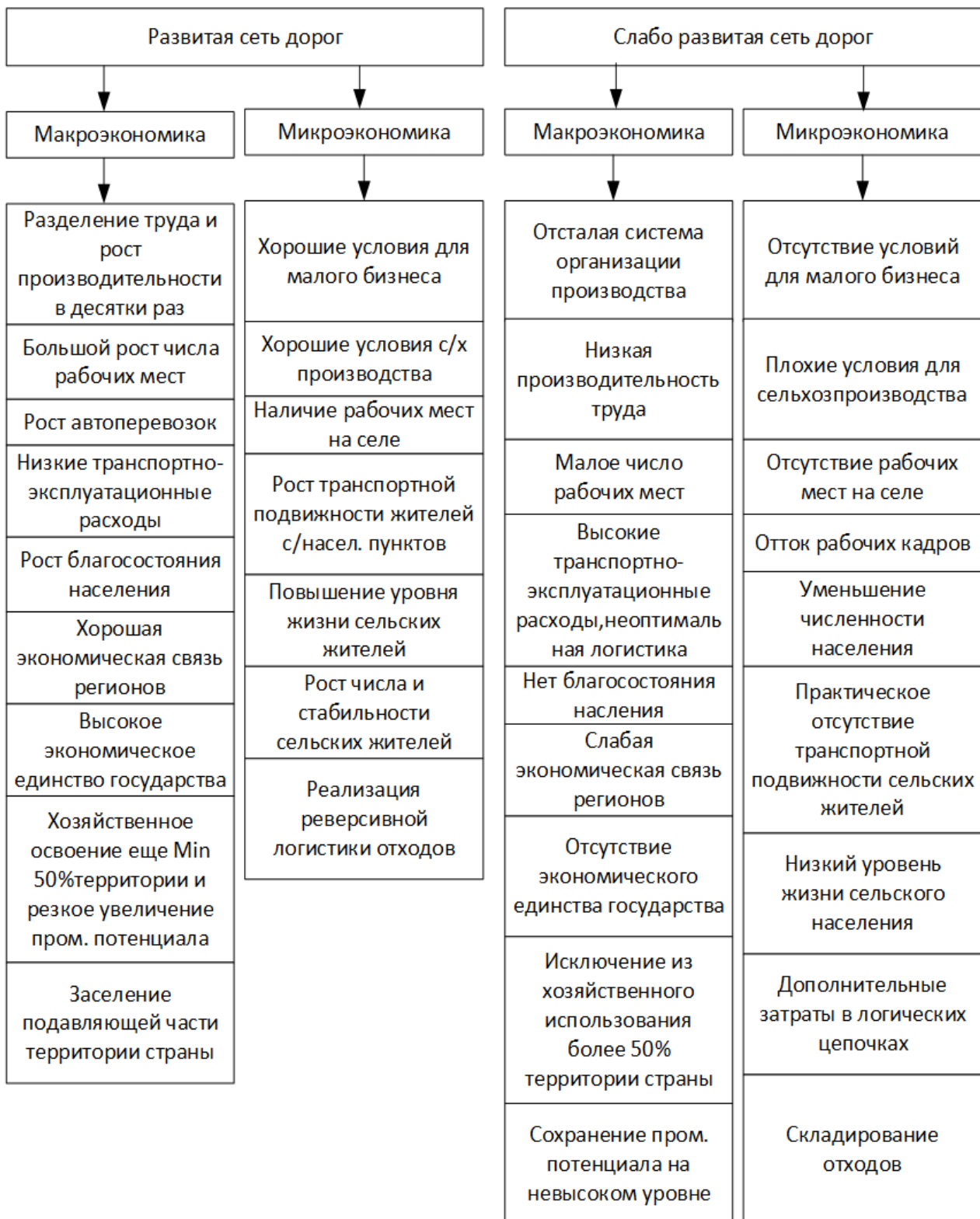


Рис. 2. Общеэкономический эффект (в масштабах макро- и микроэкономик)

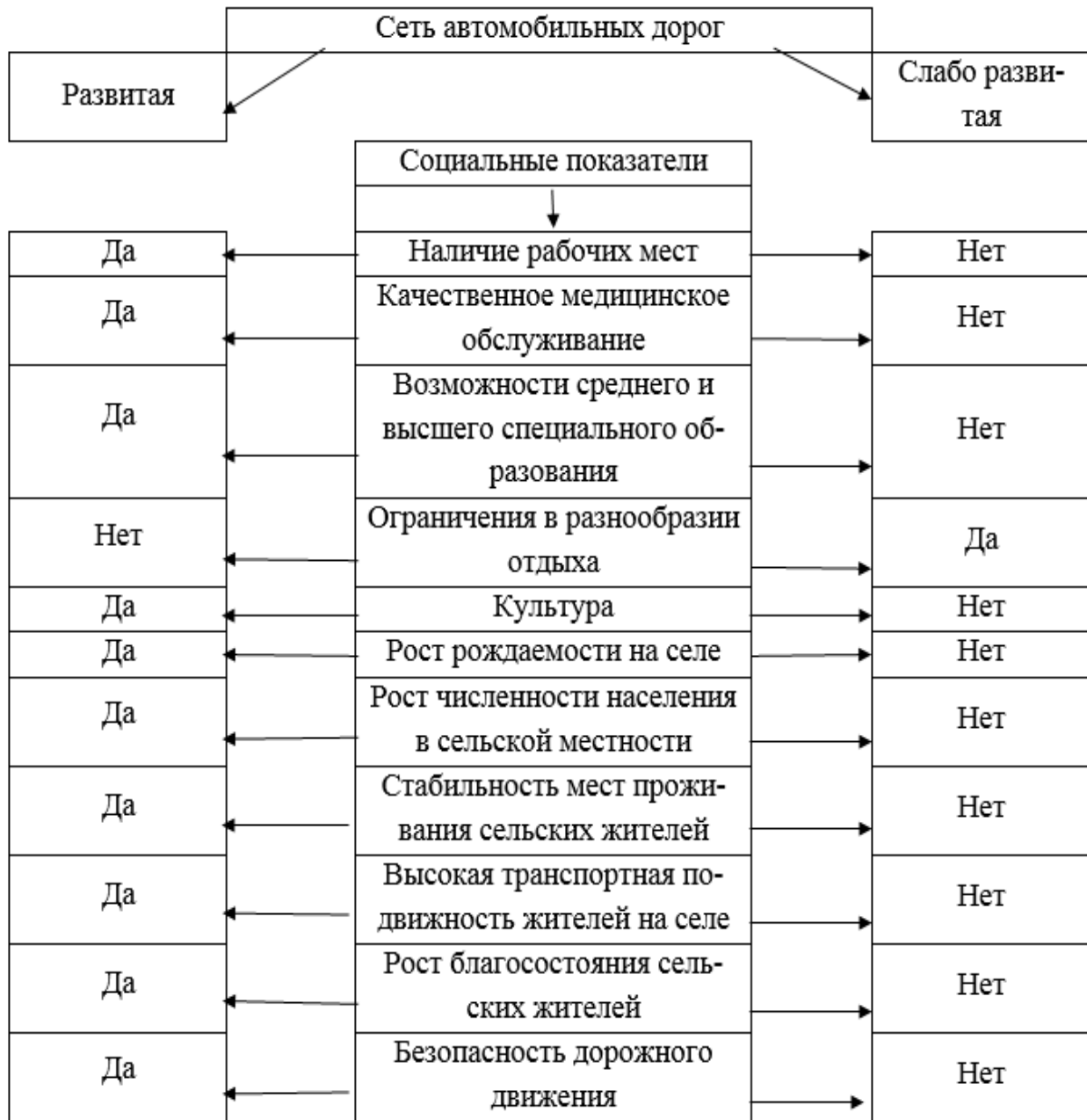


Рис. 3. Решение социальных проблем населения

Наличие в составе сети автомобильных дорог одной пары сопоставимых маршрутов для каждого возможного направления дает возможность уменьшить время передвижения по дублирующему маршруту в случае проведения дорожно-ремонтных работ, наличия дорожно-транспортных происшествий и т. д. Наличие реальных альтернативных маршрутов с сопоставимыми условиями доставки грузов и пассажиров позволяет перераспределять транспортные потоки по автодорожной сети без возникновения экономических издержек при проведении работ по ремонту и реконструкции. Наличие альтернативных маршрутов в сети автомобильных дорог обеспечивает антитеррористическую устойчивость всей системы

и, соответственно, транспортную безопасность [11–21]. Наличие альтернативных маршрутов является принципиальным условием построения надежных, устойчивых к внешним воздействиям (в том числе в части обеспечения транспортной безопасности), логистических цепочек, исключения на основе оптимальной логистики излишних складских затрат.

Вторым положительным фактором принципа деления сети дорог по функциональному назначению (на дороги национального, регионального и местного значения) и наличия дублирующих маршрутов движения является более эффективный охват транспортными услугами всей территории. Происходит увеличение площади территории, экономически эффективной для хозяйственного развития. Это обеспечивает эффективную логистику доставки грузов до конечного потребителя.

Результаты совершенствования сети автомобильных дорог

Совершенствование транспортной инфраструктуры (модальных и интермодальных транспортных коридоров) и сопоставимое сокращение транспортных расходов имеет два основных экономических последствия:

1. Производство располагается там, где производственные издержки минимальны, и это позволяет эффективнее использовать конкурентные преимущества. Результат труда доставляется потребителям в любые районы страны.

2. Развитие экономики, обусловленное ростом масштаба территории, — расширяется доступ к более широкому рынку сбыта.

Регионы страны экономически и социально развиты неодинаково. Различие в развитии регионов, по данным статистики, достигает нескольких десятков раз (среди европейских стран — до 10 раз). Строительство сети автомобильных дорог в значительной мере поможет решить проблему экономического отставания.

Библиографический список

1. Бугроменко В. Н. Математическое моделирование влияния дорожной сети на себестоимость продукции и социальные показатели регионов / В. Н. Бугроменко // Труды Первого Всероссийского Дорожного Конгресса. — М.: МАДИ, 2009. — С. 154–157.
2. Василевский Л. И. Транспортная система США: Сравнительный экономический анализ. Соревнование двух систем / Л. И. Василевский. — М.: Изд-во АН СССР, 1963. — 67 с.
3. Гейдт А. А. Стратегическое планирование развития дорожной инфраструктуры в транспортной политике России: автореф. дисс. ... д-ра экон. наук / А. А. Гейдт. — СПб., 2005. — 273 с.
4. Левитин И. Транспорт как условие экономического роста / И. Левитин // Российская Федерация сегодня. — 2008. — № 9, декабрь. — 13 с.

5. Мороз В. Н. Разработка модели оценки эффективности функционирования региональной транспортной сети. МАТ / В. Н. Мороз, Г. Б. Николаев // Отчет о НИР. — СПб.: МАТ, 2002. — 212 с.
6. Немчинов Д. М. Принципы и методы планирования сетей автомобильных дорог / Д. М. Немчинов. — М.: ТЕХПОЛИГРАФЦЕНТР, 2014. — 199 с.
7. Подопригора Н. В. Информационные аспекты системы «участник дорожного движения — транспортное средство — дорога — внешняя среда» / Н. В. Подопригора, П. А. Пегин, С. Н. Доценко // Прогрессивные технологии в транспортных системах: материалы XVI Международной научно-практической конференции. — Оренбург, 2021. — С. 395–402.
8. Пегин П. А. Анализ внешних и внутренних факторов, влияющих на эффективность деятельности транспортного предприятия / П. А. Пегин, В. К. Цуцкарев // Бюллетень результатов научных исследований. — 2021. — № 1. — С. 22–32.
9. Пегин П. А. Повышение эффективности и безопасности эксплуатации автомобильного транспорта на основе увеличения пропускной способности автомагистралей: дисс. ... д-ра техн. наук / П. А. Пегин. — Орел: Орловский государственный технический университет, 2011.
10. Пегин П. А. Математическая модель достаточности сети автомобильных дорог региона / П. А. Пегин, А. А. Ильин, Е. В. Рунев // Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2020: сборник тезисов. — СПб.: Санкт-Петербургский горный университет, 2020. — С. 804–807.
11. Пегин П. А. Особенности транспортного планирования сети муниципальных автомобильных дорог с учетом климатических условий / П. А. Пегин, А. А. Ильин // Вестник гражданских инженеров. — 2019. — № 2(73). — С. 131–135.
12. Положение об интегрированной структуре транспортной сети RIN / Германия, Научно-исследовательское общество по дорогам и транспорту. — Кельн, 2008. — 57 с.
13. Скирковский С. В. Разработка алгоритма и компьютерной программы оптимизации параметров функционирования городского маршрутизированного транспорта / С. В. Скирковский, П. А. Пегин // Вестник гражданских инженеров. — 2017. — № 1 (60). — С. 277–287.
14. Стремление к нулю: высокие задачи и системный подход к безопасности дорожного движения / Международный транспортный форум, 2008. — 32 с.
15. Патент № 2288986 С2 Российская Федерация. Конструкция земляного полотна: № 2004117299/03 / А. И. Ярмолинский, П. А. Пегин, В. А. Ярмолинский.
16. Advancing Sustainable Safety: National Road Safety Outlook for 2005–2020, SWOV Institute for Road Safety Research, 2006.
17. Arterials and Streets Infrastructure and Operations for Mobility, Access, and Community In Metropolitan Chicago, Chicago, USA, January, 2009.
18. Assessing the Feasibility of a National Road Classification, Report to ICSM on National Road Classification Developments, The Intergovernmental Committee of Surveying & Mapping (ICSM) formed the Roads Working Group, Australia & New Zealand (RWG). October 2006.
19. Pegin P. Features transport planning the network of municipal roads in northern region / P. Pegin, A. Ilyin, K. Semenova // Transportation Soil Engineering in Cold Regions. Proceedings of

TRANSOILCOLD 2019. Series: Lecture Notes in Civil Engineering, vol. 49. — Singapore, 2020. — Pp. 397–401.

20. FHWA Urban Boundary and Federal Functional Classification Handbook. Transportation Statistics Office Florida Department of Transportation Tallahassee, Florida, 2003.

21. Highway Functional Classification Concepts, Criteria and Procedures. 2013 Edition. — 70 p.

Дата поступления: 21.03.2023

Решение о публикации: 25.04.2023

Контактная информация:

ПЕГИН Павел Анатольевич — д-р техн. наук, проф.; p Pavel.khv@gmail.com

НЕМЧИНОВ Дмитрий Михайлович — канд. техн. наук, соискатель

ИЛЬИН Алексей Анатольевич — старший преподаватель; ilin@pgups.ru

Analysis of the Effectiveness of the Development of the Road Network

P. A. Pegin, D. M. Nemchinov, A. A. Ilyin

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

For citation: Pegin P. A., Nemchinov D. M., Ilyin A. A. Analysis of the Effectiveness of the Development of the Road Network. *Bulletin of scientific research results*, 2023, iss. 2, pp. 71–80. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2023-2-71-80

Summary

Purpose: To identify the influence of the following factors on the level of socio-economic development, both of individual regions and the country as a whole: administrative and functional affiliation of highways, transport and operational characteristics of highways and the state of the road economy. **Methods:** Analysis and synthesis of the results regarding the impact of highways on the level of socio-economic development of the state. **Results:** Flow-charts have been developed showing the impact of highways on the country's economy, the level of its defense capability, welfare and social opportunities of its residents. **Practical significance:** The results obtained can be used to improve the values of macro and micro economic indicators of regions.

Keywords: Road network, roads of regional significance, logistics of passenger and freight transportation, transport infrastructure, modal and intermodal transport corridors.

References

1. Bugromenko V. N. *Matematicheskoe modelirovanie vliyaniya dorozhnoy seti na sebestoimost' produktsii i sotsial'nye pokazateli regionov. Trudy Pervogo Vserossiyskogo Dorozhnogo Kongressa* [Mathematical modeling of the influence of the road network on the cost of production and social indicators of regions. Proceedings of the First All-Russian Road Congress]. Moscow: MADI Publ., 2009, pp. 154–157. (In Russian)

2. Vasilevskiy L. I. *Transportnaya sistema SShA: Sravnitel'nyy ekonomicheskiy analiz. Sorevnovanie dvukh sistem* [Transport system of the USA: Comparative economic analysis. Competition of two systems]. Moscow: AN SSSR Publ., 1963, 67 p. (In Russian)
3. Geydt A. A. *Strategicheskoe planirovanie razvitiya dorozhnoy infrastruktury v transportnoy politike Rossii: avtoref. diss. ... d-ra ekon. nauk* [Strategic planning for the development of road infrastructure in the transport policy of Russia: author. diss. ... Dr. Econ. Sciences]. St. Petersburg, 2005, 273 p. (In Russian)
4. Levitin I. *Transport kak uslovie ekonomicheskogo rosta* [Transport as a condition for economic growth]. *Rossiyskaya Federatsiya segodnya* [Russian Federation today]. 2008, № 9, dekabr', 13 p. (In Russian)
5. Moroz V. N., Nikolaev G. B. *Razrabotka modeli otsenki effektivnosti funktsionirovaniya regional'noy transportnoy seti. MAT* [Development of a model for assessing the effectiveness of the functioning of the regional transport network. MAT]. *Otchet o NIR* [Research report]. St. Petersburg: MAT Publ., 2002, 212 p. (In Russian)
6. Nemchinov D. M. *Printsipy i metody planirovaniya setey avtomobil'nykh dorog* [Principles and methods of planning road networks]. Moscow: TEKhpOLIGRAFTsENTR Publ., 2014, 199 p. (In Russian)
7. Podoprigora N. V., Pegin P. A., Dotsenko S. N. *Informatsionnye aspekty sistemy "uchastnik dorozhnogo dvizheniya — transportnoe sredstvo — doroga — vneshnyaya sreda". Progressivnye tekhnologii v transportnykh sistemakh: materialy XVI Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Information aspects of the system "road user — vehicle — road — external environment". Progressive technologies in transport systems: materials XVI International Scientific and Practical Conference]. Orenburg, 2021, pp. 395–402. (In Russian)
8. Pegin P. A., Tsutskarev V. K. *Analiz vneshnikh i vnutrennikh faktorov, vliyayushchikh na effektivnost' deyatelnosti transportnogo predpriyatiya* [Analysis of external and internal factors affecting the efficiency of the transport enterprise]. *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy* [Bulletin of the results of scientific research]. 2021, Iss. 1, pp. 22–32. (In Russian)
9. Pegin P. A. *Povyshenie effektivnosti i bezopasnosti ekspluatatsii avtomobil'nogo transporta na osnove uvelicheniya propusknoy sposobnosti avtomagistralei: diss. ... d-ra tekhn. nauk* [Improving the efficiency and safety of road transport operation based on increasing the capacity of highways: diss. ... Dr. tech. Science]. Orel: Orlovskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet Publ., 2011. (In Russian)
10. Pegin P. A., Il'in A. A., Runev E. V. *Matematicheskaya model' dostatochnosti seti avtomobil'nykh dorog regiona. Innovatsii i perspektivy razvitiya gornogo mashinostroeniya i elektromekhaniki: IPDME-2020: sbornik tezisov* [Mathematical model of the sufficiency of the regional road network. Innovations and prospects for the development of mining engineering and electromechanics: IPDME-2020: collection of abstracts]. St. Petersburg: Sankt-Peterburgskiy gornyy universitet Publ., 2020, pp. 804–807. (In Russian)
11. Pegin P. A., Il'in A. A. *Osobennosti transportnogo planirovaniya seti munitsipal'nykh avtomobil'nykh dorog s uchetom klimaticheskikh usloviy* [Features of transport planning of the network

of municipal highways taking into account climatic conditions]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov* [Vestnik grazhdanskikh inzhenerov]. 2019, Iss. 2(73), pp. 131–135. (In Russian)

12. *Polozhenie ob integrirovannoy strukture transportnoy seti RIN. Germaniya, Nauchno-issledovatel'skoe obshchestvo po dorogam i transport* [Regulation on the integrated structure of the transport network RIN. Germany, Research Society for Roads and Transport]. Kel'n, 2008, 57 p. (In Russian)

13. Skirkovskiy S. V., Pegin P. A. Razrabotka algoritma i komp'yuternoy programmy optimizatsii parametrov funktsionirovaniya gorodskogo marshrutizirovannogo transporta [Development of an algorithm and a computer program for optimizing the parameters of the functioning of urban routed transport]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov* [Vestnik grazhdanskikh inzhenerov]. 2017, Iss. 1 (60), pp. 277–287. (In Russian)

14. Stremlenie k nulyu: vysokie zadachi i sistemnyy podkhod k bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya [Striving for zero: high goals and a systematic approach to road safety]. *Mezhdunarodnyy transportnyy forum* [International Transport Forum]. 2008, 32 p. (In Russian)

15. Yarmolinskiy A. I., Pegin P. A., Yarmolinskiy V. A. *Konstruktsiya zemlyanogo polotna* [Subgrade construction]. Patent RF, no. 2288986 C2. (In Russian)

16. *Advancing Sustainable Safety: National Road Safety Outlook for 2005–2020*, SWOV Institute for Road Safety Research, 2006.

17. *Arterials and Streets Infrastructure and Operations for Mobility, Access, and Community In Metropolitan Chicago*, Chicago, USA, January, 2009.

18. *Assessing the Feasibility of a National Road Classification*, Report to ICSM on National Road Classification Developments, The Intergovernmental Committee of Surveying & Mapping (ICSM) formed the Roads Working Group, Australia & New Zealand (RWG). October 2006.

19. Pegin P., Ilyin A., Semenova K. Features transport planning the network of municipal roads in northern region. *Transportation Soil Engineering in Cold Regions. Proceedings of TRANSOILCOLD 2019. Series: Lecture Notes in Civil Engineering*, vol. 49. Singapore, 2020, pp. 397–401.

20. *FHWA Urban Boundary and Federal Functional Classification Handbook*. Transportation Statistics Office Florida Department of Transportation Tallahassee, Florida, 2003.

21. *Highway Functional Classification Concepts, Criteria and Procedures*. 2013 Edition, 70 p.

Received: March 21, 2023

Accepted: April 25, 2023

Author's information:

Pavel A. PEGIN — Dr. Sci. in Engineering, Professor; ppavel.khv@gmail.com

Dmitriy M. NEMCHINOV — PhD in Engineering, Applicant

Alexey A. ILYIN — Senior Lecturer; ilin@pgups.ru

УДК 629.423.1:621.313.333

Расчетная методика определения потерь в асинхронном тяговом двигателе электровоза при изменяющейся нагрузке

А. А. Зарифьян¹, П. Г. Колпахчян²

¹ООО «ТМХ Инжиниринг», Российская Федерация, 141009, Московская обл., Мытищи, ул. Колонцова, 4

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

Для цитирования: Зарифьян А. А., Колпахчян П. Г. Расчетная методика определения потерь в асинхронном тяговом двигателе электровоза при изменяющейся нагрузке // Бюллетень результатов научных исследований. — 2023. — Вып. 2. — С. 81–91. DOI: 10.20295/2223-9987-2023-2-81-91

Аннотация

Цель: В работе [1] выполнено экспериментальное изучение энергетической эффективности асинхронного тягового привода электровозов при изменяющейся нагрузке. В настоящей статье поставлена задача разработки методики расчетного определения потерь в асинхронном тяговом двигателе (АТД) при питании от преобразователя в зависимости от полезной нагрузки. **Методы:** При питании АТД от преобразователя, когда напряжения и токи имеют несинусоидальную форму, определение потерь является сложной задачей, так как необходим учет значительного количества факторов. Использовался подход, основанный на разделении потерь и использовании результатов экспериментов. Для расчета потерь использовался применяемый в теории электрических машин подход, основанный на разделении потерь, которые состоят из электрических (потери в меди), магнитных (потери в стали), механических и дополнительных. Поскольку ток статора содержит высшие гармоники, электрические потери в обмотке статора определяются с учетом эффекта вытеснения тока. Для определения величины магнитных потерь выполняется определение гармонического состава потокоцепления в воздушном зазоре, вычисляются и суммируются потери от каждой гармоники. Дополнительные потери в номинальном режиме считаются равными 0,5 % мощности АТД. Полные потери в АТД определяются суммированием всех указанных потерь. В качестве исходной информации для расчета потерь использованы результаты испытаний тяговых двигателей типа ДТА-1100 по схеме взаимной нагрузки, приведенные в [1]. **Результаты:** Прежде всего рассчитаны потери в тяговом двигателе типа ДТА-1100 при работе в номинальном режиме. Полученное значение КПД, равное 0,962, вполне согласуется с паспортными данными двигателя, которое заявлено как 0,96. Далее расчетным путем определены потери в АТД при работе в переменных режимах. Установлена картина расчетных потерь в зависимости от мощности на валу двигателя, которые практически совпадают с потерями, найденными при испытаниях на стенде, во всем диапазоне нагрузок. **Практическая значимость:** Предлагаемая методика по своей сути является универсальной, причем достоверность полученных результатов подтверждена сравнением с экспериментом. Методика может быть использована для определения потерь в асинхронных тяговых двигателях отечественных электровозов, электропоездов и тепловозов.

Ключевые слова: Электровоз, асинхронный тяговый привод, энергетическая эффективность при переменной нагрузке, расчетная методика определения потерь в асинхронном тяговом двигателе.

Введение

В [1] установлено, что характер изменения суммарного КПД асинхронного тягового электропривода определяется главным образом поведением КПД тягового электродвигателя в зависимости от нагрузки.

При питании асинхронного тягового двигателя (АТД) от преобразователя, когда напряжения и токи имеют несинусоидальную форму, определение потерь является сложной задачей, так как необходим учет значительного количества факторов [2–4]. Расчет потерь в магнитной системе требует знания информации о распределении магнитного поля в магнитопроводах статора и ротора и о параметрах магнитных материалов. Выполнение таких расчетов связано со значительными вычислительными затратами и не гарантирует получения точного результата, так как, как правило, известны только некоторые усредненные параметры электротехнической стали. Поэтому для расчета потерь в АТД при питании от преобразователя использовался применяемый в теории электрических машин подход [2, 5–7], основанный на разделении потерь и использовании результатов экспериментов при питании электрической машины синусоидальным напряжением.

Методика расчетного определения потерь

В соответствии с общепринятым подходом, потери в АТД разделяются на электрические (потери в меди), магнитные (потери в стали), механические и дополнительные. В качестве исходной информации для расчета потерь использованы результаты испытаний тяговых двигателей типа ДТА-1100 по схеме взаимной нагрузки, приведенные выше.

Так как ток статора содержит высшие гармоники, электрические потери в обмотке статора определяются с учетом эффекта вытеснения тока. Для определения величины магнитных потерь выполняется определение гармонического состава потокосцепления в воздушном зазоре, вычисляются и суммируются потери от каждой гармоники. Дополнительные потери в номинальном режиме считаются равными 0,5 % мощности АТД. Полные потери в АТД определяются суммированием электрических, магнитных, механических и дополнительных потерь.

В соответствии с [6, 7] коэффициент, учитывающий увеличение активного сопротивления в зависимости от частоты, определяется по формуле:

$$\delta_{sk} = \frac{1}{12} \left(\frac{k\omega_s}{\omega_{SH}} \right),$$

где ω_{SH} , ω_s — номинальная и текущая угловые частоты тока статора.

С учетом этого коэффициента электрические потери в обмотке статора:

$$\Delta P_{эс} = m \sum_k I_{\phi k}^2 r_s \delta_{sk}, \quad (1)$$

где $I_{\phi k}$ — k -я временная гармоника тока фазы статора;
 m — число фаз обмотки статора.

Изменение активного сопротивления обмотки ротора учитывается с использованием коэффициента, определяемого для k -й временной гармоники следующим образом:

$$\delta_{rk} = \sin^2 \theta + \frac{1}{12} \left(\frac{k \omega_s - p \omega}{\omega_{\text{SH}}} \right),$$

где θ — фазовый сдвиг между обобщенными векторами тока статора и потокосцепления ротора АД, рассчитываемый по формуле [5]:

$$\theta = \frac{(\omega_s - p \omega) \omega_s L'_r}{r'_r},$$

где p — число пар полюсов АД;

ω — частота вращения ротора АД;

L'_r и r'_r — индуктивность и активное сопротивление ротора АД, приведенные к статору.

Для определения электрических потерь в обмотке ротора необходимо рассчитать значение тока ротора, приведенного к статору. Амплитуда k -й временной гармоники этого тока определяется по формуле:

$$I_{rk} = \frac{x_m}{\sqrt{a_k^2 + b_k^2}} \cdot \frac{U_{sk}}{k \omega_s},$$

где x_m — реактивное сопротивление контура намагничивания АД;

U_{sk} — амплитуда k -й временной гармоники напряжения статора.

Коэффициенты a_k и b_k могут быть определены с использованием выражений:

$$a_k = \frac{r_s \delta_{sk} r'_r \delta_{rk}}{k \omega_s s_k} - x_s x'_r \sigma; \quad b_k = \frac{r_s \delta_{sk}}{k \omega_s} x'_r + \frac{r'_r \delta_{rk}}{s_k} x_s,$$

где x_s и x'_r — реактивное сопротивление статора и ротора, приведенное к статору, соответственно;

$s_k = k \omega_s - p \omega$ — скольжение для k -й временной гармоники;

σ — коэффициент рассеяния.

Электрические потери ротора находятся с использованием приведенных выше выражений для определения тока ротора:

$$\Delta P_{\text{эр}} = \sum_k \left(\frac{I_{rk}}{\sqrt{2}} \right)^2 r'_r \delta_{rk}. \quad (2)$$

Для определения составляющей магнитных потерь от k -й временной гармоники потокоцепления в воздушном зазоре используется известное выражение [5, 6]:

$$\Delta P_{mk} = \Delta P_{\text{мн}} \left(\frac{\Psi_{mk}}{\Psi_{\text{мн}}} \right)^2 \cdot \left(\frac{k\omega_s}{\omega_{\text{сн}}} \right)^{1,3}, \quad (3)$$

где $\Delta P_{\text{мн}}$ и $\Psi_{\text{мн}}$ — магнитные потери и потокоцепление в воздушном зазоре в номинальном режиме при синусоидальном напряжении питания.

Для определения k -й временной гармоники потокоцепления в воздушном зазоре соответствующая гармоника тока намагничивания рассчитывается по формуле [5]:

$$I_{mk} = \sqrt{\frac{(r_r' \delta_{rk} / s_k)^2 + x_{r\sigma}^2}{a^2 + b^2}} \cdot \frac{U_{sk}}{k\omega_s},$$

где $x_{r\sigma}$ — реактивное сопротивление рассеяния ротора.

Тогда k -я временная гармоника потокоцепления:

$$\Psi_{mk} = x_m I_{mk}.$$

В соответствии с принятой в теории электрических машин методикой определения механических потерь считается, что они зависят от квадрата частоты вращения и вычисляются по формуле:

$$\Delta P_{\text{мех}} = \Delta P_{\text{мехн}} \left(\frac{\omega_s}{\omega_{\text{сн}}} \right)^2, \quad (4)$$

где $\Delta P_{\text{мехн}}$ — механические потери при номинальной частоте вращения.

Дополнительные потери в номинальном режиме считаются равными 0,5 % мощности АТД и зависящими от квадрата тока статора:

$$\Delta P_{\text{доп}} = 0,005 \left(\frac{I_{s1}}{I_{\text{сн}}} \right)^2 P_{\text{н}}, \quad (5)$$

где $P_{\text{н}}$ и $I_{\text{сн}}$ — номинальная мощность АТД и номинальный ток статора.

Полные потери в АТД определяются суммированием электрических, магнитных, механических и дополнительных потерь:

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_{\text{эс}} + \Delta P_{\text{эр}} + \Delta P_{\text{м}} + \Delta P_{\text{мех}} + \Delta P_{\text{доп}}. \quad (6)$$

Подведенная к АД активная мощность рассчитывается по значениям фазных напряжений и токов ($U_\phi(t), I_\phi(t)$):

$$P_1 = m \int_0^t U_\phi(t) I_\phi(t) dt. \quad (7)$$

Полезная мощность двигателя (механическая мощность на валу) определяется как разница между подведенной активной мощностью и полными потерями:

$$P_2 = P_1 - \Delta P_\Sigma. \quad (8)$$

Как следует из выражений для определения отдельных видов потерь, корректность расчетов во многом определяется тем, насколько точно определен гармонический состав фазных токов и напряжений статора. Как показал предварительный анализ экспериментально определенных зависимостей тока статора в часовом режиме, кроме основной гармоники с частотой около 80 Гц, они также содержат субгармоники с частотой порядка 15 Гц, обусловленные особенностями проведения испытаний по схеме с взаимной нагрузкой [3]. Поэтому определение частоты основной гармоники по зависимости тока или напряжения одной из фаз не позволяет обеспечить необходимую точность.

Для устранения влияния субгармоник с частотой ниже основной гармоники определение частоты основной гармоники проводилось с использованием следующего подхода. С использованием экспериментальных зависимостей токов фаз статора с помощью прямого преобразования Кларка определялись проекции вектора тока статора на оси системы координат $\alpha - \beta$ неподвижной относительно статора:

$$\begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix},$$

где $i_{s\alpha}, i_{s\beta}$ — проекции вектора тока статора на оси системы координат $\alpha - \beta$; i_A, i_B, i_C — значения токов фаз статора.

Затем полученные зависимости от времени проекции тока статора на оси неподвижной системы координат преобразуются в проекции на вращающуюся систему координат $d - q$ (прямое преобразование Парка):

$$\begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \end{bmatrix},$$

где i_{sd}, i_{sq} — проекции вектора тока статора на оси системы координат $d - q$;

Угол положения вращающейся системы координат $d — q$ относительно неподвижной $\alpha — \beta$ равен

$$\theta = 2\pi f_{d-q} t,$$

где f_{d-q} — частота вращения системы координат $d — q$.

Если частота вращения вектора тока (напряжения) статора совпадает с частотой вращения системы координат $d — q$, проекции соответствующего вектора на ее оси будут постоянными величинами. Поэтому для определения близости частоты основной гармоники токов фаз может быть использована сумма дисперсий проекций вектора тока на оси системы координат относительно среднего значения этих составляющих:

$$Q = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (i_{sdk} - \bar{i}_{sd})^2 + \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (i_{sqk} - \bar{i}_{sq})^2,$$

где N — количество измерений;

\bar{i}_{sd} \bar{i}_{sq} — среднее значение проекций вектора тока на оси системы координат $d — q$.

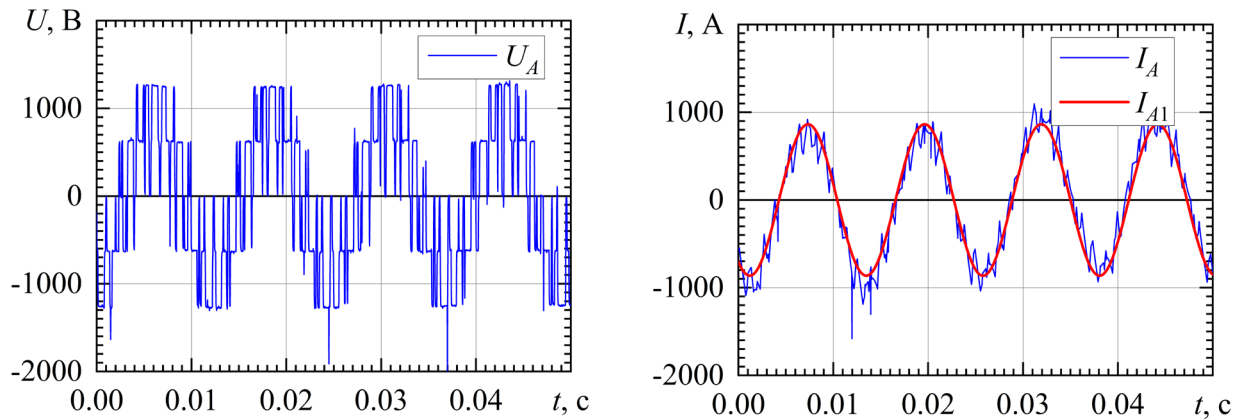
В случае, когда токи фаз имеют синусоидальную форму, при равенстве частоты токов и частоты вращения, величина этого критерия будет равна нулю. Так как при питании от инвертора токи фаз АД имеют высшие гармоники, то для определения частоты основной гармоники методом наименьших квадратов минимизируется значение критерия Q . Кроме исключения влияния субгармоник в токах, полученных в ходе эксперимента, использование такого подхода позволяет устранить влияние помех измерений.

Определение потерь в тяговом двигателе при работе в номинальном (длительном) режиме

В качестве примера определения потерь в АД типа ДТА-1100 рассмотрим случай его работы в номинальном (длительном) режиме. Частота основной гармоники токов и напряжений, полученная с использованием описанного выше метода, равна 81,406 Гц.

На рис. 1 показаны кривые напряжения U_A и тока I_A , причем основная гармоника тока I_{A1} фазы A показана жирной линией.

В соответствии с изложенной выше методикой определения потерь, для рассматриваемого случая были получены следующие значения подведенной к тяговому двигателю мощности и отдельных видов потерь:

Рис. 1. Напряжение (слева) и ток (справа) фазы A

$P_1 = 1093$ кВт — мощность, подведенная к тяговому двигателю;

$\Delta P_{\text{эс}} = 12,335$ кВт — электрические потери статора;

$\Delta P_{\text{эр}} = 11,398$ кВт — электрические потери ротора;

$\Delta P_{\text{эм}} = 10,157$ кВт — магнитные потери;

$\Delta P_{\text{мех}} = 5,818$ кВт — механические потери;

$\Delta P_{\text{доп}} = 1,685$ кВт — дополнительные потери.

Отсюда находим суммарные потери:

$\Delta P_{\Sigma} = 12,335 + 11,398 + 10,157 + 5,818 + 1,685 = 41,393$ кВт.

Мощность на валу двигателя в номинальном режиме, согласно (6) и (8), будет равна:

$P_2 = P_1 - \Delta P_{\Sigma} = 1093 - 41,393 = 1051,607$ кВт,

а его КПД будет равен:

$\eta_{\text{ТЭД}} = P_2 / P_1 = 1051,607 / 1093 = 0,962$.

Полученные значения мощности на валу и КПД вполне согласуются с паспортными данными тягового двигателя ДТА-1100, где при работе в номинальном (длительном) режиме заявлено $P_2 = 1050$ кВт и $\eta_{\text{ТЭД}} = 0,96$.

Определение потерь в тяговом двигателе и в механическом приводе при работе в переменных режимах

Колесно-моторный блок (*drive*) имеет в своем составе тяговый электродвигатель и тяговый редуктор (механический привод от вала двигателя на ось колесной пары), включающий зубчатую передачу и подшипники.

При изменении мощности P_1 , потребляемой ТЭД, получаем результаты, сведенные в таблицу. Семь значений мощности $P_1 = 52; \dots; 1093$ кВт, находящиеся в 1-м столбце этой таблицы, соответствуют столбцу 4 табл. 2 в экспериментальной работе [1], где они обозначены как P_{in}^{drive} .

Значения мощности и КПД

	Мощность		
	потребляемая ТЭД P_1 , кВт	на валу ТЭД P_2 , кВт	на оси КП $P_{\text{КМБ}}$, кВт
i	1	2	3
1	52	28,325	23
2	258	233,60	226
3	472	445,74	432
4	689	658,97	642
5	879	844,60	824
6	1003	964,96	943
7 (длительный режим)	1093	1051,61	1029

Далее, во 2-м столбце таблицы, приведены значения мощности P_2 на валу ТЭД, рассчитанные согласно приведенной выше методике.

В 3-м столбце приведены значения мощности $P_{\text{КМБ}}$, то есть мощности на оси колесной пары, полученные экспериментально в [1] и находящиеся в столбце 6 табл. 2 в работе [1], они обозначены как $P_{\text{out}}^{\text{drive}}$.

Потери в КМБ находим, вычитая поэлементно столбец 3 из столбца 1; потери в ТЭД находятся вычитанием столбца 2 из столбца 1, а потери в механическом приводе — вычитая столбец 3 из столбца 2. В итоге получаем картину потерь в зависимости от мощности на валу двигателя (рис. 2).

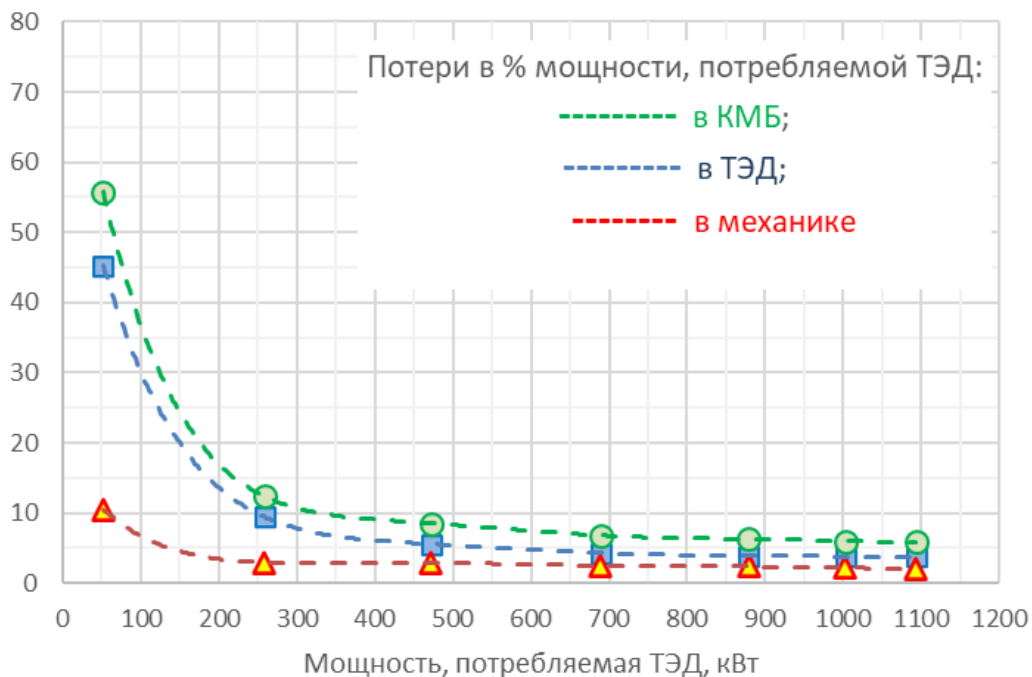


Рис. 2. Потери в зависимости от мощности на валу двигателя

Заключение

Представлена методика расчетного определения потерь в асинхронном тяговом двигателе при питании от преобразователя. Использовался подход, основанный на разделении потерь на электрические (потери в меди), магнитные (потери в стали), механические и дополнительные. В качестве исходной информации для расчета потерь использованы результаты испытаний тяговых двигателей типа ДТА-1100 по схеме взаимной нагрузки, приведенные в [1]. Получено совпадение расчетных и экспериментальных результатов во всем диапазоне изменения мощности, реализуемой АД.

Предлагаемая методика по своей сути является универсальной, причем достоверность полученных результатов подтверждена сравнением с экспериментом. Методика может быть использована для определения потерь в асинхронных тяговых двигателях отечественных электропоездов, электропоездов и тепловозов.

Библиографический список

1. Зарифьян А. А. Экспериментальное исследование энергетической эффективности асинхронного тягового привода электропоездов при изменяющейся нагрузке / А. А. Зарифьян, П. Г. Колпахчян // Бюллетень результатов научных исследований. — 2023. — Вып. 1. — С. 77–92. — DOI: 10.20295/2223-9987-2023-1-77-92.
2. Колпахчян П. Г. Потери в асинхронном тяговом двигателе при питании от преобразователя частоты и числа фаз / П. Г. Колпахчян, В. И. Захаров // Вестник Всероссийского научно-исследовательского и проектно-конструкторского института электропоездоостроения. — 2005. — № 48. — С. 78–88.
3. Попов Д. И. Научные основы создания энергоэффективных методов и средств испытаний электрических машин / Д. И. Попов. — Омск: Омский государственный университет путей сообщения, 2019. — 175 с.
4. Казаков Ю. Б. Моделирование энергоэффективности тягового асинхронного двигателя при питании от преобразователя частоты с широтно-импульсной модуляцией напряжения / Ю. Б. Казаков, Н. К. Швецов // Вестник ИГЭУ. — 2013. — № 3. — С. 1–5.
5. Поздеев А. Д. Электромагнитные и электромеханические процессы в частотно-регулируемых асинхронных электроприводах / А. Д. Поздеев. — Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 1998. — 172 с.
6. Волков А. В. Потери мощности асинхронного двигателя в частотно-управляемых электроприводах с широтно-импульсной модуляцией / А. В. Волков // Электротехника — 2002 — № 8. — С. 2–9.
7. Радин В. И. Электрические машины. Асинхронные машины / В. И. Радин, Д. Э. Брускин, А. Е. Зорохович. — М.: Высшая школа, 1988. — 328 с.

Дата поступления: 08.03.2023

Решение о публикации: 10.04.2023

Контактная информация:

ЗАРИФЬЯН Александр Александрович — канд. техн. наук, эксперт;

zarifyan.alexander@gmail.com

КОЛПАХЧЬЯН Павел Григорьевич — д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой;

kolpahchyan@mail.ru

Calculation Method for Determining Losses in Electric Locomotive Asynchronous Traction Motor under Changing Load

A. A. Zarifyan¹, P. G. Kolpahchyan²

¹“TMH Engineering” LLC, 4, Kolontsova str., Mytishchi, Moscow Region, 141009, Russian Federation

²Rostov State Transport University, 2, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya Sq., Rostov-on-Don, 344038, Russian Federation

For citation: Zarifyan A. A., Kolpahchyan P. G. Calculation Method for Determining Losses in Electric Locomotive Asynchronous Traction Motor under Changing Load. *Bulletin of scientific research results*, 2023, iss. 2, pp. 81–91. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2023-2-81-91

Summary

Purpose: In the work [1], an experimental study of the energy efficiency of electric locomotive asynchronous traction drive under changing load has been carried out. In this article, the task is to develop a method for calculating the losses in an asynchronous traction motor (ATM) when powered by a converter, depending on the changing load. **Methods:** When ATM is powered by a converter and voltages and currents are non-sinusoidal, the determination of losses is a difficult problem, since a significant number of factors must be taken into account. An approach based on the separation of losses and the utilization of experimental results has been employed. To calculate the losses, an approach used in the theory of electrical machines has been applied. It is based on the separation of losses, which consist of electrical (losses in copper), magnetic (losses in steel), mechanical and additional ones. Since the stator current contains higher harmonics, the electrical losses in the stator winding are determined taking into account the effect of current displacement. To ascertain the magnitude of magnetic losses, the harmonic composition of the flux linkage in the air gap is determined, the losses from each harmonic are calculated and summarized. Additional losses in the nominal mode are considered equal to 0.5% of the ATM power. The total loss in the ATM is determined by the summation of all the specified losses. The results of the DTA-1100 type traction motors tests according to the mutual load scheme given in [1] have been used as initial information for calculating the losses. **Results:** First of all, the losses in the DTA-1100 traction motor have been calculated when operating in the nominal mode. The obtained efficiency value, equal to 0.962, is in good agreement with the passport data of the engine, which is declared as 0.96. Further, the losses in the ATM when operating in variable modes are determined by calculation. A pattern of calculated losses depending on the power on the motor shaft has been established, which practically coincide with the losses found during tests on the stand, in the entire range of loads. **Practical significance:** The proposed method is inherently universal, and the reliability of the results obtained is confirmed by comparison with the experiment. The technique can be used to determine the energy efficiency of asynchronous traction motors of domestic electric and diesel-electric locomotives and electric trains.

Keywords: Electric locomotive, asynchronous traction drive, energy efficiency under changing load, calculation method for determining losses in an asynchronous traction motor.

References

1. Zarifyan A. A., Kolpakhchyan P. G. Experimental'noe issledovanie energeticheskoy effektivnosti asinkhronnogo tyagovogo privoda elektrovozov pri izmenyauscheysya nagruzke [Experimental Research of Energetic Efficiency of Electric Locomotive Asynchronous Traction Drive at Changing Load]. *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy* [Bulletin of scientific research results]. 2023, Iss. 1, pp. 77–92. DOI: 10.20295/2223-9987-2023-1-77-92. (In Russian)

2. Kolpakhchyan P. G., Zakharov, V. I. Poteri v asinkhronnom tyagovom dvigatele pri pitanii ot preobrazovatelya chastoty i chisla faz [Losses in an asynchronous traction motor when powered by a frequency and phase converter]. *Vestnik Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo i proektno-konstruktorskogo instituta elektrovostroyeniya* [Bulletin of the All-Russian Research and Design Institute of Electric Locomotive Building]. 2005, Iss. 48, pp. 78–88. (In Russian)

3. Popov D. I. *Nauchnye osnovy sozdaniya energoeffektivnykh metodov i sredstv ispytaniy elektricheskikh mashin* [Scientific foundations for creating energy-efficient methods and means of testing electrical machines]. Omsk: Omskiy gosudarstvennyy universitet putey soobshcheniya Publ., 2019, 175 p. (In Russian)

4. Kazakov Yu. B., Shvetsov N. K. Modelirovaniye energoeffektivnosti tyagovogo asinkhronnogo dvigatelya pri pitanii ot preobrazovatelya chastoty s shirotno-impul'snoy modulyatsiyey napryazheniya [Modeling the energy efficiency of a traction asynchronous motor when powered by a frequency converter with pulse-width modulation of voltage]. *Vestnik IGEU* [Vestnik IGEU]. 2013, Iss. 3, pp. 1–5. (In Russian)

5. Pozdeev A. D. *Elektromagnitnyye i elektromekhanicheskiye protsessy v chastotno-reguliruyemykh asinkhronnykh elektroprivodakh* [Electromagnetic and electromechanical processes in frequency-controlled asynchronous electric drives]. Cheboksary: Izd-vo Chuvash. un-ta Publ., 1998, 172 p. (In Russian)

6. Volkov A. V. Poteri moshchnosti asinkhronnogo dvigatelya v chastotno-upravlyayemykh elektroprivodakh s shirotno-impul'snoy modulyatsiyey [Power losses of an asynchronous motor in frequency-controlled electric drives with pulse-width modulation]. *Elektrotehnika* [Electrical Engineering]. 2002, Iss. 8, pp. 2–9. (In Russian)

7. Radin V. I., Bruskin D. E., Zorokhovich A. E. *Elektricheskkiye mashiny. Asinkhronnyye mashiny* [Electric machines. Asynchronous machines]. Moscow: Higher school Publ., 1988, 328 p. (In Russian)

Received: March 08, 2023

Accepted: April 10, 2023

Author's information:

Alexander A. ZARIFYAN — PhD in Engineering, Expert; zarifyan.alexander@gmail.com

Pavel G. KOLPAKHCHYAN — Dr. Sci. in Engineering, Electric Machines and Apparatus

Department Head; kolpakhchyan@mail.ru

УДК 62-65

Расчет тепловых потерь в комбинированной фильтрокомпенсирующей установке

А. В. Агунов¹, А. А. Карабанов², И. А. Терехин¹, И. А. Баранов¹

¹Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

²ООО «НИИЭФА-ЭНЕРГО», Российская Федерация, 196641, Санкт-Петербург, п. Металлострой, промзона «Металлострой», 3/2

Для цитирования: Агунов А. В., Карабанов А. А., Терехин И. А., Баранов И. А. Расчет тепловых потерь в комбинированной фильтрокомпенсирующей установке // Бюллетень результатов научных исследований. — 2023. — Вып. 2. — С. 92–103. DOI: 10.20295/2223-9987-2023-2-92-103

Аннотация

Цель: Выполнить расчет тепловых потерь в комбинированной фильтрокомпенсирующей установке и провести оценку возможности применения воздушного охлаждения. **Методы:** Математическое и компьютерное моделирование расчета тепловых потерь комбинированной фильтрокомпенсирующей установки с учетом основных параметров преобразователя. **Результаты:** В работе представлены схемы и основные отличия установок компенсации реактивной мощности, применяемые в настоящее время на электрифицированных участках железных дорог. Выполнен расчет тепловых потерь комбинированной фильтрокомпенсирующей установки с учетом основных параметров преобразователя СГРМ на базе транзисторов IGBT. В программном комплексе ANSIS 18.2 разработана имитационная модель шкафа преобразователя и выполнен тепловой расчет охладителя. **Практическая значимость:** Результаты расчета тепловых потерь подтвердили возможность использования воздушного охлаждения в представленной комбинированной фильтрокомпенсирующей установке мощностью до 15 Мвар.

Ключевые слова: Комбинированная фильтрокомпенсирующая установка, устройство компенсации реактивной мощности, компенсация реактивной мощности, статический генератор реактивной мощности, расчет тепловых потерь, IGBT транзистор, тепловые потери, воздушное охлаждение.

Введение

В последние годы на сети железных дорог РФ с целью компенсации реактивной мощности нагрузки и снижения потерь в контактной сети стали широко применяться устройства компенсации реактивной мощности на базе преобразователей с транзисторами IGBT, мощность которых может достигать 20 Мвар [1]. В преобразователях такой мощности возникают значительные потери в виде тепловой энергии, которые могут превышать 300 кВт. Основные потери возникают в полупроводниковых приборах, их величина зависит от режима работы устройства компенсации реактивной мощности и связана с необходимостью регулирования. Тяговая нагрузка имеет активно-индуктивный характер, поэтому целесообразно разделить компенсации на две части: стационарную, с неизменной мощностью компенсации и регулируемую на основе преобразователя с транзисторами IGBT.

Преобразователь может обеспечить выработку реактивной мощности как емкостного, так и индуктивного характера, что позволяет более полно использовать возможности преобразователя при меньшей мощности [2].

Основные отличия и состав оборудования комбинированной фильтрокомпенсирующей установки

Основное отличие комбинированной фильтрокомпенсирующей установки (КФКУ) от устройства компенсации реактивной мощности (УКРМ) и устройства компенсации реактивной мощности с плавным регулированием (УКРМП) заключается в том, что КФКУ состоит из фильтрующего устройства (ФУ) и преобразователя (статический генератор реактивной мощности — СГРМ), которые включены параллельно. Схема КФКУ позволяет организовать компенсацию реактивной мощности с меньшими потерями на большую мощность, например, КФКУ мощностью 20 Мвар состоит из ФУ (10 Мвар) и СГРМ (10 Мвар). Схемы применяемых установок компенсации реактивной мощности изображены на рис. 1.

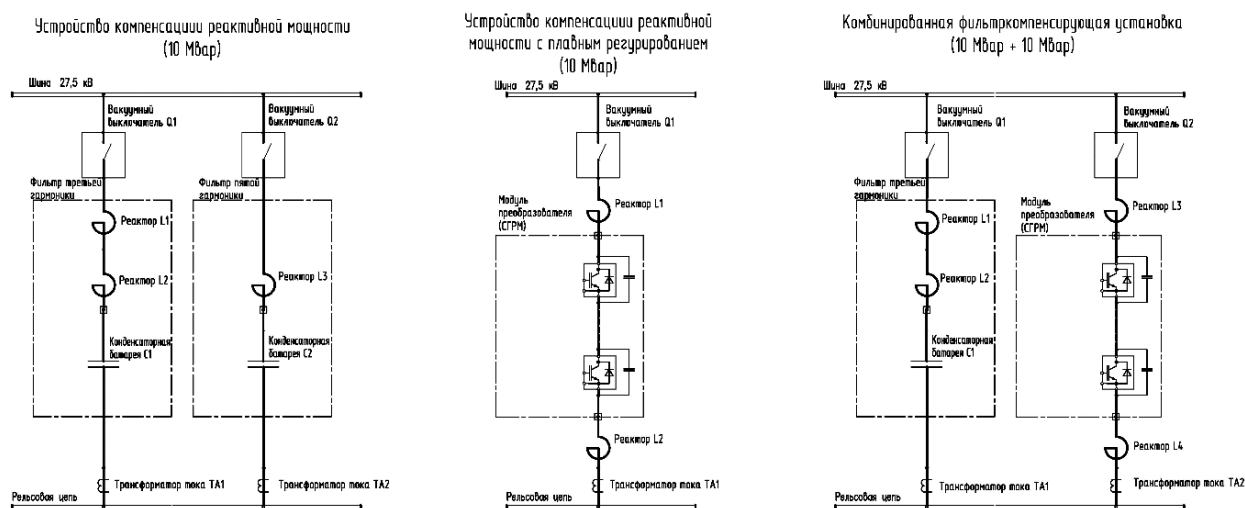


Рис. 1. Схемы применяемых установок компенсации реактивной мощности

Расчет тепловых потерь и определение основных параметров преобразователя

Расчет тепловых потерь и определение основных параметров преобразователя выполним для СГРМ на базе транзисторов IGBT мощностью 10 Мвар.

Большая часть подобного оборудования содержит жидкостное охлаждение, что является для подобного оборудования наиболее целесообразным. Однако по причине того, что устройства компенсации реактивной мощности, как правило, устанавливаются в местах расположения постов секционирования и (или) тяговых

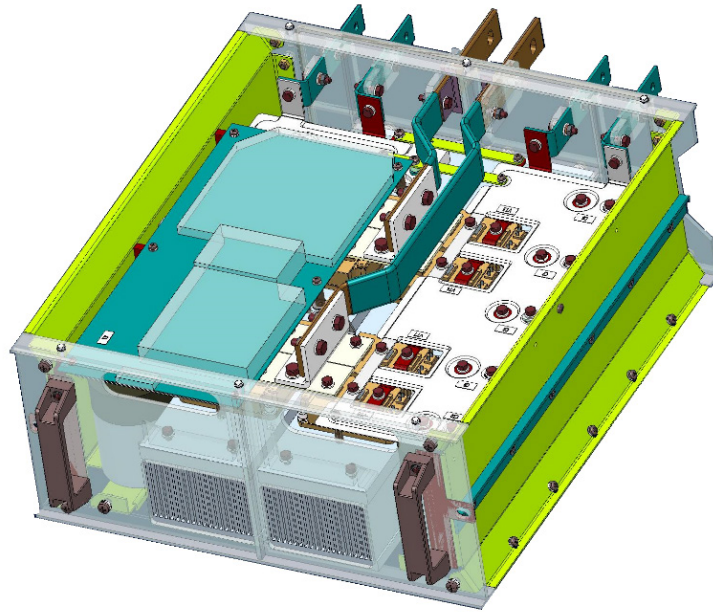


Рис. 2. Внешний вид силового модуля преобразователя

подстанций, которые находятся на значительном удалении от населенных пунктов вдоль путей железной дороги, то обслуживание и поддержание оборудования в рабочем состоянии преобразователя с жидкостным охлаждением становится очень проблематичным. Поэтому, принимая во внимание условия эксплуатации оборудования, предпочтение отдается воздушному охлаждению.

Для расчета тепловых потерь необходимо определить основные параметры СГРМ, выбрать номинальную мощность и подобрать необходимое силовое оборудование (транзисторы IGBT, конденсаторы, реакторы и т. д.). Для упрощения выполним расчет тепловых потерь в преобразователе КФКУ для отдельного шкафа преобразователя (ШП), где основными источниками тепловыделения являются транзисторы IGBT, установленные в силовых модулях. Расчетное количество транзисторов в одном ШП — 56 шт. (7 силовых модулей, в каждом силовом модуле по 8 транзисторов).

Транзисторы IGBT разместим в силовом модуле (рис. 2).

Параметры транзисторов IGBT (для расчетов используем прибор: 2MBI200VH-170-50):

- максимально допустимая температура перехода — $T_j = 150 \text{ }^\circ\text{C}$;
- тепловое сопротивление «переход — корпус» — $R_{th} = 0,0125 \text{ }^\circ\text{C}/\text{Вт}$;
- размеры контактной поверхности — $A \times B = 62 \times 108 \text{ мм}$;
- прямое падение напряжения при $I_{cp} = 200\text{А}$ и $T_j = 125 \text{ }^\circ\text{C}$ — $U_f = 2,4 \text{ В}$.

Для рассеяния тепла, выделяемого модулем IGBT, будем использовать в расчетах алюминиевый охладитель со следующими характеристиками:

- размер контактной части охладителя — $A \times B = 500 \times 120 \text{ мм}$;

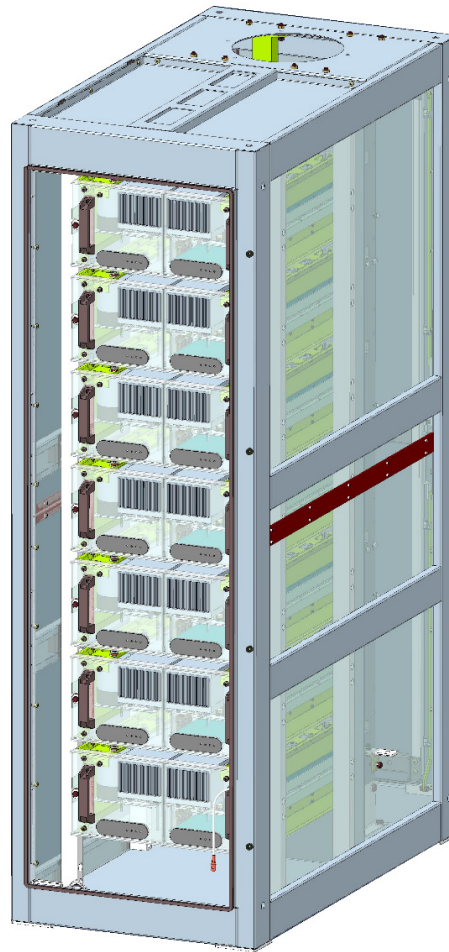


Рис. 3. Внешний вид шкафа преобразователя с установленными внутри силовыми модулями

– тепловое сопротивление охладителя при естественной вентиляции составляет — $R_{s-a} = 0,083 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{Вт}$;

– толщина основания — $h = 23 \text{ мм}$;

– общая высота охладителя — $H = 112 \text{ мм}$.

Температуру окружающей среды — T_a примем $40 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Размещение силовых модулей в ШП изображено на рис. 3.

Потери в IGBT в проводящем состоянии согласно [3] рассчитываются по формуле:

$$P_{SS} = I_{CP} U_f \left(\frac{1}{8} + \frac{D}{3\pi} \right), \quad (1)$$

где I_{CP} — максимальный ток, А;

$D = 0,95$ — максимальная скважность;

U_f — прямое падение напряжения в IGBT в насыщенном состоянии при $I_{CP} = 200 \text{ А}$ и $T_j = 125 \text{ } ^\circ\text{C}$.

$$P_{SS} = 200 \cdot 2,4 \cdot \left(\frac{1}{8} + \frac{0,95}{9,42} \right) = 108,4 \text{ Вт.}$$

Потери IGBT при коммутации согласно [3] рассчитываются по формуле:

$$P_{SW} = \frac{1}{\pi\sqrt{2}} \left(\frac{(I_{CP}U_{CC})(t_{c(on)} + t_{c(off)})f_{SW}}{2} \right), \quad (2)$$

где $t_{c(on)}$, $t_{c(off)}$ — продолжительность переходных процессов по цепи коллектора IGBT на открывание $t_{c(on)}$ и закрывание $t_{c(off)}$ транзистора (примем расчетное значение $t_{c(on)} = 0,3\text{--}0,4$ мкс; $t_{c(off)} = 0,6\text{--}0,7$ мкс);
 U_{CC} — напряжение на коллекторе IGBT, В (коммутируемое напряжение, равное напряжению звена постоянного тока для системы АИН — ШИМ);
 f_{SW} — частота коммутаций ключей, Гц (частота ШИМ), в нашем случае 500 Гц.

$$P_{SW} = \frac{1}{\pi\sqrt{2}} \cdot \frac{(200 \cdot 500) \cdot (0,4 \cdot 10^{-6} + 0,7 \cdot 10^{-6}) \cdot 500}{2} = 24,2 \text{ Вт.}$$

Потери обратного диода FWD в проводящем состоянии согласно [3] рассчитываются по формуле:

$$P_{DS} = I_{EP}U_E \left(\frac{1}{8} + \frac{D}{3\pi} \right), \quad (3)$$

где $I_{EP} \approx I_{CP}$ — максимальная амплитуда тока через обратный диод, А;
 U_E — прямое падение напряжения на диоде (в проводящем состоянии) при I_{EP} , В.

$$P_{DS} = 200 \cdot 2,25 \cdot \left(\frac{1}{8} + \frac{0,95}{9,42} \right) = 101,6 \text{ Вт.}$$

Результирующие потери IGBT с обратным диодом FWD:

$$P_T = P_{SS} + P_{SW} + P_{DS}; \quad (4)$$

$$P_T = 108,4 + 24,2 + 101,6 = 234,2 \text{ Вт.}$$

Получаем суммарные потери в ШП:

$$P_{\text{ШП}} = P_T \cdot 56;$$

$$P_{\text{ШП}} = 234,2 \cdot 56 = 13\,115,2 \text{ Вт.}$$

Расчет охладителя

Расчет максимально допустимого теплового сопротивления в соответствии с [3] производится по формуле:

$$R_{s-a}^{\max} = R_{ja} - R_{jc} - R_{cs} = \frac{T_j - T_a}{P} - R_{jc} - R_{cs}. \quad (6)$$

В соответствии с формулой (6) расчета теплового сопротивления одного транзистора:

$$R_{TH\text{тр}} = \frac{150 - 40}{209} - 0,0125 = 0,513 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{Вт}}.$$

Следовательно, при установке 4 транзисторов на одном охладителе получаем:

$$R_{TH\text{тр}}^4 = \frac{\left(\frac{150 - 40}{209} - 0,0125 \right)}{4} = 0,128 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{Вт}}.$$

Определения условий охлаждения прибора должно удовлетворять условию:

$$R_{s-a} \leq R_{TH\text{тр}}. \quad (7)$$

В соответствии с условием (7) $0,083 \leq 0,128$ выбранный охладитель можно использовать только при условии естественного охлаждения.

Расчет тепловыделения охладителя

Температура перехода транзистора по [3] рассчитывается следующим образом:

$$T_j = T_a + \left(R_{th(j-c)} + R_{c-s} + R_{s-a} \right) \cdot P_T, \quad (8)$$

где T_a — температура охлаждающей среды;

$R_{th(j-c)}$ — тепловое сопротивление переход — корпус;

R_{c-s} — тепловое сопротивление корпус — охладитель;

R_{s-a} — тепловое сопротивление охладитель — охлаждающая среда.

При $T_a = 40 \text{ }^\circ\text{C}$, $R_{TH_{\text{тр}}} = 0,128 \text{ }^\circ\text{C/Вт}$ (с учетом, что используются 4 транзистора на одном охладителе), $R_{c-s} = 0,1 \text{ }^\circ\text{C/Вт}$, $R_{s-a} = 0,083 \text{ }^\circ\text{C/Вт}$ получаем:

$$T_j = 40 + (0,128 + 0,1 + 0,083) \cdot 234,2 = 112,83 \frac{^\circ\text{C}}{\text{Вт}} .$$

Тепловой расчет охладителя с использованием компьютерного моделирования в пакете ANSYS 18.2

Задача стационарной трехмерной теплопроводности решалась с помощью трехмерных конечно-элементных моделей, построенных в пакете ANSYS 18.2 [4].

На приведенных ниже рисунках представлены расчетные температурные поля при охлаждении приборов при различных условиях охлаждения.

Тепловой расчет охладителя при постоянной температуре окружающей среды $400 \text{ }^\circ\text{C}$ показан на рис. 4. Максимальная температура в месте перехода корпус — охладитель — $104 \text{ }^\circ\text{C}$.

Тепловой расчет силового модуля, при условии температуры окружающей среды $400 \text{ }^\circ\text{C}$ и направленного потока воздуха с скоростью 2 м/с , показан на рис. 5. Максимальная температура в месте перехода корпус — охладитель — $77,13 \text{ }^\circ\text{C}$.

Тепловой расчет ШП с установленными силовыми модулями, при условии температуры окружающей среды $400 \text{ }^\circ\text{C}$ и работе вытяжного вентилятора с максимальной производительностью $3000 \text{ м}^3/\text{ч}$, показан на рис. 6. Максимальная температура в месте перехода корпус — охладитель — $88,6 \text{ }^\circ\text{C}$.

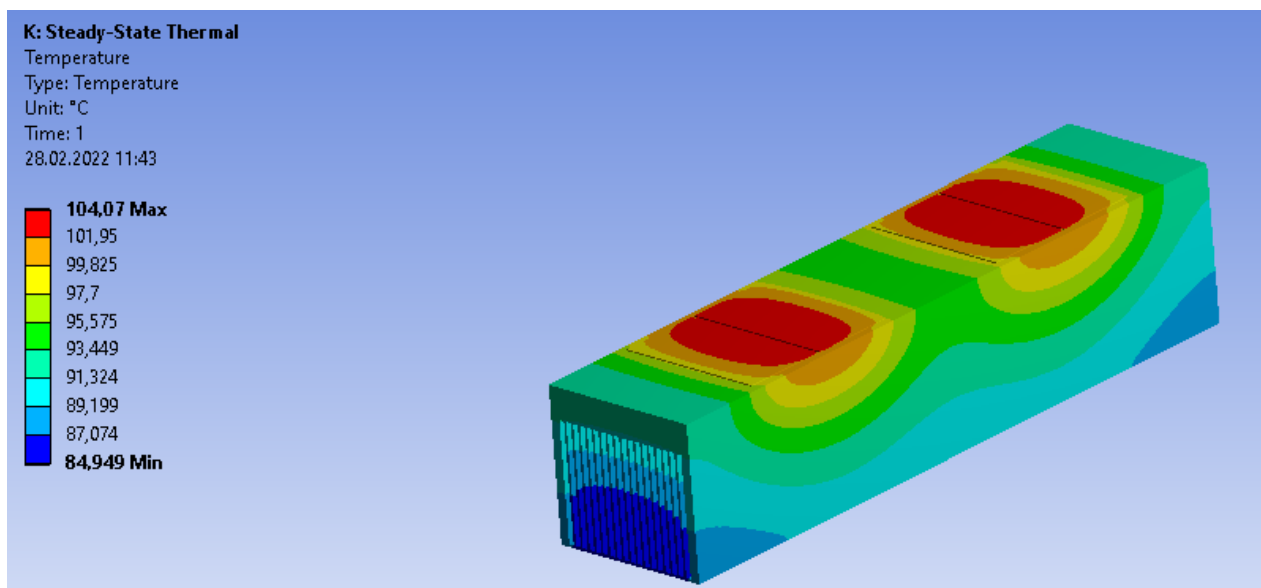


Рис. 4. Тепловой расчет охладителя при постоянной температуре окружающей среды $400 \text{ }^\circ\text{C}$

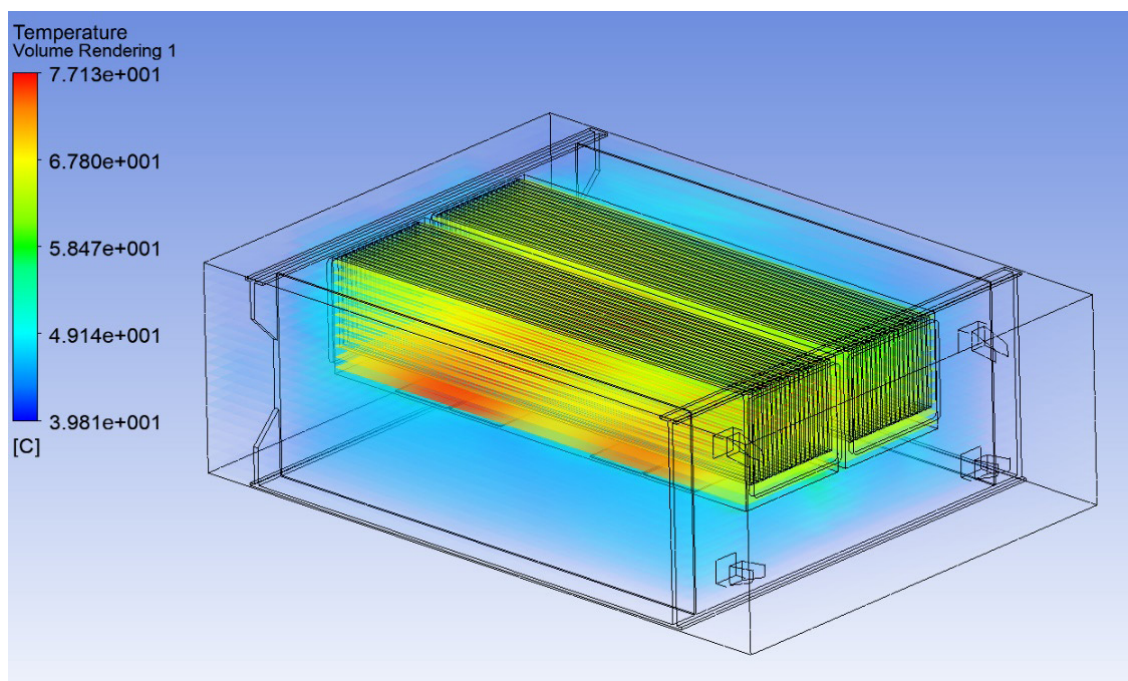


Рис. 5. Тепловой расчет силового модуля

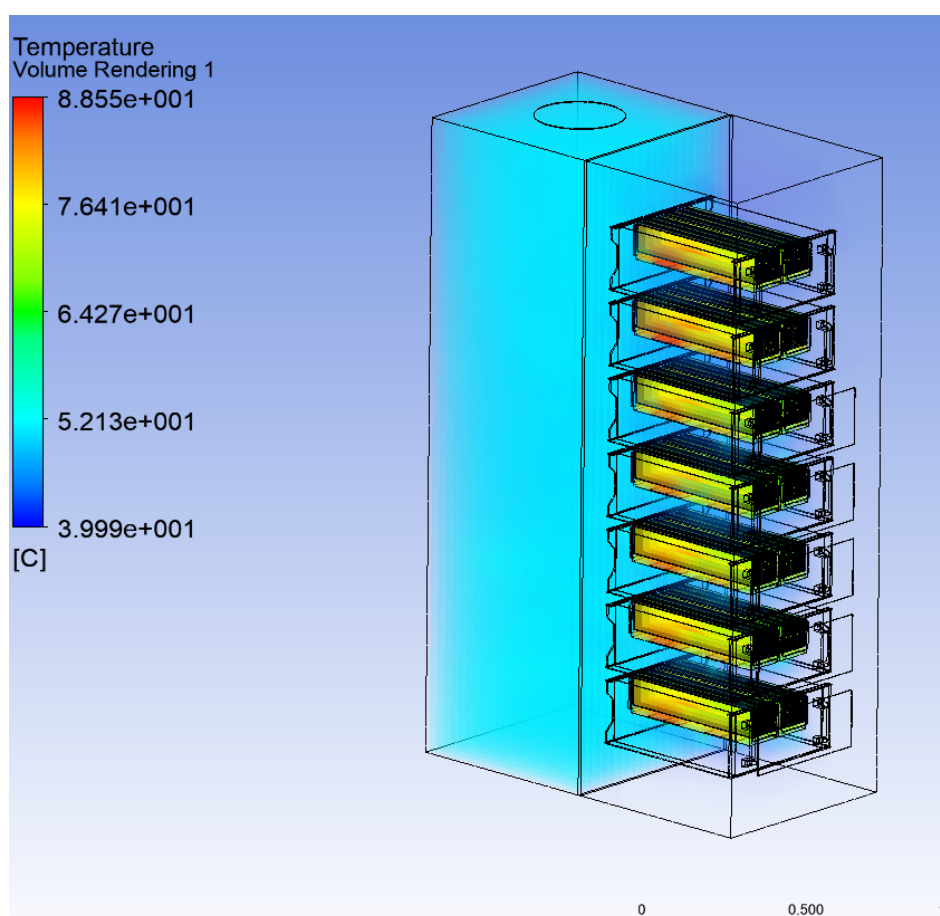


Рис. 6. Тепловой расчет ШП с установленными силовыми модулями

Суммарные потери преобразователя (СГРМ)

Рассчитаем потери на тепловую энергию в преобразователе (СГРМ) при расчетной мощности 10 Мвар:

$$P_{\text{СГРМ}} = P_{\text{ШП}} \cdot n, \quad (9)$$

где n — количество шкафов в преобразователе, шт.

$$P_{\text{СГРМ}} = 13\,115,2 \cdot 9 = 118\,036 \text{ Вт} = 118,03 \text{ кВт.}$$

Компоновочные решения КФКУ и выводы

Как показывают расчеты и практический опыт, потери на тепловую энергию только в одном преобразователе (СГРМ), состоящем из девяти шкафов, при номинальной мощности 10 Мвар, составляют более 120 кВт (с учетом потерь на нагрев шин и конденсаторов).

Для полноты расчета тепловых потерь рассмотрим вариант планировки КФКУ, рис. 7, где определим тепловые потери в остальных компонентах устройства.

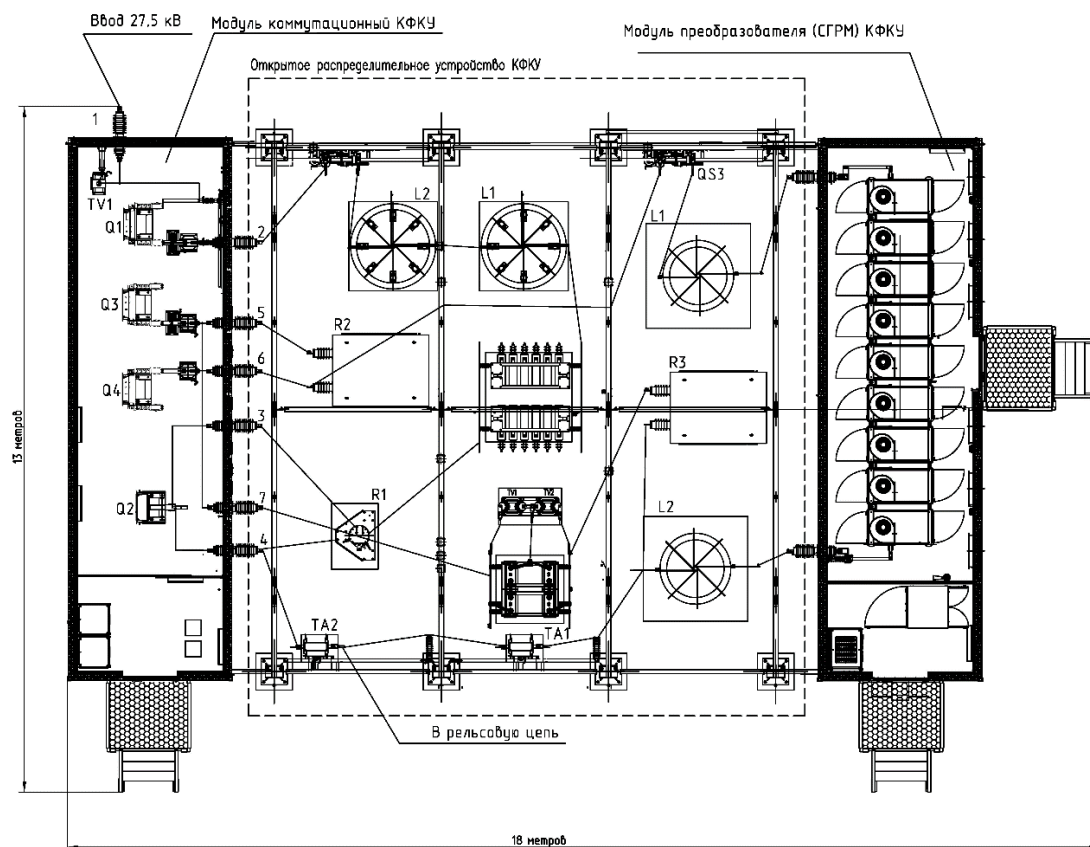


Рис. 7. Планировка оборудования КФКУ

Конденсаторная батарея (статический фильтр) состоит из 20 шт. конденсаторов типа КЭПФ-8,5-300-2УХЛ1 ОАО СКЗ КВАР (4,6 Мвар по первой гармонике).

Средние потери в стационарном режиме при номинальном напряжении и частоте и температуре окружающего воздуха 20 °С — 0,13 Вт/квар. Потери в конденсаторной батарее (4,6 Мвар) будут составлять: 0,13 Вт/квар · 4600 квар ≈ 600 Вт.

При номинальной мощности в стационарном фильтре 10 Мвар потери будут ≈ 1,3 кВт.

Реактор фильтровый типа РФОС-35-220-81 У1.

Потери в фазе реактора при номинальном токе (170 А — 50 Гц и 140 А — 150 Гц) с учетом высших гармоник и при температуре обмоток реактора не более 115 °С ≈ 23,7 кВт.

В КФКУ применяется четыре таких реактора, где суммарные потери в реакторах будут ≈ 94,8 кВт.

Ошиновка КФКУ (ФУ 10 Мвар + СГРМ 10 Мвар) состоит из медного провода М300. Сечение: $S = 300 \text{ мм}^2$. Длина: $L = 75 \text{ м}$.

Активное сопротивление ошиновки:

$$R_{\text{ош}} = \rho \cdot \frac{L}{S}, \quad (10)$$

где ρ — удельное сопротивление меди, Ом · мм²/м;

L — длина ошиновки, м;

S — площадь поперечного сечения проводника ошиновки, мм².

$$R_{\text{ош}} = 0,017 \cdot \frac{75}{300} = 4,26 \text{ мОм.}$$

Активные потери в ошиновке:

$$P_{\text{ош}} = I^2 R_{\text{ош}}, \quad (11)$$

где I — рабочий ток, А.

$$P_{\text{ош}} = 400^2 \cdot 4,26 \cdot 10^{-3} \approx 750 \text{ Вт.}$$

Таким образом, суммарные потери на тепловую энергию КФКУ будут равны: 120 кВт (СГРМ) + 1,3 кВт (конденсаторная батарея) + 94,8 кВт (реакторы) + 0,75 кВт (ошиновка), т. е. 216,85 кВт.

Заключение

Расчет потерь на тепловую энергию в КФКУ в наиболее тяжелом режиме работы как минимум в 1,5 раза меньше потерь в типовом применяемом устройстве компенсации на базе IGBT. При этом при номинальных значениях мощности компенсации потери в контактной сети снижаются на 10–15 %. Выполненный расчет тепловых потерь показывает о возможности применения воздушного охлаждения, однако на более мощных преобразователях (свыше 15 Мвар) необходимо использовать жидкостное охлаждение.

Библиографический список

1. Патент № 2790740 Российская Федерация. Устройство управления комбинированной установкой поперечной емкостной компенсации / Л. А. Герман, А. А. Максимова, А. А. Карabanов. опубли. 28.02.2023. Бюл. № 7.
2. Герман Л. А. Автоматизация электроснабжения тяговой сети переменного тока / Л. А. Герман, К. С. Субханвердиев, Л. А. Герман // Режимная автоматика. Часть 2. — Нижний Новгород: СамГУПС, 2020. — 85 с.
3. Железко Ю. С. Потери электроэнергии реактивная мощность качество электроэнергии / Ю. С. Железко // Руководство для практических расчетов. — М.: ЭНАС, 2009. — 70 с.
4. ANSYS — универсальная программная система анализа методом конечных элементов для решения пространственных задач, теплопередачи, теплообмена, а также механики и гидравлики. Версия ПО — ANSYS 18.2. Вертакова Ю. В. Альтернативная энергетика. Развитие зеленой экономики в энергетике // Энергетическая безопасность: сб. науч. ст. II Междунар. молодежного конгресса. — Курск: ЗАО «Университетская книга», 2017. — С. 24–26.

Дата поступления: 03.04.2023

Решение о публикации: 25.04.2023

Контактная информация:

АГУНОВ Александр Викторович — д-р техн. наук, проф.; alexagunov@mail.ru

КАРАБАНОВ Артем Александрович — инженер-электромеханик; karabanov.art@yandex.ru

ТЕРЕХИН Илья Александрович — канд. техн. наук, доц.; terekhin@pgups.ru

БАРАНОВ Иван Александрович — аспирант; baranov@pgups.ru

Calculation of Heat Losses in The Combined Filter-Compensating Unit

A. V. Agunov¹, A. A. Karabanov², I. A. Terekhin¹, I. A. Baranov¹

¹Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

²NIIEFA-ENERGO, LLC, 3/2, Industrial zone “Metallostroy”, Metallostroy Village, St. Petersburg, 196641, Russian Federation

For citation: Agunov A. V., Karabanov A. A., Terekhin I. A., Baranov I. A. Calculation of Heat Losses in The Combined Filter-Compensating Unit. *Bulletin of scientific research results*, 2023, iss. 2, pp. 92–103. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2023-2-92-103

Summary

Purpose: To calculate heat losses in the combined filter-compensating unit and to assess the possibility of using air cooling. **Methods:** Mathematical and computer modeling are used to calculate heat losses of combined filter-compensating unit with regard to the main parameters of the converter. **Results:** The paper presents schemes and the main differences of reactive power compensation installations, used nowadays on the electrified sections of railroads. The calculation of thermal losses of combined filter-compensating installation with regard to the main parameters of the Static Var Generator (SVG) converter on the basis of IGBT transistors has been performed. In the software package ANSYS 18.2 a simulation model of the converter cabinet has been developed and the thermal calculation of the cooler has been performed. **Practical significance:** Results of calculation of thermal losses confirmed the possibility of using air cooling in the presented combined filter-compensating unit with capacity up to 15 Mvar.

Keywords: Combined filter-compensating unit, reactive power compensation device, reactive power compensation, static reactive power generator, calculation of heat losses, IGBT transistor, heat losses, air cooling.

References

1. German L. A., Maksimova A. A., Karabanov A. A. *Ustroystvo upravleniya kombinirovannoy ustanovkoy poperechnoy emkostnoy kompensatsii* [Control device for a combined installation of transverse capacitive compensation]. Patent RF, no. 2790740, 2023. (In Russian)
2. German L. A., Subkhanverdiev K. S., German L. A. *Avtomatizatsiya elektrosnabzheniya tyagovoy seti peremennogo toka* [Automation of power supply of the AC traction network]. *Rezhimnaya avtomatika. Chast' 2* [Regime automatics. Part 2]. Nizhniy Novgorod: SamGUPS Publ., 2020, 85 p. (In Russian)
3. Zhelezko Yu. S. *Poteri elektroenergii reaktivnaya moshchnost' kachestvo elektroenergii* [Energy losses reactive power quality of electricity]. *Rukovodstvo dlya prakticheskikh raschetov* [Guide for practical calculations]. Moscow: ENAS Publ., 2009, 70 p. (In Russian)
4. *ANSYS — universal'naya programmnaya sistema analiza metodom konechnykh elementov dlya resheniya prostranstvennykh zadach, teploperedachi, teploobmena, a takzhe mekhaniki i gidravliki. Versiya PO — ANSYS 18.2.* Vertakova Yu. V. *Al'ternativnaya energetika. Razvitie zelenoy ekonomiki v energetike. Energeticheskaya bezopasnost': sb. nauch. st. II Mezhdunar. molodezhnogo kongressa* [ANSYS is a universal software system for finite element analysis for solving spatial problems, heat transfer, heat transfer, as well as mechanics and hydraulics. The software version is ANSYS 18.2. Vertakova Yu. V. Alternative energy. Development of green economy in the energy sector. Energy security: coll. scientific Art. II Intern. youth congress]. Kursk: ZAO "Universitetskaya kniga" Publ., 2017, pp. 24–26. (In Russian)

Received: April 03, 2023

Accepted: April 25, 2023

Author's information:

Alexander V. AGUNOV — Dr. Sci. in Engineering, Professor; alexagunov@mail.ru

Artem A. KARABANOV — Electrical Mechanical Engineer; karabanov.art@yandex.ru

Ilya A. TEREKHIN — PhD in Engineering, Associate Professor; terekhin@pgups.ru

Ivan A. BARANOV — Postgraduate Student; baranov@pgups.ru

УДК 621.337.41

Повышение эффективности электропривода электровоза с управляемым преобразователем возбуждения тяговых двигателей

Н. Л. Михальчук¹, Ю. И. Попов², А. Н. Савоськин³, О. Е. Пудовиков³, А. А. Чучин³

¹Дирекция тяги — филиал ОАО «Российские железные дороги», Российская Федерация, 107174, Москва, Басманный тупик, ба/4

²Проектно-конструкторское бюро локомотивного хозяйства — филиал ОАО «Российские железные дороги», Российская Федерация, 105066, Москва, Ольховский пер., 205

³Российский университет транспорта, Российская Федерация, 127994, Москва, ул. Образцова, 9/9

Для цитирования: Михальчук Н. Л., Попов Ю. И., Савоськин А. Н., Пудовиков О. Е., Чучин А. А. Повышение эффективности электропривода электровоза с управляемым преобразователем возбуждения тяговых двигателей // Бюллетень результатов научных исследований. — 2023. — Вып. 2. — С. 104–114. DOI: 10.20295/2223-9987-2023-2-104-114

Аннотация

Цель: Выполнить обоснование схемотехнического решения и алгоритмов индивидуального плавного и автоматического управления электровозами однофазно постоянного тока по законам постоянства силы тяги и постоянства мощности без разрыва силовых электрических цепей электровоза для повышения эффективности его электропривода с управляемыми преобразователями возбуждения тяговых двигателей. В качестве схемотехнического решения предложено применить силовую электрическую схему с двумя выпрямительно-инверторными преобразователями на каждую секцию электровоза для потележечного управления силой тяги и индивидуальные управляемые мостовые транзисторные преобразователи, шунтирующие обмотки возбуждения, для поосного управления силой тяги в пределах каждой тележки. **Методы:** Разработки схемотехнических решений с применением современных силовых полупроводниковых преобразователей; теории автоматического управления и проектирования конечных автоматов; математического моделирования электромагнитных, электромеханических и механических процессов. **Результаты:** Разработанные алгоритмы управления обеспечивают возможность получения тяговых характеристик электровоза, изменяющихся по законам постоянства силы тяги или постоянства мощности, приближающих тяговые характеристики электровозов с коллекторными тяговыми электродвигателями к характеристикам электровозов с асинхронными тяговыми электродвигателями. Выполненные расчеты подтвердили возможность реализации алгоритмом индивидуального управления токами тяговых двигателей и токами их возбуждения, а также силами тяги, что обеспечивает плавное нарастание силы тяги электровоза. **Практическая значимость:** Разработанные технические решения, применимые при изготовлении современных и модернизации эксплуатируемых электровозов, обеспечат повышение тяговых свойств электровозов однофазно постоянного тока и будут способствовать увеличению пропускной и провозной способности сети железных дорог.

Ключевые слова: Электропривод электровозов однофазно постоянного тока, независимое возбуждение коллекторных тяговых электродвигателей, управляемый полупроводниковый транзисторный преобразователь возбуждения, алгоритмы управления.

В соответствии с указом президента Российской Федерации «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года» от 7 мая 2018 г. № 204 предусмотрено развитие Восточного полигона

с увеличением пропускной способности Байкало-Амурской и Транссибирской железнодорожных магистралей до 180 млн тонн в год [1, 2].

Для реализации поставленных задач необходимо выполнить разработку и внедрение на полигонах обращения локомотивов нового поколения для вождения поездов 7100–8000 тонн и более с улучшенными тяговыми и энергетическими характеристиками, обеспечивающими повышенный КПД и коэффициент мощности, снижение расхода электроэнергии на 15 % против существующих аналогов.

В связи с этим становятся актуальными исследования по максимальному использованию тяговых свойств локомотивов с разработкой технических решений, обеспечивающих изменяемую жесткость тяговых характеристик, повышение уровня устойчивости к буксованию, снижению энергетических потерь, внедрение современных систем автоматического управления. Поиск таких решений совершался и ранее [3–5].

В 2013 году на Новочеркасском электровозостроительном заводе разработан ЗЭС5К «Ермак» № 434, и с июля 2019 года выпускается модификация этих электровозов с поосным регулированием силы тяги [6, 7]. На каждой секции этих электровозов установлены четыре ВИПа с четырьмя сглаживающими реакторами для индивидуального питания каждого тягового электродвигателя (ТЭД), а также один выпрямитель возбуждения для независимого возбуждения ТЭД в режимах тяги и рекуперативного торможения (рис. 1).

Испытания этого электровоза на наиболее сложном профиле пути Восточно-Сибирской железной дороги на участке Тайшет — Таксимо, а также на участках Транссиба показали, что у этих электровозов имеется ряд существенных недостатков. Так, например, посекционный переход в независимое возбуждение тяговых электродвигателей при снижении скорости до 55 км/ч сопровождается размыканием силовой цепи секции электровоза. При этом сила тяги этой секции становится равна нулю, что сопровождается снижением силы тяги при переходе в независимое возбуждение одной секции на 455 кН, на двух секциях — на 549 кН и на трех секциях — на 780 кН (рис. 2) [8].

Такое скачкообразное уменьшение силы тяги вызывает резкие изменения продольных динамических сил в автосцепках, вызывающих появление продольных ударов в поезде.

Для исключения этих недостатков в настоящей работе предложено техническое решение (рис. 3) на основе применения индивидуальных управляемых мостовых транзисторных преобразователей возбуждения (УПВ), которые шунтируют каждую обмотку возбуждения (ОВ) [5, 9]. Эти УПВ подключены к отдельным источникам питания, от отдельных секций вторичных обмоток тягового трансформатора и могут работать как в режиме тяги, так и в режиме рекуперации без разрыва силовой цепи, обеспечивая индивидуальное автоматическое управление токами возбуждения и реализуя заданную жесткость тяговых характеристик.

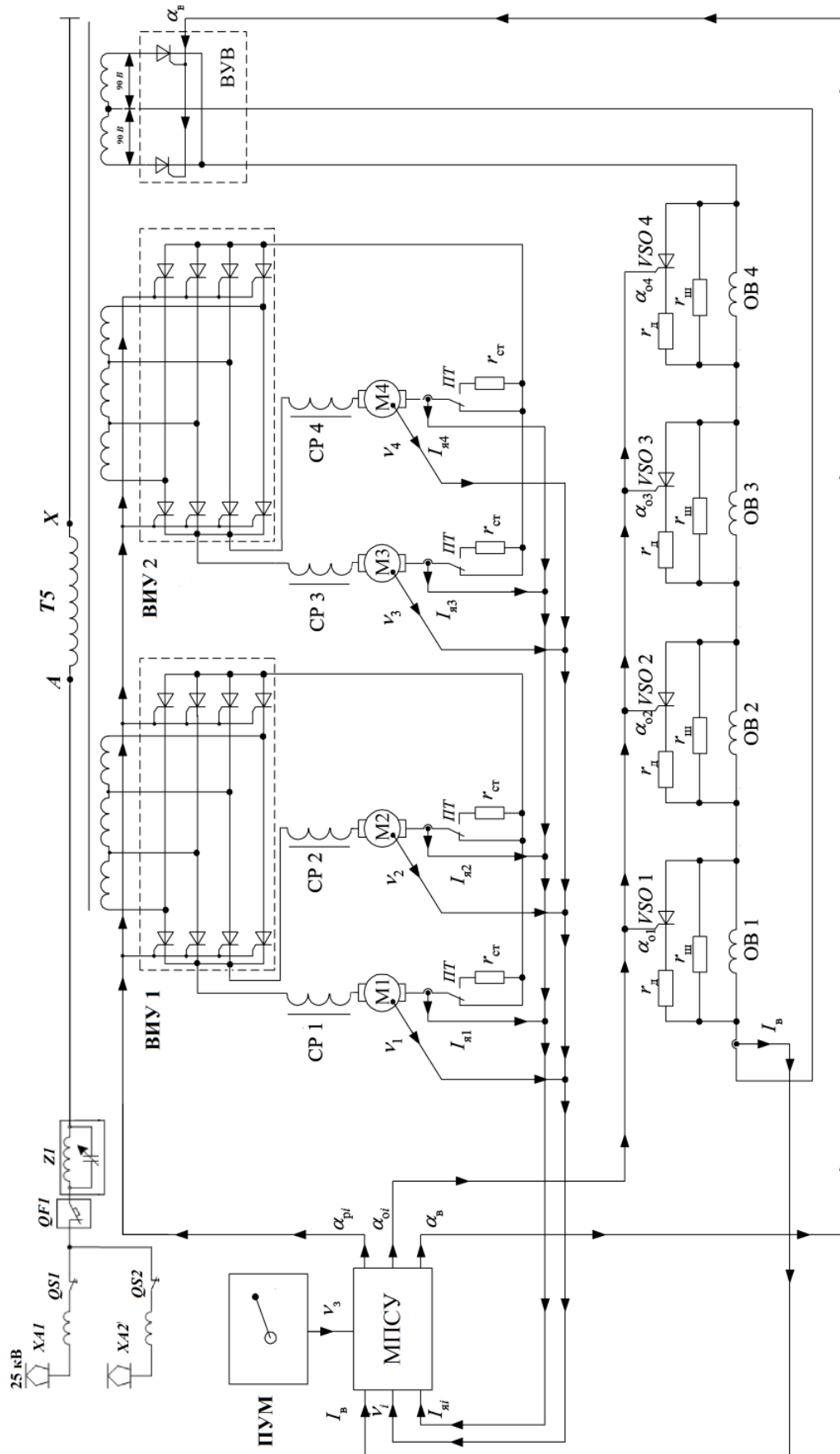


Рис. 1. Упрощенная схема силовых цепей секции эксплуатируемого электровоза 3ЭС5К с управляемыми преобразователями возбуждения

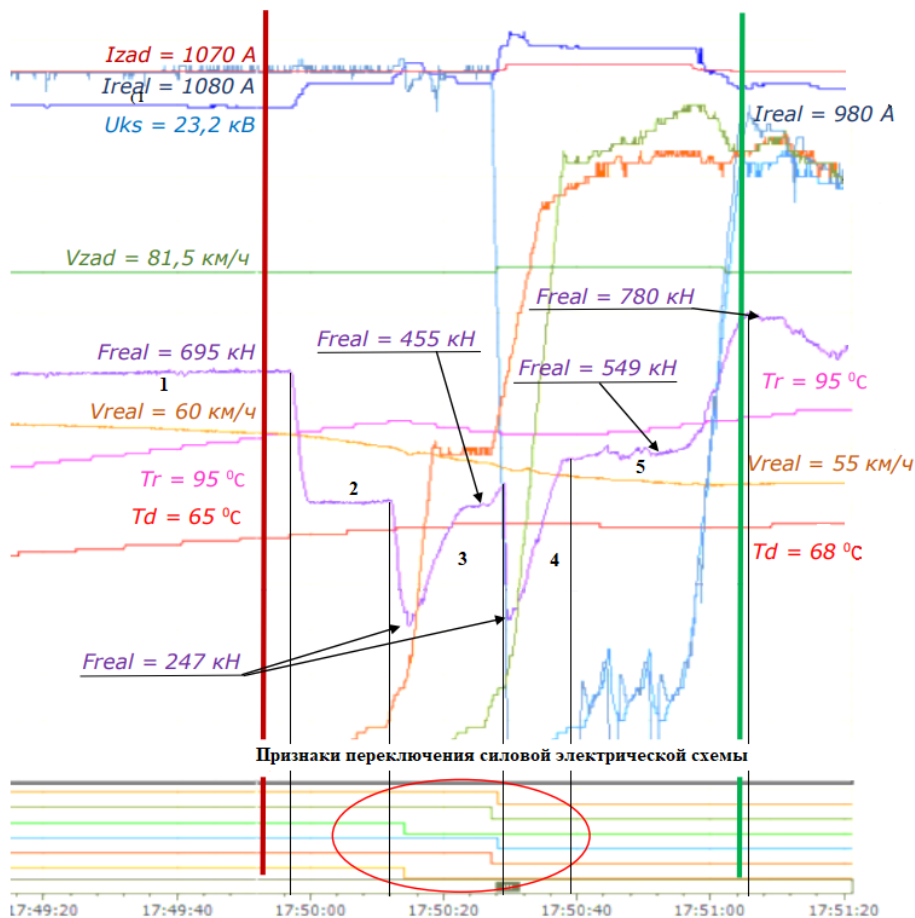


Рис. 2. Регистрация параметров снижения силы тяги электровоза при движении на критическом подъеме

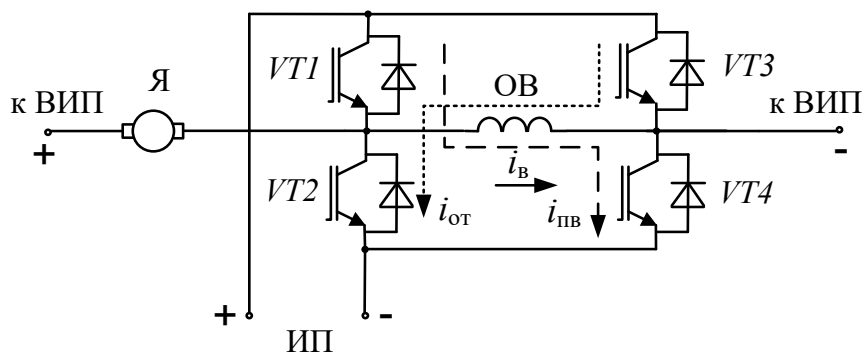


Рис. 3. Схема мостового управляемого преобразователя (УПВ)

В силовой схеме электровоза (рис. 4) предусмотрено использование традиционной схемы питания двух тяговых электродвигателей (ТЭД) от отдельного выпрямительно-инверторного преобразователя (ВИП) [8–13]. Предлагаемая силовая схема электровоза обеспечивает возможность системе автоматического управления выполнять индивидуальное управление ВИПами для потележечного управления силой тяги, а также индивидуальное управление УПВ для индивидуального поосного управления силой тяги в пределах каждой тележки. Кроме того, возможна

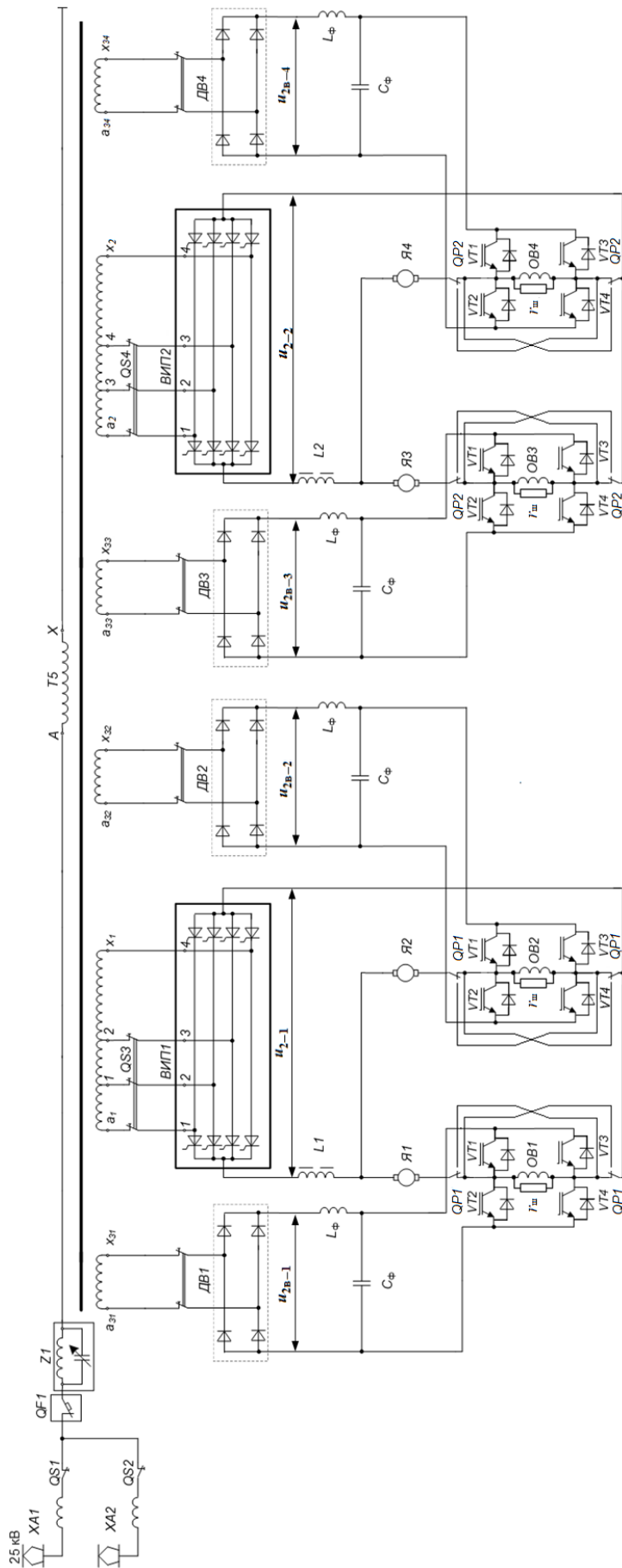


Рис. 4. Упрощенная схема силовых цепей электровоза с управляемыми преобразователями возбуждения

реализация режимов независимого и последовательного возбуждения ТЭД, соответствующих характеристикам постоянства силы тяги или бустерным характеристикам повышенной силы тяги, а также характеристикам постоянства мощности.

Еще одно существенное преимущество новой силовой схемы электровоза состоит в том, что предложенный способ управления токами возбуждения ТЭД от индивидуальных преобразователей УПВ позволяет выполнять переходы на режимы независимого и последовательного возбуждения без разрыва силовой цепи и, следовательно, без потери силы тяги.

При включении транзисторов $VT1$ и $VT4$ (рис. 3, 4) будет происходить подпитка обмотки возбуждения током $i_{пв}$ от независимого источника питания. Если же включить вентили $VT2$ и $VT3$, то будет происходить отпитка обмотки возбуждения током $i_{ов}$ от того же источника. Используя токи подпитки и отпитки, можно обеспечить режимы работы тягового двигателя с независимым возбуждением, изменяя эти токи так, чтобы алгебраическая сумма этих токов и тока возбуждения двигателя i_b была постоянной и заданному значению тока независимого возбуждения $i_{нв}$:

$$i_{нв} = i_b + i_{пв} = \text{const}, \quad (1)$$

который может быть больше или меньше, чем i_b .

Управление электровозом на основе (1) позволит реализовать тяговую характеристику, изменяющуюся по закону постоянства силы тяги с различными значениями $F_k = \text{const}$.

При реализации режима отпитки можно также обеспечивать работу тягового двигателя в режиме последовательного возбуждения с уменьшением тока возбуждения («ослабления» поля):

$$i_{пв} = i_b - i_{ов} = \beta i_b, \quad (2)$$

где $i_{ов} = (1 - \beta)i_b$, а β — коэффициент уменьшения тока возбуждения (коэффициент «ослабления» поля).

Управление электровозом на основе (2) позволит реализовать тяговую характеристику, изменяющуюся по закону постоянства мощности.

И наконец, если не включать вентили УПВ, то тяговый двигатель будет работать в обычном режиме последовательного возбуждения.

Алгоритм управления электровозом, реализованный в контроллере машиниста, предусматривает поочередное включение ТЭД отдельных тележек каждой секции электровоза. Это обусловлено тем, что при трогании происходит перераспределение вертикальных нагрузок, передаваемых от колесных пар на рельсы, вызванных двумя причинами. Первой причиной является то, что передача силы тяги от секции

на состав происходит через автосцепку, расположенную на высоте h_a от центра масс кузова, в результате чего возникает момент, поворачивающий кузов. При этом задние тележки дополнительно догружаются, а передние — разгружаются.

Второй причиной является то, что изменение вертикальных нагрузок колесных пар возникает при развитии вращающего момента ТЭД из-за действия реакций, передаваемых от остовов двигателей через их подвески к рамам тележек. Из-за совместного действия двух этих причин разгрузки колесных пар можно считать, что первая ось первой тележки каждой секции электровоза (первый ТЭД) реализует силу тяги, меньшую на 10 %, вторая ось (второй ТЭД) реализует силу тяги, меньшую на 5 %. Тогда третий и четвертый ТЭД реализуют силы тяги на 5 и 10 % большие, чем сила тяги секции электровоза.

Учет влияния этих условий вызывает необходимость поочередного включения в работу вначале задних тележек последней секции электровоза, затем предыдущей и т. д. После того как все задние тележки включатся в работу, в такой же последовательности будут включаться в работу и передние тележки этих секций.

Для проверки предложенного алгоритма управления были выполнены расчеты электромагнитных и электромеханических процессов изменения токов двигателей, токов подпитки и сил тяги ТЭД [11–13]. Для примера рассмотрим процесс набора силы тяги при трогании трех секционного электровоза (рис. 5). Из этого рисунка видно, что после того, как произошло увеличение силы тяги шестой тележки, в работу включается четвертая, потом вторая, а затем уже пятая, третья и первая.

В результате такого плавного процесса трогания создаются наилучшие условия для реализации сцепления колес с рельсами.

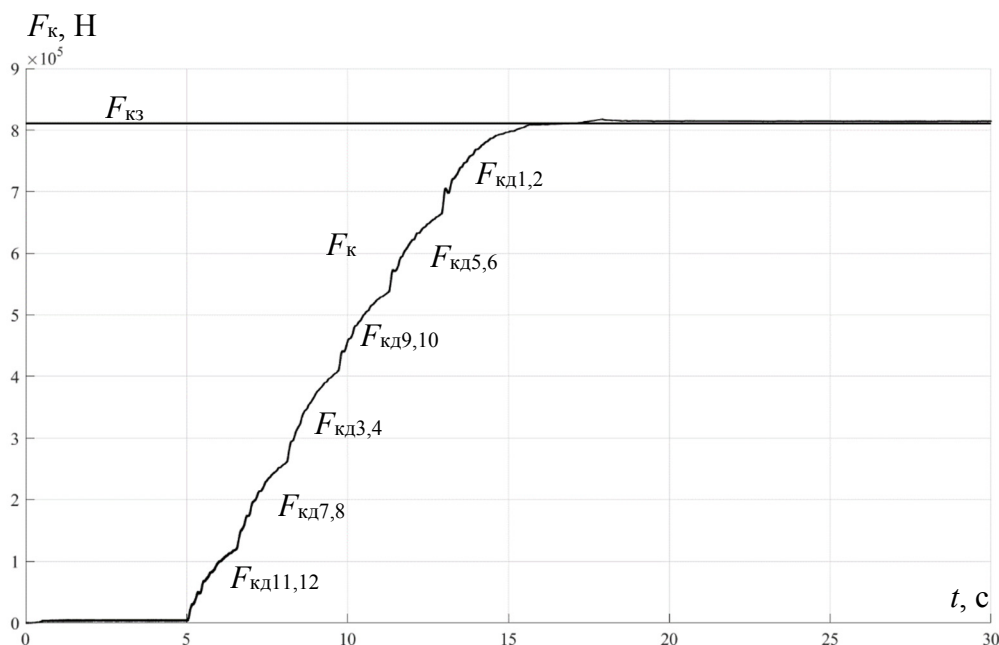


Рис. 5. График изменения силы тяги электровоза

Выводы

1. Применение управляемых транзисторных преобразователей (УПВ) позволяет выполнять плавное управление токами возбуждения для реализации характеристик последовательного и независимого возбуждения без разрыва силовой цепи.

2. Применение УПВ совместно с типовой схемой питания двигателей одной тележки от отдельного ВИПа позволяет реализовать схемы плавного потележечного и поосного (в пределах каждой тележки) управления силой тяги электровоза без размыкания силовой цепи.

3. Предложенные силовая схема и законы управления токами возбуждения позволяют реализовать тяговые характеристики, изменяющиеся по законам постоянства силы тяги и постоянства мощности, что приближает электровозы с коллекторными тяговыми электродвигателями к электровозам с асинхронными тяговыми двигателями.

4. Проверка предложенного алгоритма поосного управления силой тяги показала, что такой алгоритм обеспечивает плавное увеличение этой силы и создает лучшие условия для сцепления колес электровоза с рельсами.

Библиографический список

1. Указ президента Российской Федерации «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года» от 7 мая 2018 г. № 204.
2. Распоряжение Правительства РФ от 30 сентября 2018 г. № 2101-р (ред. от 9 декабря 2022 г.) «Об утверждении комплексного плана модернизации и расширения магистральной инфраструктуры на период до 2024 года».
3. Головатый А. Т. Авторское свидетельство № 393138. СССР, МПК В60L 9/12. Электрический привод локомотива / А. Т. Головатый, Л. Я. Финкельштейн, Н. Л. Шамраев и др. — Заявл. 10.06.1971; опубл. 07.07.1984. — Бюл. № 25.
4. Головатый А. Т. Независимое возбуждение тяговых двигателей электровозов / А. Т. Головатый, И. П. Исаев, Е. В. Горчаков. — М.: Транспорт, 1976. — 152 с.
5. Бабков Ю. В. Патент № 2399514. Российская Федерация, МПК В60L 11/06. Тяговый электропривод транспортного средства / Ю. В. Бабков, Ю. И. Клименко, Ю. А. Варегин, Е. Г. Суркова. — Заявл. 13.05.2009; опубл. 20.09.2010. — Бюл. № 26.
6. Задорожный В. Л. Особенности электровозов серии «Ермак» с поосным регулированием силы тяги / В. Л. Задорожный // Локомотив. — 2019. — № 10. — С. 11–16.
7. Электровоз магистральный 2ЭС5К (ЗЭС5К). Руководство по эксплуатации / Новочеркасский электровазостроительный завод. — Новочеркасск, 2007. — Т. 1, 635 с. — Т. 2, 640 с.
8. Михальчук Н. Л. Электровоз с плавным управлением в режимах независимого и последовательного возбуждения тяговых электродвигателей / Н. Л. Михальчук, О. Е. Пудовиков, А. Н. Савоськин и др. // Железнодорожный транспорт. — 2022. — № 9. — С. 35–39.

9. Михальчук Н. Л. Силовая схема электровоза переменного тока с применением управляемого транзисторного преобразователя возбуждения / Н. Л. Михальчук, А. Н. Савоськин, А. А. Чучин // *Электроника и электрооборудование транспорта*. — 2022. — № 3. — С. 18–22.

10. Попов Ю. И. Патент № 2788223. Российская Федерация, МПК В60L 9/02, В60L 9/12, H02P 7/28. Электрический привод электровоза / Ю. И. Попов, Н. Л. Михальчук, А. Н. Савоськин и др. — Заявл. 22.10.2022; опубл. 17.01.2023. — Бюл. № 2.

11. Евсеев В. Ю. Математическая модель коллекторного тягового двигателя с раздельным учетом вихревых токов главных и добавочных полюсов / В. Ю. Евсеев, А. Н. Савоськин // *Электротехника*. — 2020. — № 9. — С. 32–38.

12. Михальчук Н. Л. Электромагнитные процессы в силовой схеме электровоза с управляемым преобразователем возбуждения / Н. Л. Михальчук, А. Н. Савоськин, А. А. Чучин // *Электротехника*. — 2022. — № 9. — С. 34–42. — DOI: 10.53891/00135860.2022.9.34-42.

13. Попов Ю. И. Патент № 2787135. Российская Федерация, МПК G05F 1/10. Способ автоматического управления током тяговых электродвигателей подвижного состава / Ю. И. Попов, Н. Л. Михальчук, А. Н. Савоськин и др. — Заявл. от 29.03.2022; опубл. 29.12.2022. — Бюл. № 1.

Дата поступления: 06.05.2023

Решение о публикации: 25.05.2023

Контактная информация:

МИХАЛЬЧУК Николай Львович — канд. техн. наук; MihalchukNL@center.rzd.ru

ПОПОВ Юрий Иванович — канд. техн. наук; Popov@pkbct.ru

САВОСЬКИН Анатолий Николаевич — д-р техн. наук, проф.

ПУДОВИКОВ Олег Евгеньевич — д-р техн. наук, доц.

ЧУЧИН Антон Александрович — канд. техн. наук, доц.

Improving the Efficiency of the Electric Locomotive Drive with a Controllable Converter for Traction Motor Excitation

N. L. Mihalchuk¹, Yu. I. Popov², A. N. Savoskin³, O. E. Pudovikov³, A. A. Chuchin³

¹Joint Stock Company “Russian Railways” (JSCo “RZD”), Directorate of Locomotive Traction, 6a/4, Basmanny tupik, Moscow, 107174, Russian Federation

²Joint Stock Company “Russian Railways” (JSCo “RZD”), Locomotive Engineering Drafting Bureau, 205, Olkhovskiy pereulok, Moscow, 105066, Russian Federation

³Russian University of Transport, 9/9, Obraztsova str., Moscow, 127994, Russian Federation

For citation: Mihalchuk N. L., Popov Yu. I., Savoskin A. N., Pudovikov O. E., Chuchin A. A. Improving the Efficiency of the Electric Locomotive Drive with a Controllable Converter for Traction Motor Excitation. *Bulletin of scientific research results*, 2023, iss. 2, pp. 104–114. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2023-2-104-114

Summary

Purpose: To substantiate the circuit design and algorithms for individual smooth and automatic control of single-phase direct current electric locomotives according to the laws of constant traction force and constant power without breaking the electric locomotive power circuits in order to increase the efficiency of its electric drive with controllable traction motor excitation converters. As a circuit design solution, it is proposed to apply a power electrical circuit with two rectifier-inverter converters for each section of the electric locomotive for bogie-based traction control, as well as individually controlled bridge transistor converters, shunting field windings, for axial traction control within each bogie. **Methods:** The development of circuit solutions using modern power semiconductor converters; theory of automatic control and design of finite state machines; mathematical modeling of electromagnetic, electromechanical and mechanical processes. **Results:** The developed control algorithms provide the possibility of obtaining traction characteristics of an electric locomotive that vary according to the laws of constancy of traction force or constancy of power, bringing the traction characteristics of electric locomotives with collector traction motors to the characteristics of electric locomotives with asynchronous traction motors. The calculations performed confirmed the possibility of implementing an algorithm for individual control of traction motor currents and their excitation currents, as well as traction forces, which ensures a smooth increase in the traction force of an electric locomotive. **Practical significance:** The developed technical solutions applicable in the manufacture of modern and modernization of operated electric locomotives will ensure an increase in the traction properties of single-phase DC electric locomotives and will contribute to an increase in the throughput and carrying capacity of the railway network.

Keywords: Electric drive of single-phase DC electric locomotives, independent excitation of collector traction motors, controlled semiconductor transistor excitation converter, control algorithms.

References

1. Ukaz prezidenta Rossiyskoy Federatsii "O natsional'nykh tselyakh i strategicheskikh zadachakh raz-vitiya Rossiyskoy Federatsii na period do 2024 goda" ot 7 maya 2018 g. № 204 [Decree of the President of the Russian Federation "On the national goals and strategic objectives of the development of the Russian Federation for the period up to 2024" dated May 7, 2018 № 204]. (In Russian)
2. Rasporyazhenie Pravitel'stva RF ot 30 sentyabrya 2018 g. № 2101-r (red. ot 9 dekabrya 2022 g.) "Ob utverzhdenii kompleksnogo plana modernizatsii i rasshireniya magistral'noy infrastruktury na period do 2024 goda" [Decree of the Government of the Russian Federation of September 30, 2018 № 2101-r (as amended on December 9, 2022) "On approval of a comprehensive plan for the modernization and expansion of the main infrastructure for the period up to 2024"]. (In Russian)
3. Golovatyy A. T., Finkel'shteyn L. Ya., Shamraev N. L. et al. *Avtorskoe svidetel'stvo № 393138. SSSR, MPK B60L 9/12. Elektricheskiy privod. Zayavl. 10.06.1971 g.; opubl. 07.07.84 g. Byul. № 25* [Copyright certificate № 393138. USSR, IPC B60L 9/12. Electric locomotive drive. Appl. 06.10.1971; publ. 07.07.84, Bull. № 25]. (In Russian)
4. Golovatyy A. T., Isaev I. P., Gorchakov E. V. *Nezavisimoe возбуждение тяговых двигателей электровозов* [Independent excitation of traction motors of electric locomotives]. Moscow: Transport Publ., 1976, 152 p. (In Russian)
5. Babkov Yu. V., Klimenko Yu. I., Vargin Yu. A. et al. *Tyagovyy elektroprivod transportnogo sredstva* [Traction electric drive of a vehicle]. Patent RF, no. 2399514. (In Russian)

6. Zadorozhnyy V. L. Osobennosti elektrovozov serii “Ermak” s poosnym regulirovaniem sily tyagi [Features of electric locomotives of the Ermak series with axial control of the traction force]. *Lokomotiv* [Lokomotiv]. 2019, Iss. 10, pp. 11–16. (In Russian)
7. *Elektrovoz magistral'nyy 2ES5K (3ES5K). Rukovodstvo po ekspluatatsii. Novocherkasskiy elektrovozostroitel'nyy zavod* [Mainline electric locomotive 2ES5K (3ES5K). Operation manual. Novocherkassk Electric Locomotive Plant]. Novocherkassk, 2007, vol. 1, 635 p., vol. 2, 640 s. (In Russian)
8. Mikhal'chuk N. L., Pudovikov O. E., Savos'kin A. N. Elektrovoz s plavnym upravleniem v rezhimakh nezavisimogo i posledovatel'-nogo vzbuzhdeniya tyagovykh elektrodvigately [Electric locomotive with smooth control in the modes of independent and sequential excitation of traction motors]. *Zheleznodorozhnyy transport* [Zheleznodorozhny transport]. 2022, Iss. 9, pp. 35–39. (In Russian)
9. Mikhal'chuk N. L., Savos'kin A. N., Chuchin A. A. Silovaya skhema elektrovoza peremennogo toka s primeneniem upravlyaemogo tranzistornogo preobrazovatelya vzbuzhdeniya [Power circuit of an alternating current electric locomotive using a controlled transistor excitation converter]. *Elektronika i elektrooborudovanie transporta* [Electronics and electrical equipment of transport]. 2022, Iss. 3, pp. 18–22. (In Russian)
10. Popov Yu. I., Mikhal'chuk N. L., Savos'kin A. N. *Elektricheskiy privod elektrovoza* [Electric locomotive drive]. Patent RF, no. 2788223, 2023. (In Russian)
11. Evseev V. Yu., Savos'kin A. N. Matematicheskaya model' kollektornogo tyagovogo dvigatelya s razdel'nym uchetom vikhrevykh tokov glavnykh i dobavochnykh polyusov [Mathematical model of a collector traction motor with separate accounting for eddy currents of the main and additional poles]. *Elektrotehnika* [Electrical engineering]. 2020, Iss. 9, pp. 32–38. (In Russian)
12. Mikhal'chuk N. L., Savos'kin A. N., Chuchin A. A. Elektromagnitnye protsessy v silovoy skheme elektrovoza s upravlyaemym pre-obrazovatelem vzbuzhdeniya [Electromagnetic processes in the power circuit of an electric locomotive with a controlled excitation converter]. *Elektrotehnika* [Electrical engineering]. 2022, Iss. 9, pp. 34–42. DOI: 10.53891/00135860.2022.9.34-42. (In Russian)
13. Popov Yu. I., Mikhal'chuk N. L., Savos'kin A. N. *Sposob avtomaticheskogo upravleniya tokom tyagovykh elektrodvigately podvizhnogo sostava* [The method of automatic control of the current of traction electric motors of rolling stock]. Patent RF, no. 2787135. (In Russian)

Received: May 06, 2023

Accepted: May 25, 2023

Author's information:

Nikolay L. MIKHALCHUK — PhD in Engineering; MihalchukNL@center.rzd.ru

Yuri I. POPOV — PhD in Engineering; Popov@pkbct.ru

Anatoly N. SAVOSKIN — Dr. Sci. in Engineering, Professor

Oleg E. PUDOVIKOV — Dr. Sci. in Engineering, Associate Professor

Anton A. CHUCHIN — PhD in Engineering, Associate Professor

УДК 624.19

Исследование поперечной устойчивости высокоскоростного подвижного состава при выходе из тоннеля

Д. Д. Каримов, А. А. Воробьев, А. С. Ватаев, Я. С. Ватулин, К. А. Сотников

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

Для цитирования: Каримов Д. Д., Воробьев А. А., Ватаев А. С., Ватулин Я. С., Сотников К. А. Исследование поперечной устойчивости высокоскоростного подвижного состава при выходе из тоннеля // Бюллетень результатов научных исследований. — 2023. — Вып. 2. — С. 115–135. DOI: 10.20295/2223-9987-2023-2-115-135

Аннотация

Цель: Рассмотрено численное моделирование аэродинамического взаимодействия движущегося высокоскоростного состава с ветровой нагрузкой, приложенной к боковой поверхности корпусных элементов поезда, в процессе выхода его из тоннеля на открытое пространство. Оценена устойчивость подвижного состава по критерию минимального давления весовой нагрузки на колесо. **Методы:** CFD-моделирование позволяет значительно расширить объем информации о взаимодействии подвижного состава с набегающим воздушным потоком в различных условиях окружающей среды. **Результаты:** При численном моделировании получены значения давлений на поверхности корпусных элементов состава в зонах избыточного давления и зонах разряжения. Кроме того, определены площади приложения этих нагрузок на поверхности вагона. **Практическая значимость:** Установлено, что в случае превышения скорости воздушных масс на 20% выше максимально зафиксированных на местности северо-восточного плоскогорья правобережья г. Ангрена в преобладающем направлении ветра возможно недопустимое снижение весовой нагрузки на передней тележке на левом колесе.

Ключевые слова: Аэродинамический эффект, воздушное сопротивление, высокоскоростной подвижной состав, аэродинамика, давление на поверхность, устойчивость, тоннель.

Значительную часть современного рельефа правобережья р. Чирчика (Республика Узбекистан) представляет собой равнинную зону обширной площади. Эта зона состоит из долины р. Келеса, правобережья долин рек Чирчика, Сырдарьи, а также водораздельного пространства между реками Чирчиком и Келесом [1]. Ширина правобережной части долины реки на территории г. Чирчика составляет 2–4 км и вниз по течению она становится больше, достигая в пределах города Ташкента 7–9 км, а Янгиюля — 7–8 км. Абсолютные отметки поверхности вниз по течению уменьшаются от 650 (с. Азат-Баш) до 260 м (устьевая часть) (рис. 1).

Преобладающее направление ветра на плоскогорье северо-восточное, средняя скорость ветра — 1,8 м/с [1], максимальная скорость ветра достигает 29 м/с. Согласно розе ветров формируется воздушный поток, направленный ортогонально к боковой поверхности подвижного состава при выходе на открытое пространство пути (рис. 1).



Рис. 1. Рельеф местности правобережья г. Ангрена

В технических требованиях ЕС по технико-эксплуатационной совместимости (TSI) регламентируется устойчивость подвижного состава к воздействию бокового ветра и снижению риска схода с рельсов при определенных климатических условиях на специфических участках пути, например на мостах и насыпях.

Опрокидывающий момент [2–4], образованный результирующей воздействия ветровой нагрузки, относительно участка контакта головки рельса с поверхностью катания колеса значительно снижает давление на колесные пары, а, следовательно, эффективность процесса торможения. Критерием предельного снижения давления на колесные пары является понижение в пределах 10 % распределенного веса подвижного состава [5, 6].

Качественная картина поведения потоков воздушных масс несколько отличается от результатов [7–10], получаемых в аэродинамических трубах (масштабная модель 1:15 TGV Duplex в рабочей камере аэродинамической трубы (Франция)) (рис. 2), поскольку в данном эксперименте отсутствуют предметы окружения состава, в значительной степени меняющие поведение воздушной среды после взаимодействия с препятствием.

В результате моделирования установлено характерное поведение воздушного потока, оказывающего воздействие в основном на нижнюю часть боковой поверхности подвижного состава [11, 12]. Отчетливо видны срывные потоки пониженного давления, образующиеся в результате разряжения при обтекании крыши состава и головных обтекателей.

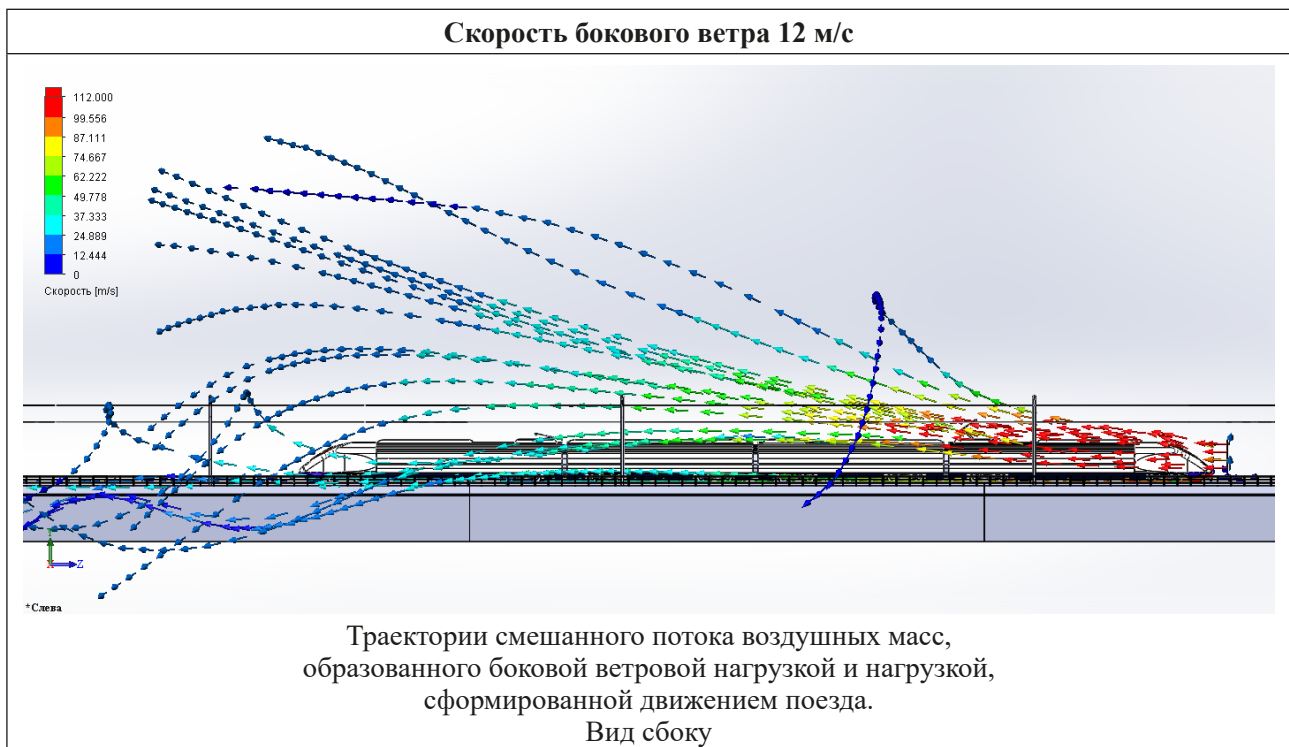
CFD-моделирование позволяет [13] значительно расширить объем информации о взаимодействии подвижного состава с набегающим воздушным потоком в различных условиях окружающей среды (табл. 1).

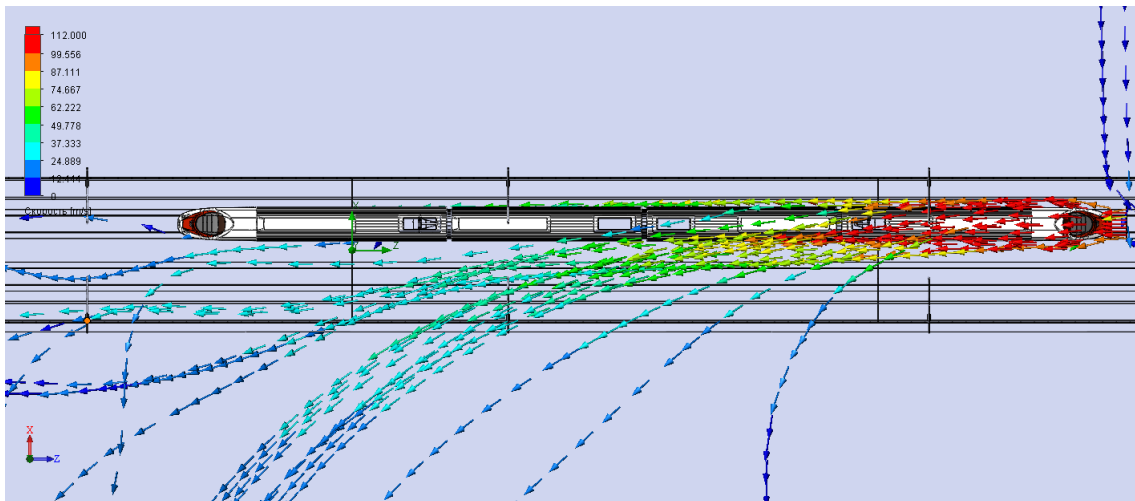


Рис. 2. Масштабная модель 1:15 TGV Duplex в рабочей камере аэродинамической трубы

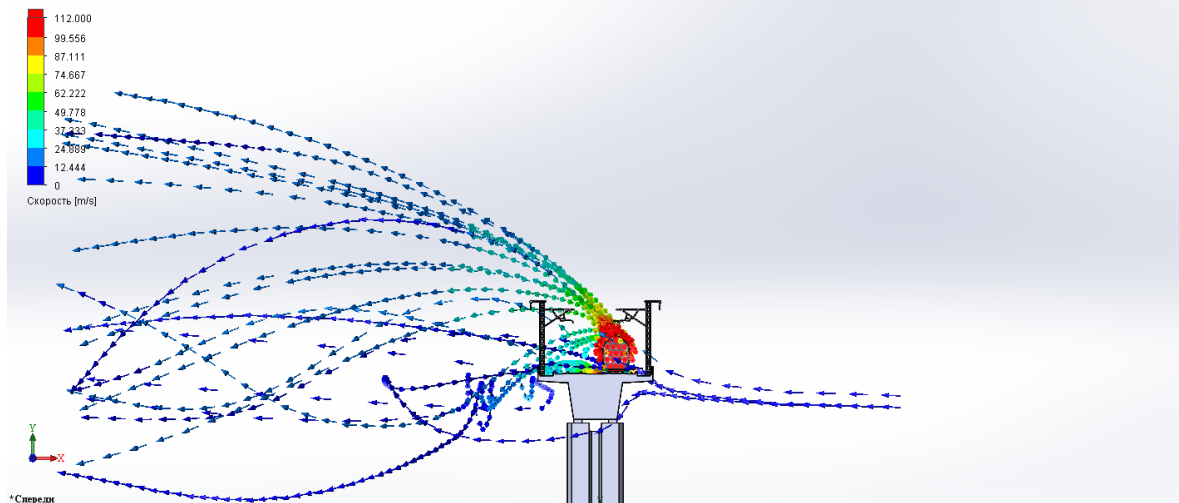
В частности, можно наблюдать явление разряжения в зоне между ограждением, опорами мачт контактного провода и корпусом состава, в результате которого поток не достигает вершины корпуса вагона, как это имеет место быть в эксперименте в аэродинамической трубе.

ТАБЛИЦА 1. Формирование структуры воздушных потоков в процессе взаимодействия инерционного наддува и бокового направления

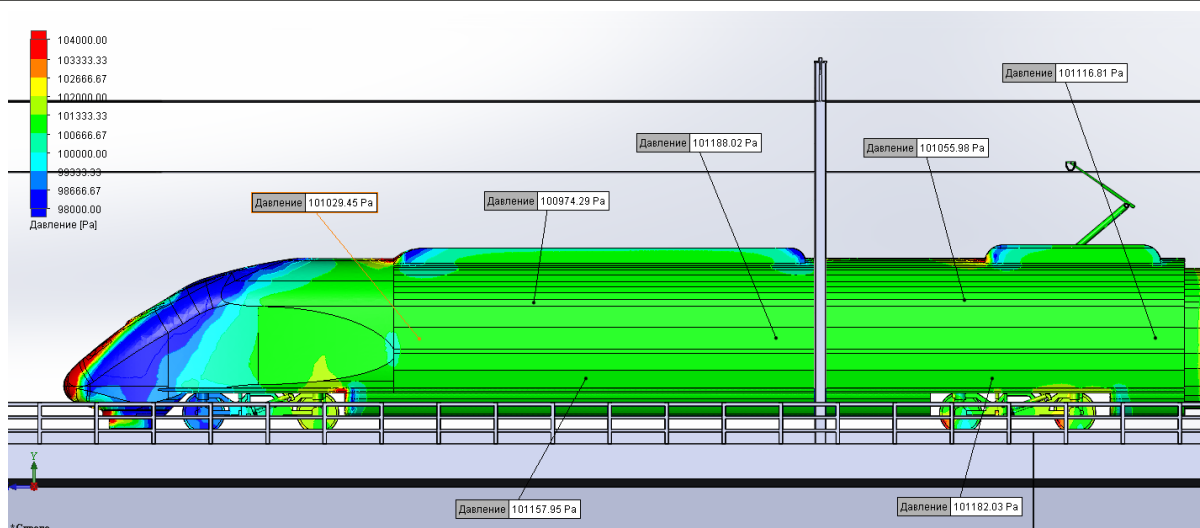




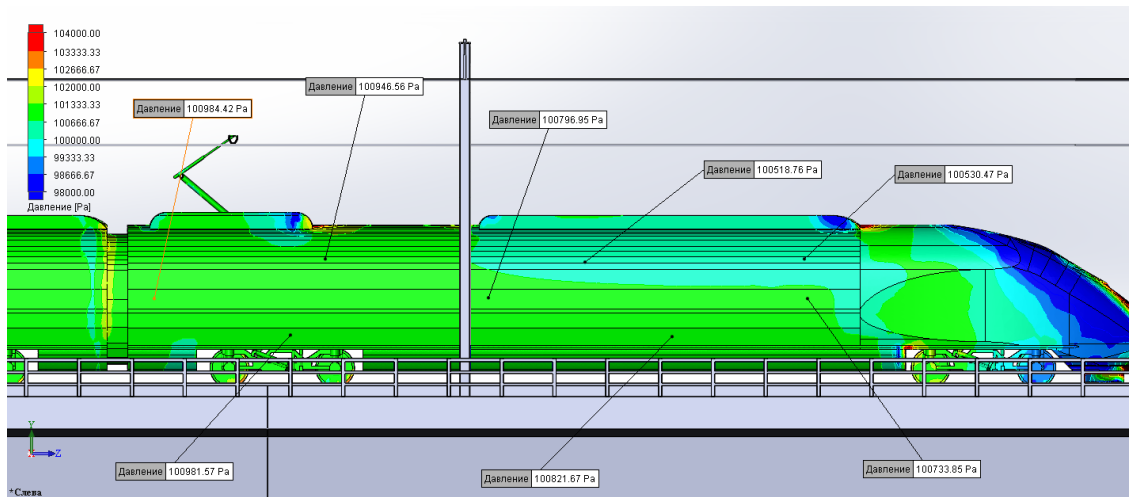
Траектории смешанного потока воздушных масс, образованного боковой ветровой нагрузкой и нагрузкой, сформированной движением поезда. Вид сверху



Траектории смешанного потока воздушных масс, образованного боковой ветровой нагрузкой и нагрузкой, сформированной движением поезда. Сечение, вид спереди

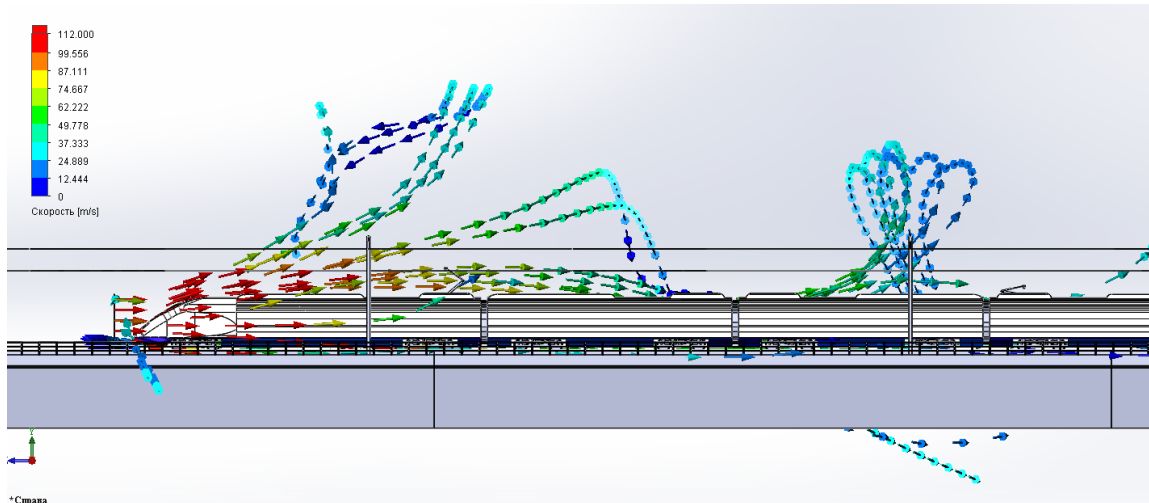


Распределение давления среды на поверхности вагона.
Наветренная сторона, головной вагон

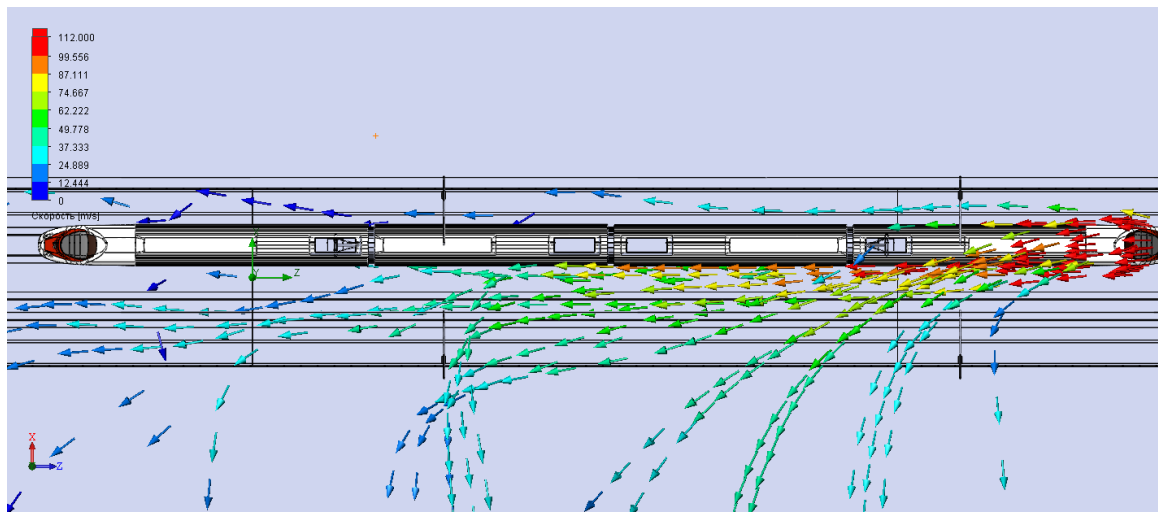


Распределение давления среды на поверхности вагона.
Подветренная сторона, головной вагон

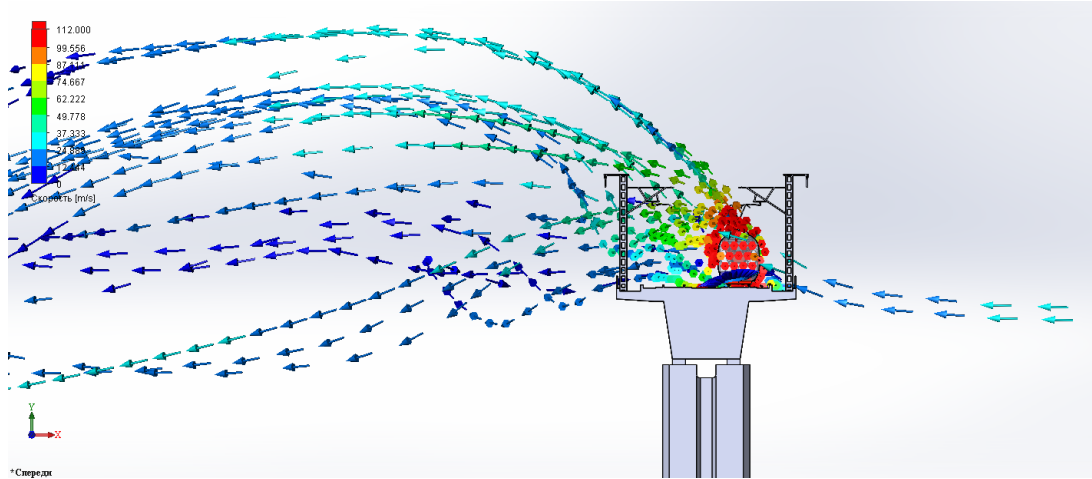
Скорость бокового ветра 29 м/с



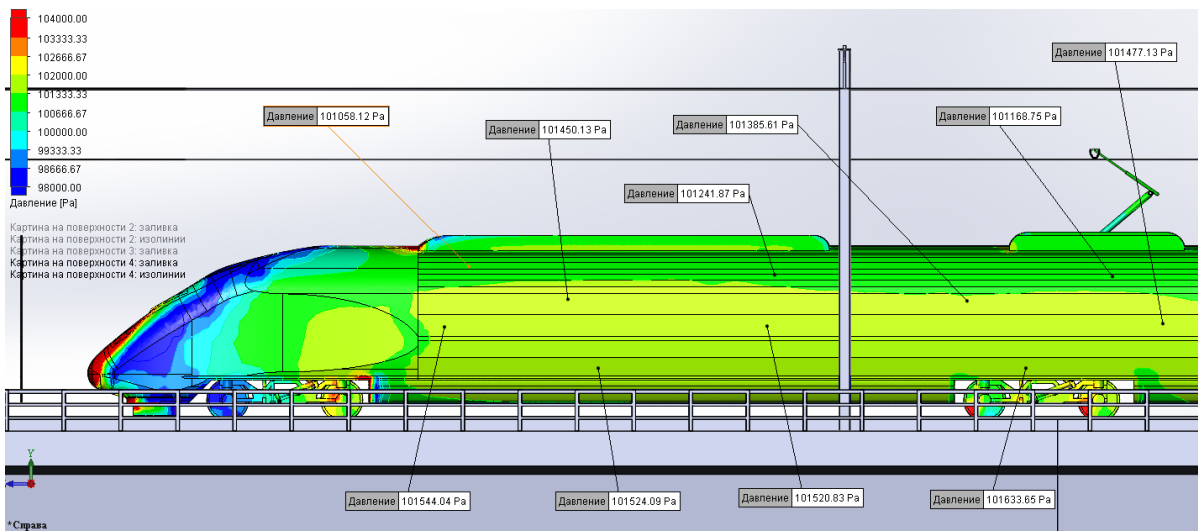
Траектории смешанного потока воздушных масс, образованного боковой ветровой нагрузкой и нагрузкой, сформированной движением поезда. Вид сбоку



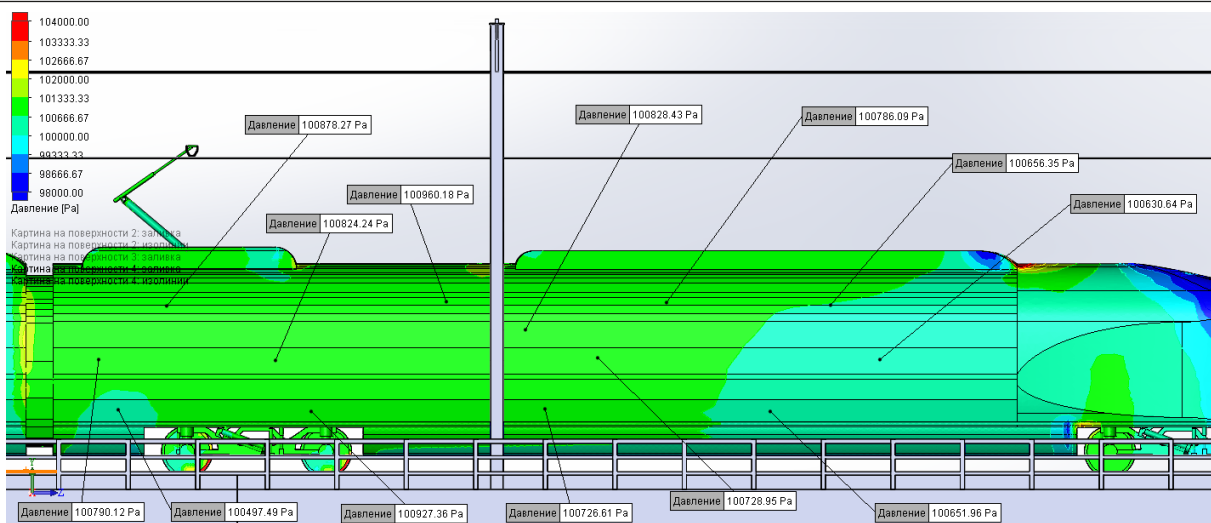
Траектории смешанного потока воздушных масс, образованного боковой ветровой нагрузкой и нагрузкой, сформированной движением поезда. Вид сверху



Траектории смешанного потока воздушных масс, образованного боковой ветровой нагрузкой и нагрузкой, сформированной движением поезда. Сечение, вид спереди

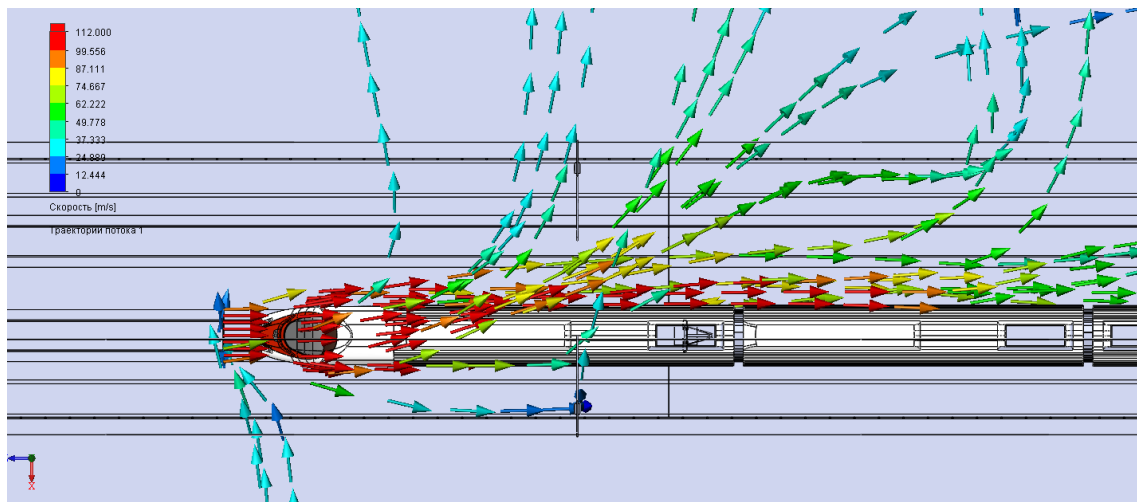


Распределение давления среды на поверхности вагона. Наветренная сторона, головной вагон

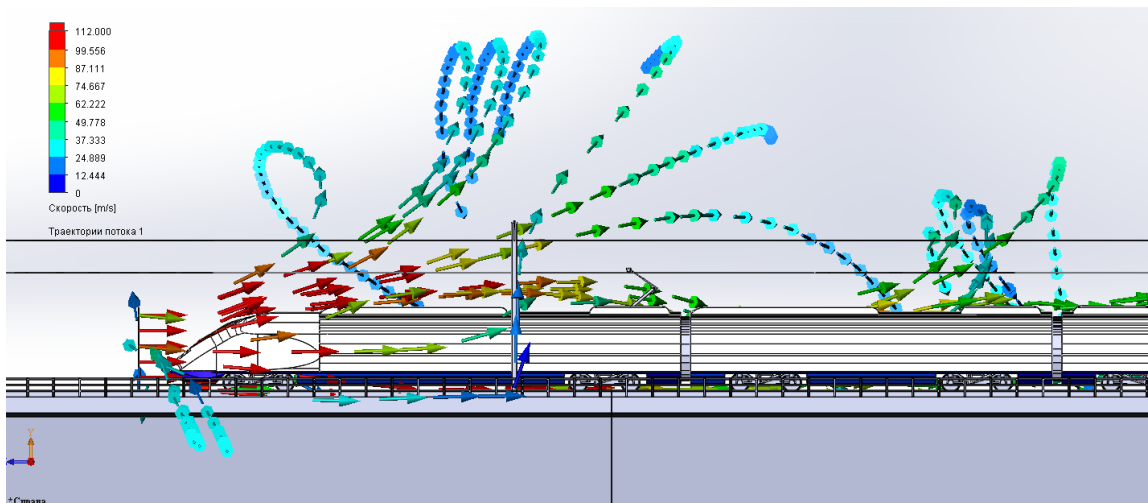


Распределение давления среды на поверхности вагона. Подветренная сторона, головной вагон

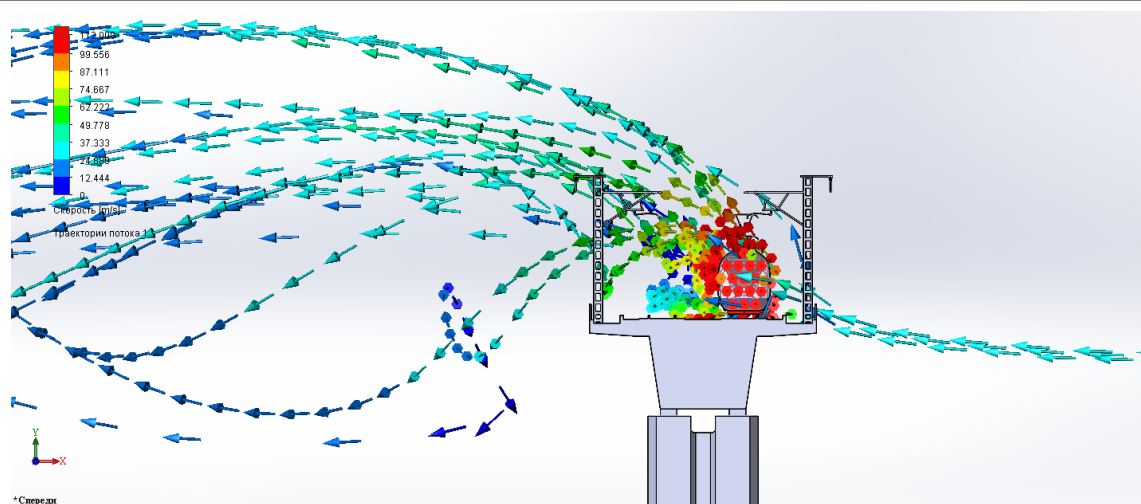
Скорость бокового ветра 36 м/с



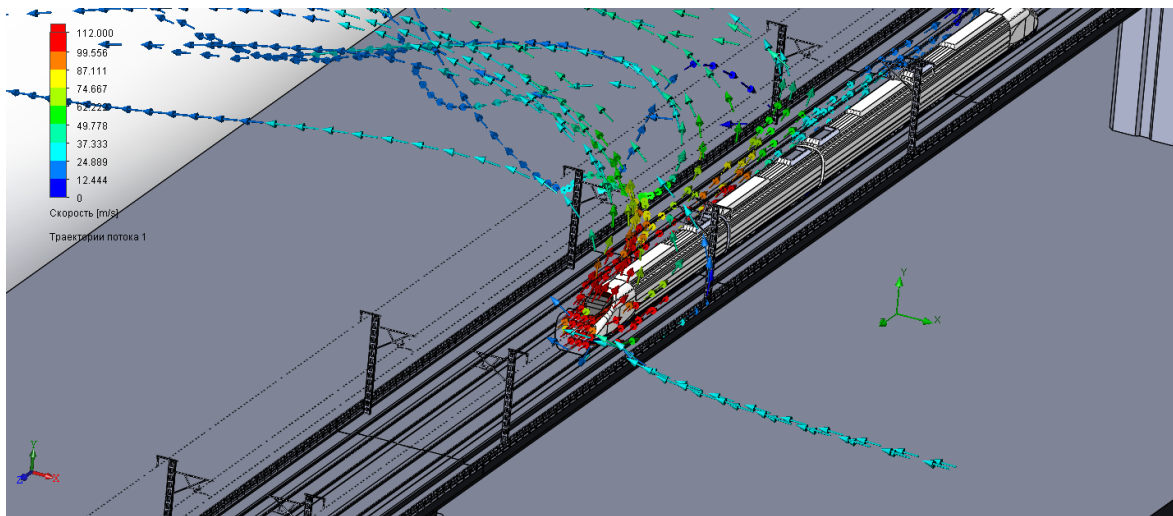
Траектории смешанного потока воздушных масс, образованного боковой ветровой нагрузкой и нагрузкой, сформированной движением поезда. Вид сверху



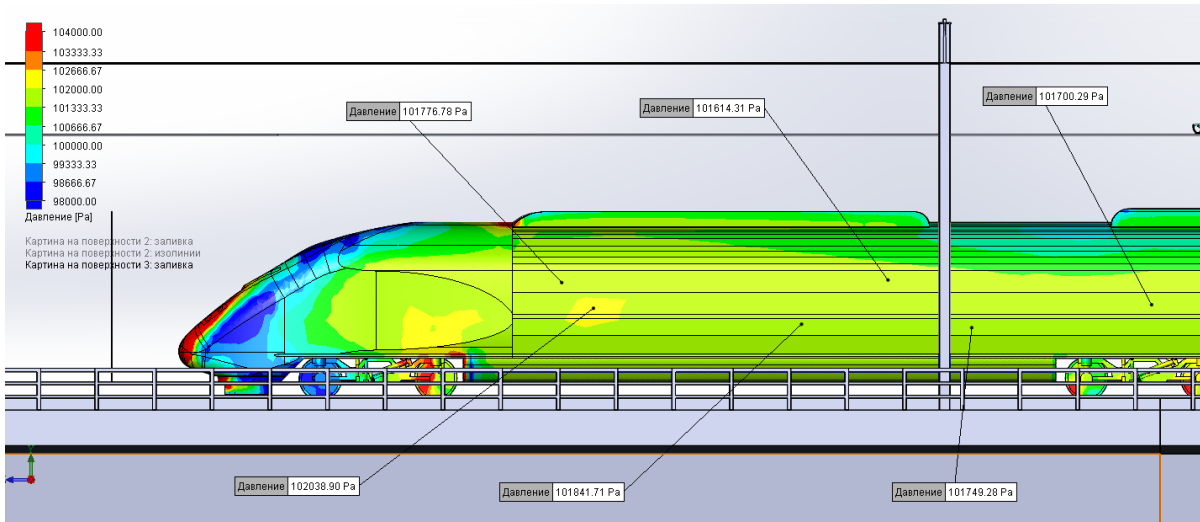
Траектории смешанного потока воздушных масс, образованного боковой ветровой нагрузкой и нагрузкой, сформированной движением поезда. Вид сверху



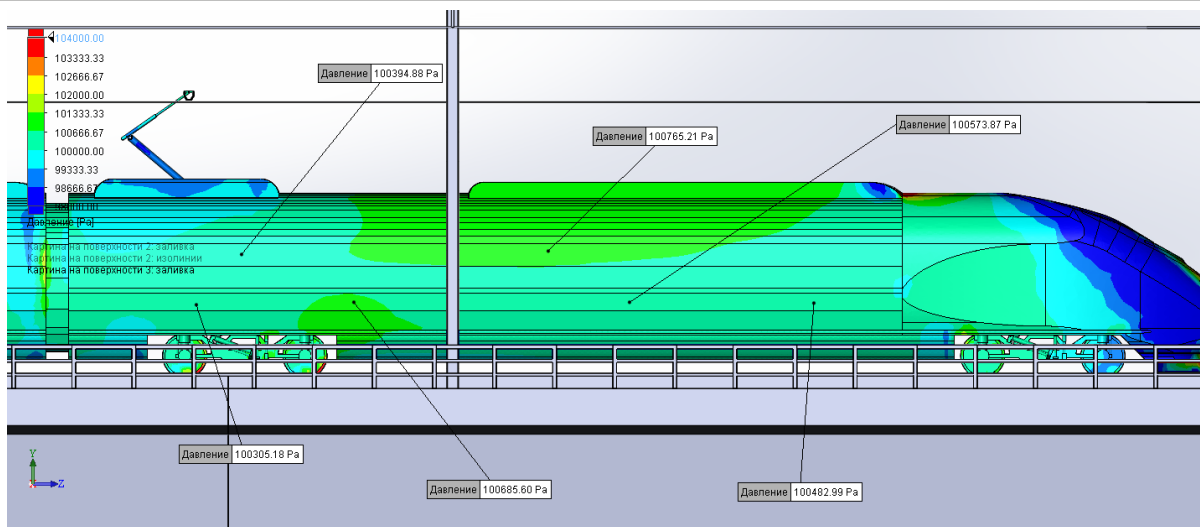
Траектории смешанного потока воздушных масс, образованного боковой ветровой нагрузкой и нагрузкой, сформированной движением поезда. Сечение, вид спереди



Траектории смешанного потока воздушных масс, образованного боковой ветровой нагрузкой и нагрузкой, сформированной движением поезда. Изометрия



Распределение давления среды на поверхности вагона. Наветренная сторона, головной вагон



Распределение давления среды на поверхности вагона. Подветренная сторона, головной вагон

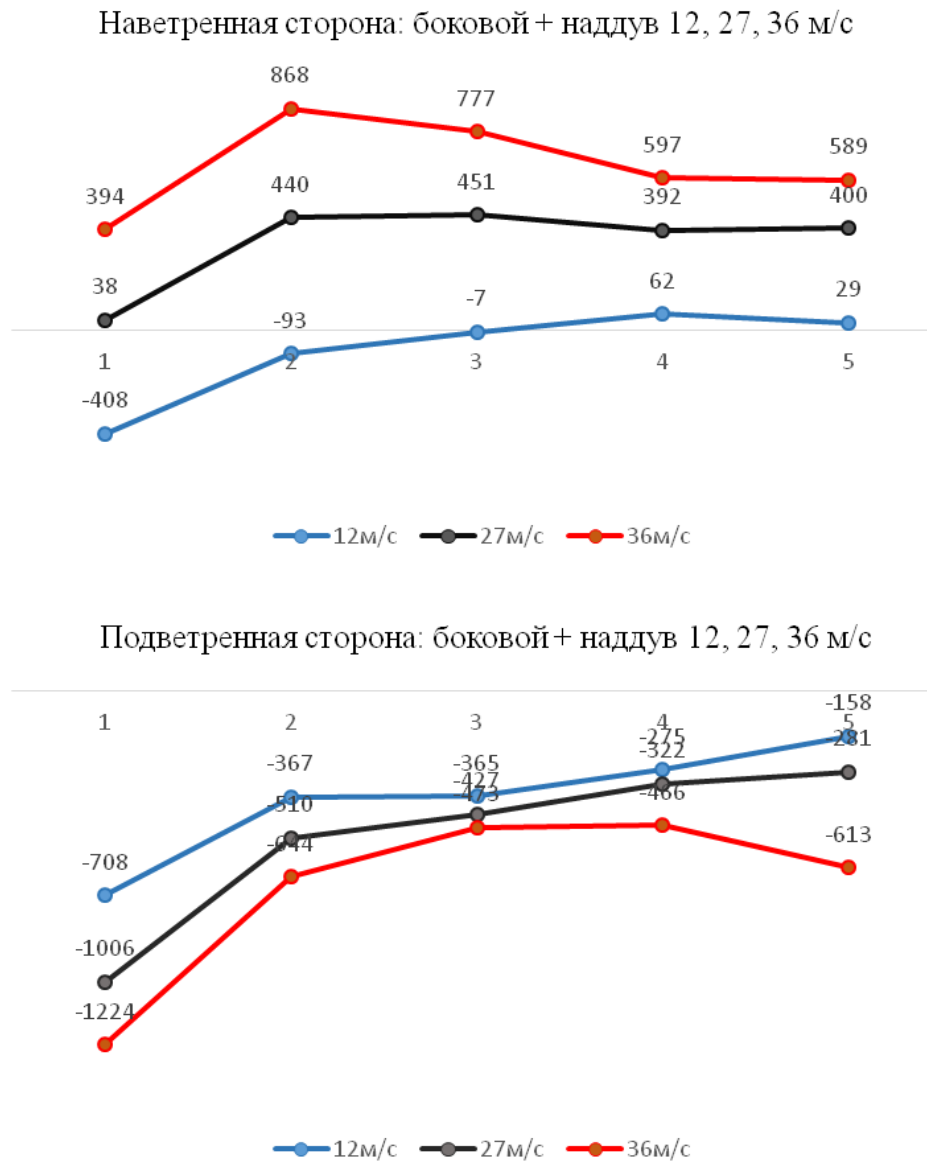


Рис. 3. Наветренная и подветренная сторона вагона, распределение давления по индикаторным линиям

Дополнительная нагрузка от момента крена бокового отбоя для горизонтального подвешивания с наветренной и подветренной стороны вагона наиболее критична для головного вагона состава. Моделирование совместного действия воздушных потоков инерционного наддува и бокового направлений отображает явление сноса потока осевого направления по направлению действия бокового (рис. 3).

Процесс сноса потока инерционного наддува направления практически завершается за пределами головного обтекателя. Таким образом, можно утверждать, что устойчивость состава может определяться с учетом ветровой нагрузки только бокового направления.

ТАБЛИЦА 2. Ветровая нагрузка на боковую поверхность вагона

Уровень индикаторной линии	Скорость ветра 12 м/с		Скорость ветра 27 м/с		Скорость ветра 36 м/с	
	Наветренная сторона, Па	Подветренная сторона, Па	Наветренная сторона, Па	Подветренная сторона, Па	Наветренная сторона, Па	Подветренная сторона, Па
1	-408	-708	38	-1006	394	-1224
2	-93	-367	440	-510	868	-644
3	-7	-365	451	-427	777	-473
4	62	-275	392	-322	597	-466
5	29	-158	400	-281	589	-613

В результате проведенного численного моделирования получены значения давлений на поверхности корпусных элементов состава в зонах избыточного давления и зонах разряжения. Кроме того, определены площади приложения этих нагрузок на поверхности вагона (табл. 2).

С целью определения степени разгрузки ходовых колес под воздействием ветровой нагрузки необходимо смоделировать систему подвешивания ходовых устройств. Система подвешивания двухуровневая:

- первичное рессорное подвешивание реализуется одноповодковыми буксами, гидравлическими гасителями вертикальных колебаний и цилиндрическими винтовыми пружинами;

- вторичное рессорное подвешивание реализуется при помощи пневмобаллонов, гидравлических гасителей вертикальных, поперечных колебаний и виляния.

Первичное подвешивание (колесо — тележка) пружинное — 1400 кН/м, вторичное подвешивание (тележка — кузов) — пневмоподвеска — 670 кН/м. Кроме того, конструкция ходовых устройств поезда оборудована устройством поперечной устойчивости (от раскачивания): первичное — 1100 кН/м; вторичное — 410 кН/м.

Таким образом, конструкцию подвешивания ходового устройства поезда можно представить как двухуровневую систему верхних и нижних вертикально установленных пружин, соответственно определяющих жесткость первичного и вторичного подвешивания, дополнительно объединенных диагонально расположенными, накрест соединенными пружинами, определяющими поперечную жесткость подвески (рис. 4). Нагрузки на колесо R_A , R_B находятся в соответствии со схемой определения боковой устойчивости подвижного состава (рис. 4) по следующей зависимости:

$$R_A = \frac{n \cdot g \cdot F}{2S \cdot 4} = \frac{2,5 \cdot 0,5 \cdot 25 \cdot 3}{1,58 \cdot 4} = 15 \text{ кН.}$$

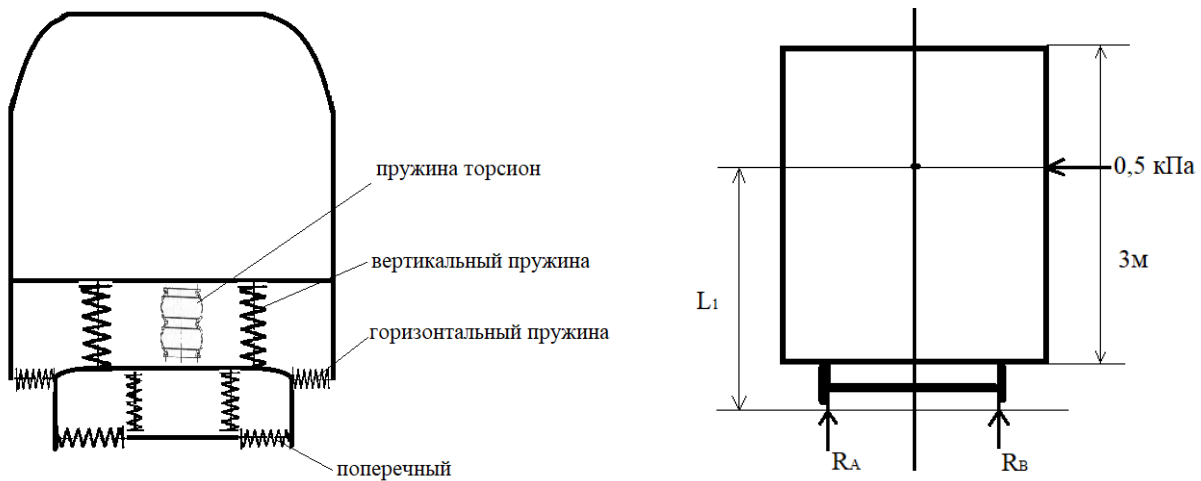


Рис. 4. Конструктивная схема рессорного подвешивания подвижного состава:
 R_A, R_B — нагрузка на колесо; F — площадь проекции боковой поверхности вагона (~75 м²); $[g] = 500 \text{ Н/м}^2$

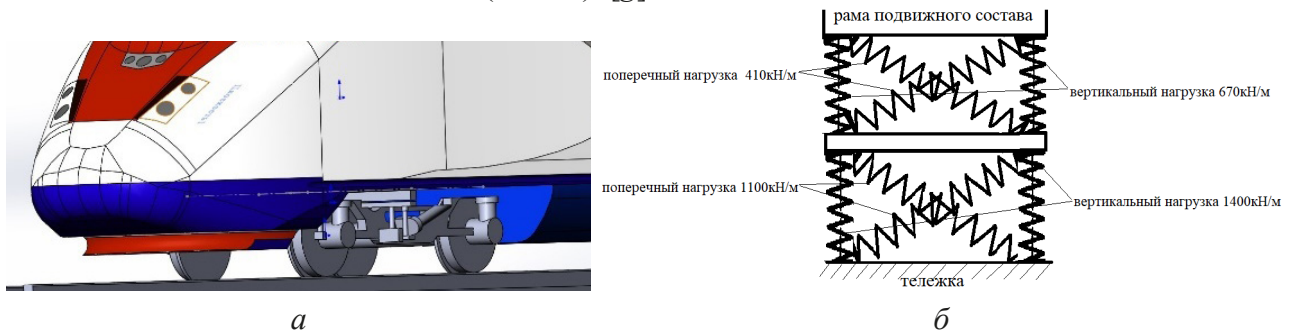


Рис. 5. Практическая реализация и модель подвешивания системы подвешивания ходовой части:
 а — конструкция; б — условное представление

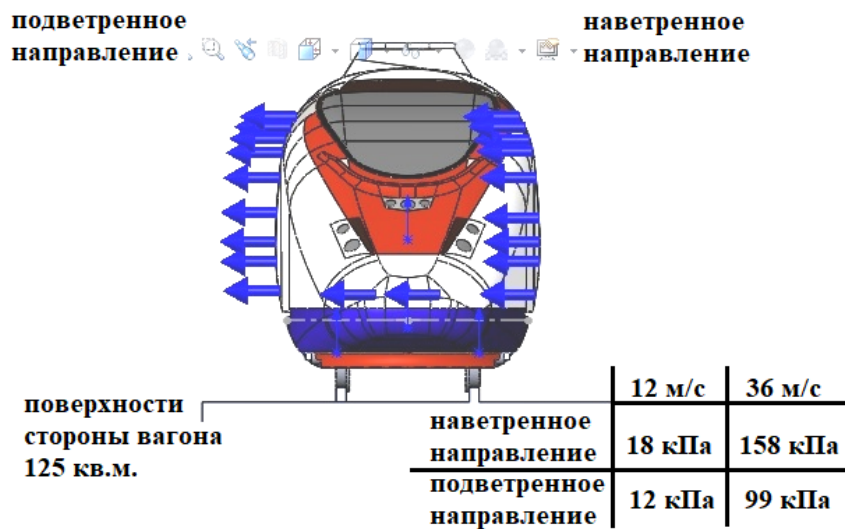


Рис. 6. Расчетная схема нагружения конструкции состава давлением, полученным в результате исследования процесса обтекания воздушными массами состава

Практическая реализация модели (рис. 5) представляет собой упрощенную конструкцию ходовой тележки с сохранением основной функциональной составляющей — наддрессорной балки, к которой осуществляется крепление виртуальных пружин.

На рис. 6 представлена расчетная схема нагружения конструкции состава давлением (нагрузки (давления), прикладываются к соответствующим поверхностям вагона (при этом давления заменяются на соответствующую распределенную силу, отрицательное давление представляется как противоположно направленная сила)), полученным в результате исследования процесса обтекания воздушными массами состава.

Моделирование механического действия воздушных потоков бокового направления

Процесс моделирования осуществляется в специализированном модуле среды инженерного анализа среды SolidWorks Motion [13]. Симуляция осуществляет динамическое приложение нагрузки во времени, при этом выполняется расчет реакции объекта на данный вид нагружения с частотой итераций (кадров), заданных в соответствии с уровнем требуемой точности.

Система считается динамически устойчивой при условии самостоятельного восстановления собственной устойчивости после снятия возмущающего внешнего фактора. Тестирование осуществляется внезапным снятием действия возмущающего фактора (ветровой нагрузки) на подвижной состав, после прекращения ее действия — система должна самостоятельно прийти в состояние устойчивого равновесия (рис. 7, 8).

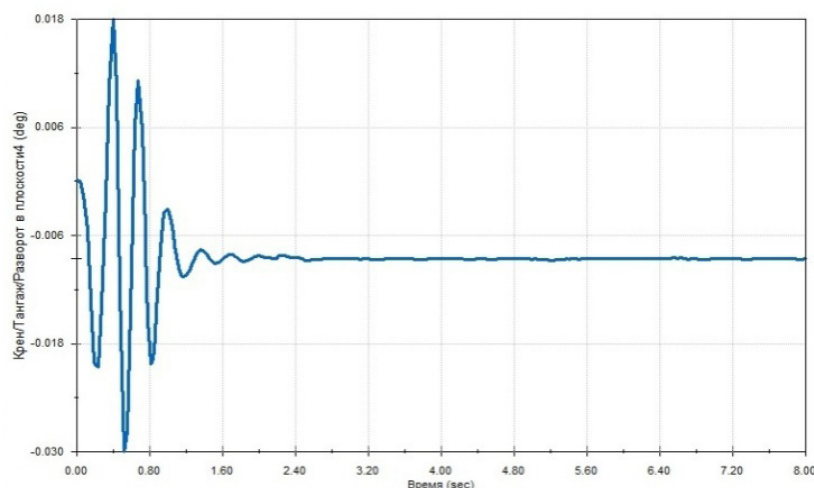


Рис. 7. Динамика изменения давления на колесо и крена корпуса вагона при воздействии воздушного потока со скоростью 12 м/с

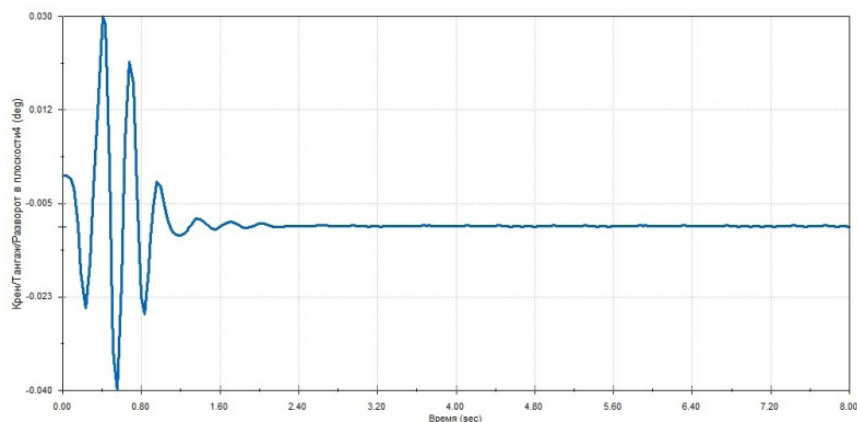


Рис. 8. Динамика изменения крена корпуса вагона при воздействии воздушного потока со скоростью 36 м/с

В результате проведенного исследования (рис. 9–12) установлено, что конструкция при скорости ветра 12 м/с имеет максимальный размах углового отклонения 0,048 град. и возвращается в устойчивое состояние в течение 2,4 с; при скорости ветра 36 м/с имеет максимальный размах углового отклонения 0,07 град. и возвращается в устойчивое состояние в течение 2,4 с (с момента снятия возмущающего фактора).

Из табл. 3 следует, что минимальный уровень нагрузки на ходовое колесо не превышает предельного допустимого значения 10 % от весовой номинальной нагрузки.

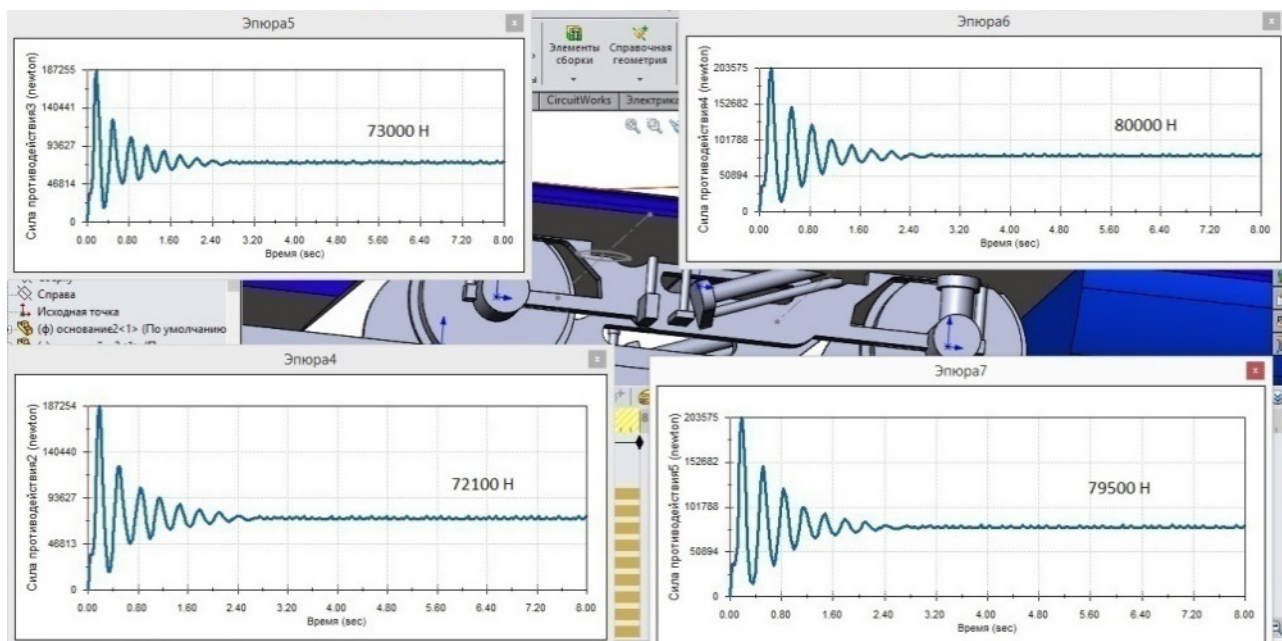


Рис. 9. Реакции в контактных группах «ходовые колеса — головка рельса» передней тележки при скорости воздушного потока 12 м/с

ТАБЛИЦА 3. Нагрузки на ходовые колеса при скорости воздушного потока 12 м/с

Рельс	Нагрузка на колеса передней тележки, кН (%)		Нагрузка на колеса задней тележки, кН (%)	
	Правый	Левый	Правый	Левый
Правый	7,3 (11,67)	8 (12,78)	7,73 (12,35)	8,48 (13,55)
Левый	7,21 (11,52)	7,95 (12,7)	7,68 (12,27)	8,36 (13,36)

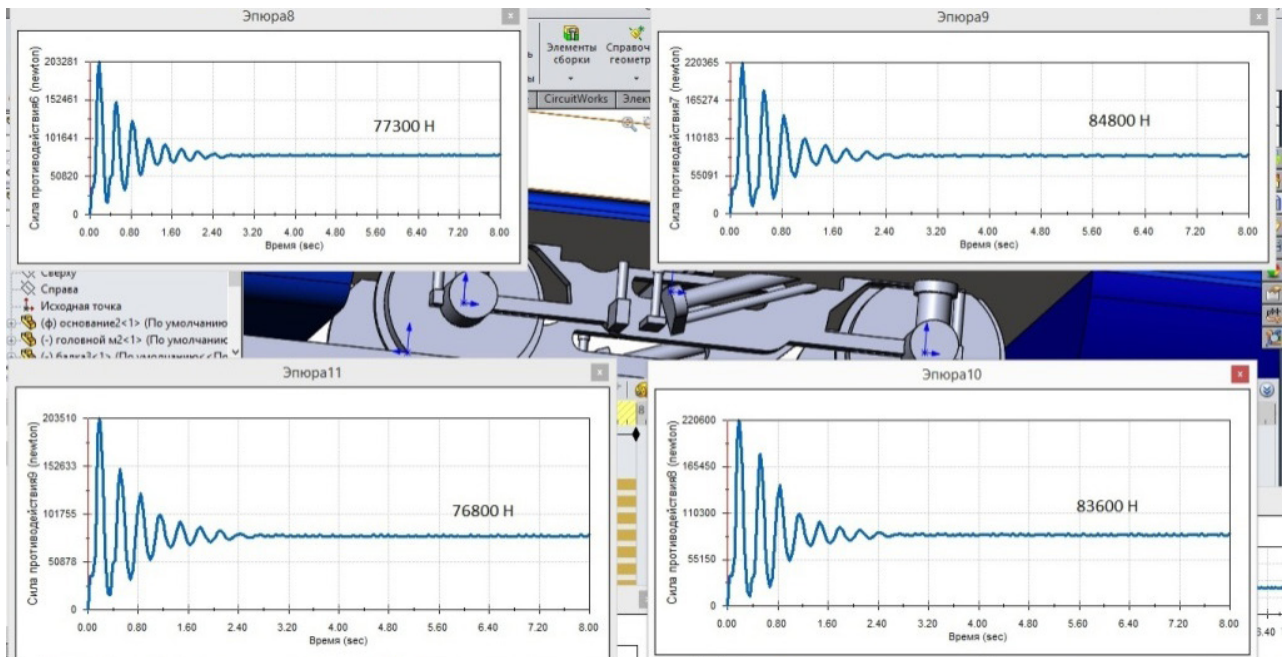


Рис. 10. Реакции в контактных группах «ходовые колеса — головка рельса» задней тележки при скорости воздушного потока 12 м/с

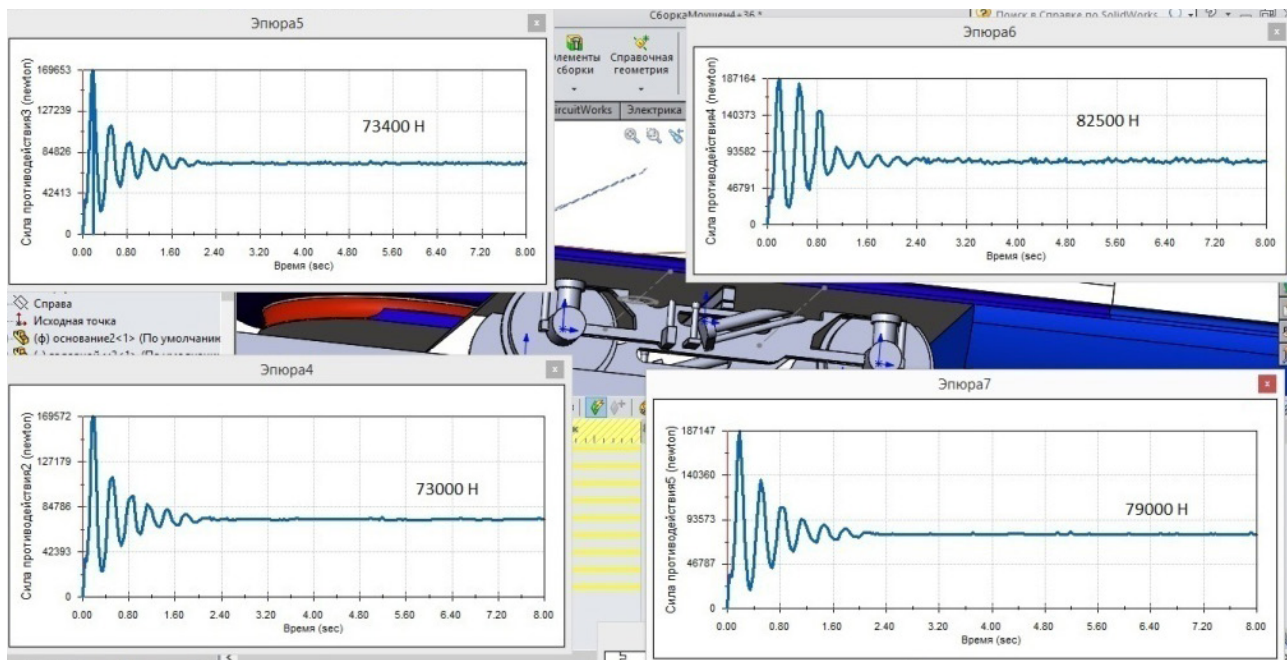


Рис. 11. Реакции в контактных группах «ходовые колеса — головка рельса» передней тележки при скорости воздушного потока 36 м/с

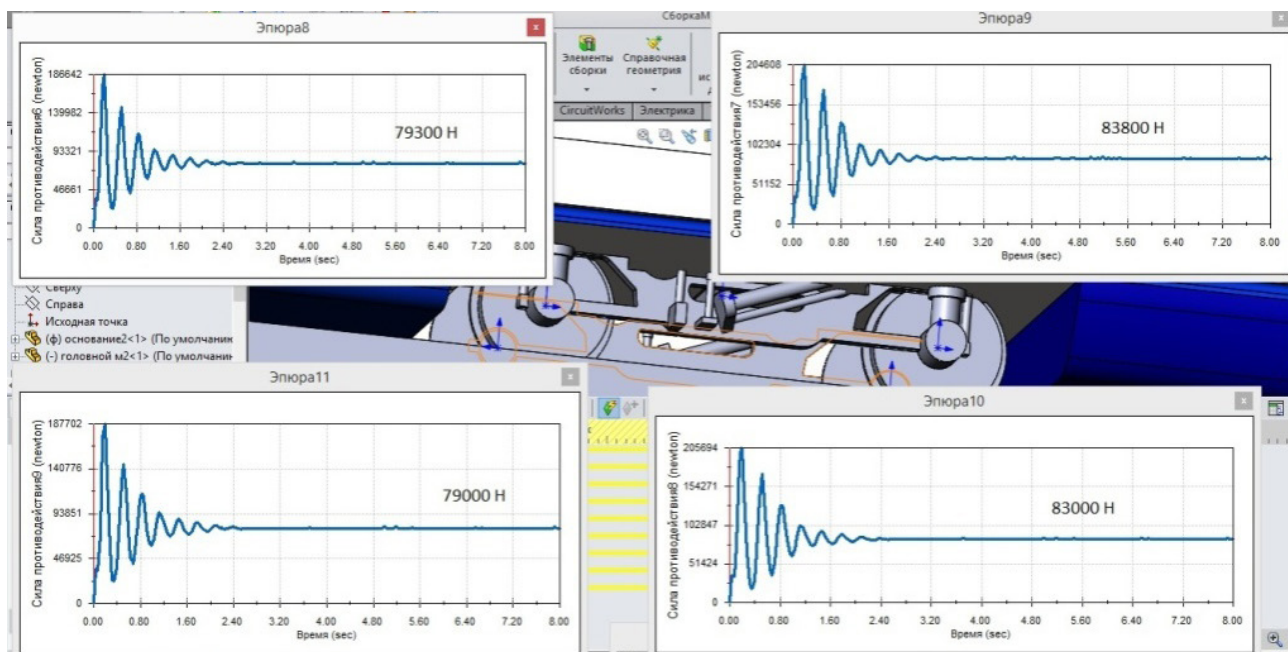


Рис. 12. Реакции в контактных группах «ходовые колеса — головка рельса» задней тележки при скорости воздушного потока 36 м/с

ТАБЛИЦА 4. Нагрузки на ходовые колеса при скорости воздушного потока 36 м/с

Рельс	Нагрузка на колеса передней тележки, кН (%)		Нагрузка на колеса задней тележки, кН (%)	
	Правый	Левый	Правый	Левый
Правый	7,34 (11,61)	8,25 (13)	7,93 (12,52)	8,38 (13,23)
Левый	7,3 (11,53)	7,9 (12,48)	7,9 (12,48)	8,3 (13,11)

Из табл. 4 следует, что минимальный уровень нагрузки на ходовое колесо не превышает предельного допустимого значения 10 % от весовой номинальной нагрузки.

Моделирование механического совместного действия воздушных потоков инерционного наддува и бокового направлений

На рис. 13, 14 представлена динамика изменения крена корпуса вагона при воздействии воздушного потока при скоростях 12 и 36 м/с соответственно.

В результате проведенного исследования установлено, что конструкция при скорости ветра 12 м/с имеет максимальный размах углового отклонения 0,076 град., и возвращается в устойчивое состояние в течение 1,8 с; при скорости ветра 36 м/с имеет максимальный размах углового отклонения 0,235 град. и возвращается в устойчивое состояние в течение 2 с — с момента снятия возмущающего фактора (рис. 13, 14).

Реакции в контактных группах «ходовые колеса — головка рельса» передней и задней тележек при скоростях 12 и 36 м/с соответственно представлены на рис. 15–18.

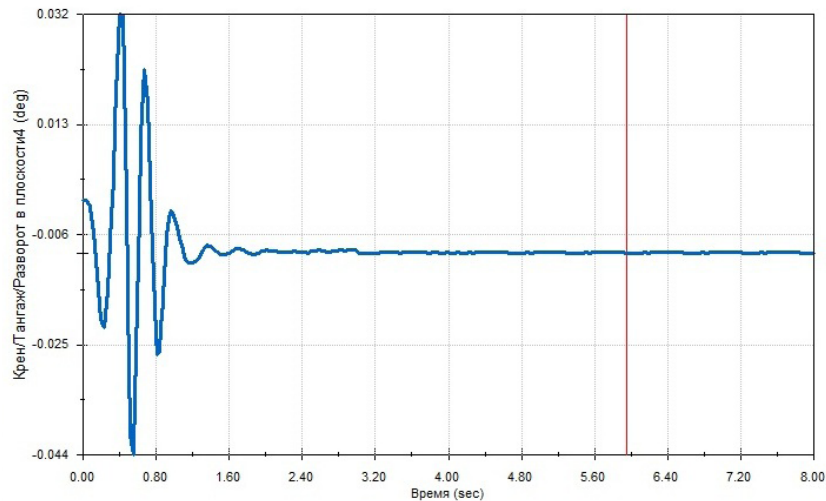


Рис. 13. Динамика изменения крена корпуса вагона при воздействии воздушного потока со скоростью 12 м/с

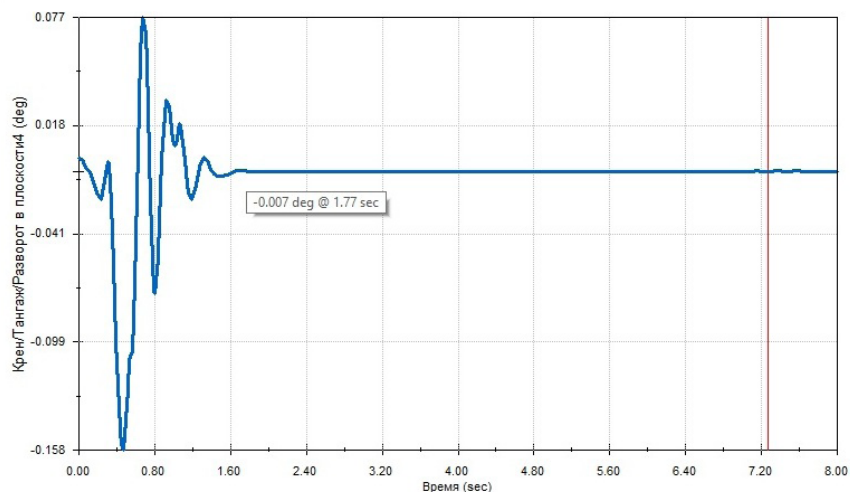


Рис. 14. Динамика изменения крена корпуса вагона при воздействии воздушного потока со скоростью 36 м/с

ТАБЛИЦА 5. Нагрузки на ходовые колеса при скорости воздушного потока 12 м/с

Рельс	Нагрузка на колеса передней тележки, кН		Нагрузка на колеса задней тележки, кН	
	1	2	3	4
Правый	7,26 (11,6)	8,03 (12,8)	7,65 (12,24)	8,33 (13,32)
Левый	7,41 (11,8)	7,68 (12,28)	7,9 (12,64)	8,28 (13,24)

Из табл. 5 следует, что минимальный уровень нагрузки на ходовое колесо не превышает предельного допустимого значения 10 % от весовой номинальной нагрузки.

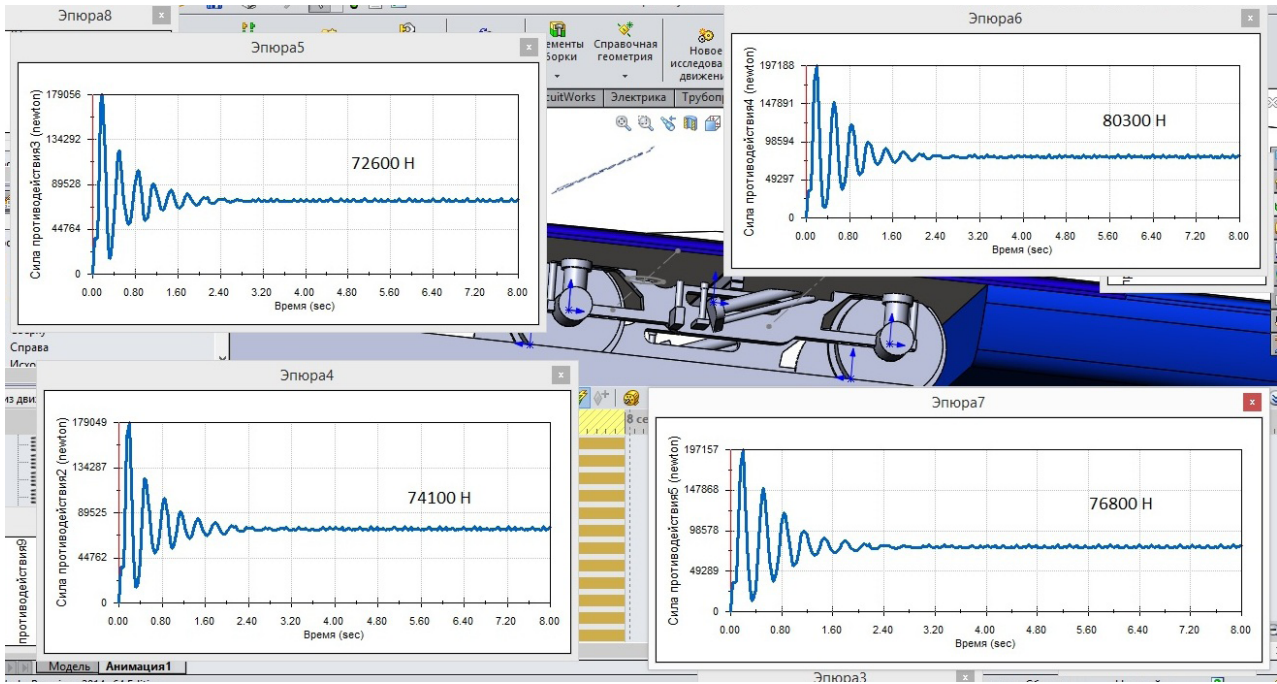


Рис. 15. Реакции в контактных группах «ходовые колеса — головка рельса» передней тележки при скорости воздушного потока 12 м/с

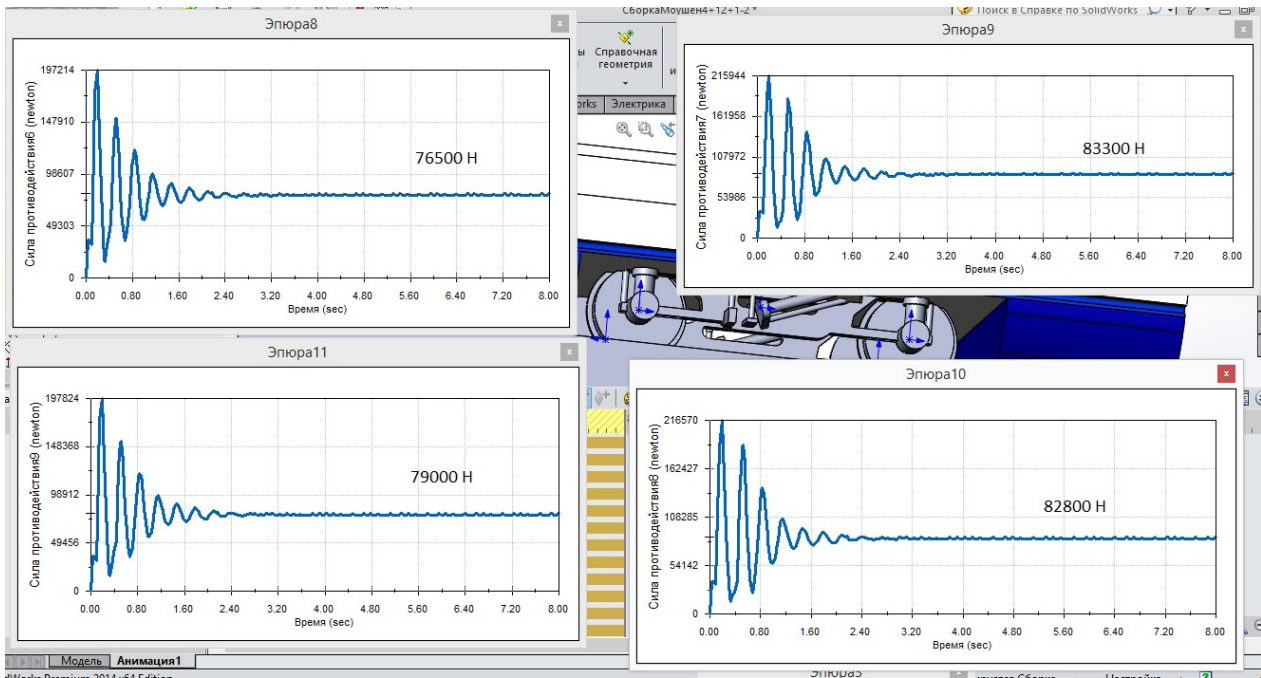


Рис. 16. Реакции в контактных группах «ходовые колеса — головка рельса» задней тележки при скорости воздушного потока 12 м/с

Из табл. 6 следует, что минимальный уровень нагрузки на ходовое колесо превышает предельно допустимое значение 10 % от весовой номинальной нагрузки на передней тележке на левом колесе.

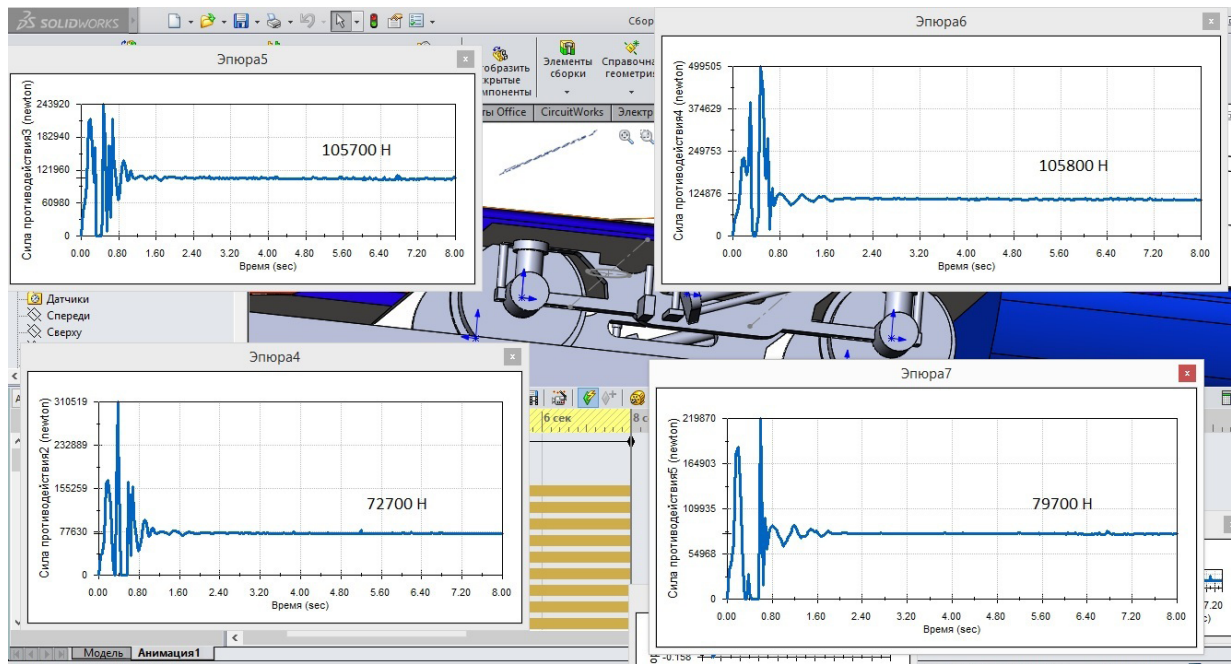


Рис. 17. Реакции в контактных группах «ходовые колеса — головка рельса» передней тележки при скорости воздушного потока 36 м/с

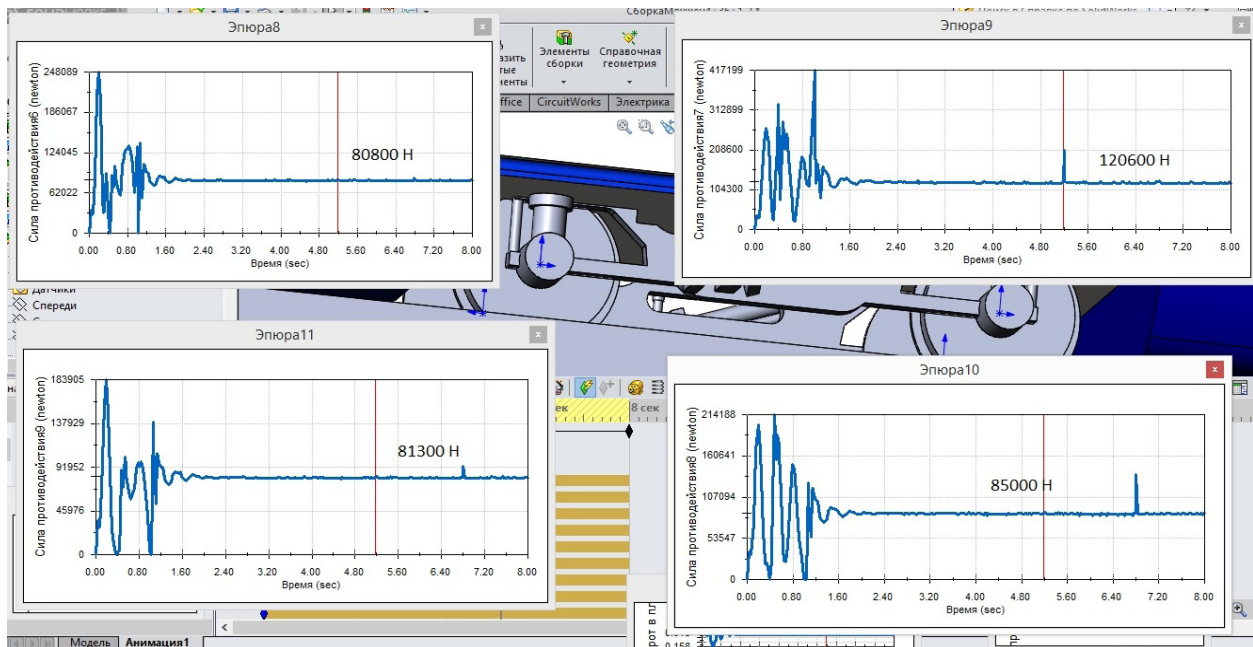


Рис. 18. Реакции в контактных группах «ходовые колеса — головка рельса» задней тележки при скорости воздушного потока 36 м/с

ТАБЛИЦА 6. Нагрузки на ходовые колеса при скорости воздушного потока 36 м/с

Рельс	Нагрузка на колеса передней тележки, кН		Нагрузка на колеса задней тележки, кН	
Правый	10,57 (14,4)	10,58 (14,4)	8,08 (11)	12,3 (16,75)
Левый	7,27 (9,9)	7,97 (10,85)	8,13 (11)	8,5 (11,5)

Таким образом, установлено, что в случае превышения скорости воздушных масс на 20 % выше максимально зафиксированных на местности северо-восточного плоскогорья правобережья г. Ангрена (36 м/с) в преобладающем направлении ветра возможно недопустимое снижение весовой нагрузки на передней тележке на левом колесе.

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

Библиографический список

1. Джаббаров С. Т. Движение тонкого осесимметрического тела в полупространстве, занятом сжимаемым газом / С. Т. Джаббаров // Проблемы механики. — 2016. — Вып. 1. — С. 12–17.
2. Лазаренко Ю. М. Аэродинамическое воздействие высокоскоростного электропоезда «Сапсан» на пассажиров на платформах и на встречные поезда при скрещении / Ю. М. Лазаренко, А. Н. Капускин // Вестн. ВНИИЖТа. — 2012. — № 4. — С. 11–14.
3. Сюзюмова Е. М. Исследование воздушных потоков на пассажирской платформе при прохождении поезда / Е. М. Сюзюмова // Вестн. ВНИИЖТа. — 1973. — № 4. — С. 50–52.
4. Sterling M. A Study of the Slipstreams of High-Speed Passenger Trains and Freight Trains / M. Sterling, C. J. Baker, S. C. Jordon et al. // Proc. of the Institution of Mechanical Engineering, Part F: J. of Rail and Rapid Transit. — 2008. — Vol. 222. — Iss. 1. — Pp. 177–193. — DOI: 10.1243/0954409-7jrrt133.
5. Ламб Г. Гидродинамика / Г. Ламб. — М.: ОГИЗ, 1947. — 929 с.
6. Сагомоян А. Я. Проникание / А. Я. Сагомоян. — М.: МГУ, 1974. — 299 с.
7. Кравец В. В. Аэродинамика высокоскоростных поездов. Ч. 1 / В. В. Кравец, Е. В. Кравец // Залізн. трансп. України. — 2005. — № 2.
8. Кравец В. В. Аэродинамика высокоскоростных поездов. Ч. 2 / В. В. Кравец, Е. В. Кравец // Залізн. трансп. України. — 2005. — № 3. — С. 16–20.
9. Кравец В. В. Аэродинамика частично перекрытого межвагонного пространства скоростного поезда / В. В. Кравец, Е. В. Кравец // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. імені акад. В. Лазаряна. — Дніпропетровськ, 2005.
10. Кравец Е. В. Влияние типа обтекателя на аэродинамическое сопротивление межвагонного пространства скоростного поезда / Е. В. Кравец // Сб. науч. тр. Серия: «Механика» / Днепропетр. нац. ун-т.
11. Baker C. J. Keynote lecture — The flow around high speed trains / C. J. Baker // Proc. of the BVA VI conference. — Milano, Italy, 2008. — P. 34.
12. Baker C. The flow around high speed trains / C. Baker // J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. — 2010. — Vol. 98. — Iss. 6–7. — Pp. 277–298. — DOI: 10.1016/j.jweia.2009.11.002.
13. Khayrullina A. CFD simulation of train aerodynamics: traininduced wind conditions at an underground railroad passenger platform / A. Khayrullina, B. Blocken, W. Janssen et al. // J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. — 2015. — Vol. 139. — Pp. 100–110. — DOI: 10.1016/j.jweia.2015.01.019.

Дата поступления: 28.04.2023

Решение о публикации: 28.05.2023

Контактная информация:

КАРИМОВ Дастонбек Давронбой угли — аспирант; dostonkarimov325@gmail.com

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

ВАТАЕВ Андрей Сергеевич — канд. техн. наук, доц., avataev@yandex.ru

ВАТУЛИН Ян Семенович — канд. техн. наук, доц.; yan-roos@yandex.ru

СОТНИКОВ Кирилл Андреевич — аспирант; k-sotnikov@yandex.ru

Study of Transverse Stability of High-Speed Rolling Stock at Tunnel Exit

D. D. Karimov, A. A. Vorob'ev, A. S. Vatayev, Ya. S. Vatulin, K. A. Sotnikov

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

For citation: Karimov D. D., Vorob'ev A. A., Vatayev A. S., Vatulin Ya. S., Sotnikov K. A. Study of Transverse Stability of High-Speed Rolling Stock at Tunnel Exit. *Bulletin of scientific research results*, 2023, iss. 2, pp. 115–135. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2023-2-115-135

Summary

Purpose: Numerical simulation of aerodynamic interaction of a moving high-speed train with a wind load applied to the side surface of the train body elements during its exit from the tunnel to the open space is considered. The stability of the rolling stock was assessed according to the criterion of the minimum pressure of the weight load on the wheel. **Methods:** CFD modeling allows you to significantly expand the amount of information about the interaction of rolling stock with incoming air flow in various environmental conditions. **Results:** During numerical modeling, the pressure values on the surface of the housing elements of the composition in the overpressure zones and the underpressure zones were obtained. Besides, areas of application of these loads on car surface are defined. **Practical significance:** It was established that in case of exceeding the speed of air masses by 20% higher than the maximum recorded on the terrain of the northeastern plateau of the right bank of Angren in the prevailing wind direction, an unacceptable decrease in the weight load on the front trolley on the left wheel is possible.

Keywords: Aerodynamic effect, artificial tunnel-type structure, frontal air drag, confuser, diffuser, finite element method, static pressure, numerical simulation.

References

1. Dzhabbarov S. T. Dvizhenie tonkogo osesimmetricheskogo tela v poluprostranstve, zanyatom szhimaемым газом [Movement of a thin axisymmetric body in a half-space occupied by a compressible gas]. *Problemy mekhaniki* [Problems of Mechanics]. 2016, Iss. 1, pp. 12–17. (In Russian)
2. Lazarenko Yu. M., Kapuskin A. N. Aerodinamicheskoe vozdeystvie vysokoskorostnogo elektropoezda “Sapsan” na passazhirov na platformakh i na vstrechnye poezda pri skreshchenii [Aerodynamic impact of the Sapsan high-speed electric train on passengers on platforms and on

oncoming trains during crossing]. *Vestn. VNIIZhTa* [Vestn. VNIIZhT]. 2012, Iss. 4, pp. 11–14. (In Russian)

3. Syuzumova E. M. Issledovanie vozdushnykh potokov na passazhirskoy platforme pri prokhozhenii poezda [Study of air flows on the passenger platform during the passage of the train]. *Vestn. VNIIZhTa* [Vestn. VNIIZhT]. 1973, Iss. 4, pp. 50–52. (In Russian)

4. Sterling M., Baker C. J., Jordon S. C. et al. A Study of the Slipstreams of High-Speed Passenger Trains and Freight Trains. Proc. of the Institution of Mechanical Engineering, Part F: J. of Rail and Rapid Transit. 2008, vol. 222, Iss. 1, pp. 177–193. DOI: 10.1243/0954409-7jrrt133.

5. Lamb G. *Gidrodinamika* [Hydrodynamics]. Moscow: OGIZ Publ., 1947, 929 p. (In Russian)

6. Sagomonyan A. Ya. *Pronikanie* [Penetration]. Moscow: MGU Publ., 1974, 299 p. (In Russian)

7. Kravets V. V., Kravets E. V. Aerodinamika vysokoskorostnykh poezdov. Ch. 1 [Aerodynamics of high-speed trains. Part 1]. *Zalozn. transp. Ukraini* [Zalozn. transp. Ukraine]. 2005, Iss. 2, pp. 52–57.

8. Kravets V. V., Kravets E. V. Aerodinamika vysokoskorostnykh poezdov. Ch. 2 [Aerodynamics of high-speed trains. Part 2]. *Zalozn. transp. Ukraini* [Zalozn. transp. Ukraine]. 2005, Iss. 3, pp. 16–20.

9. Kravets V. V., Kravets E. V. Aerodinamika chastichno perekrytogo mezhvagonnogo prostranstva skorostnogo poezda [Aerodynamics of a partially covered inter-car space of a high-speed train]. *Visn. Dnipropetr. nats. un-tu zalozn. transp. imeni akad. V. Lazaryana* [Visn. Dnipropetr. nat. un-tu zalozn. transp. named after acad. V. Lazaryan]. Dnipropetrovs'k, 2005, Vip. 8, pp. 61–69.

10. Kravets E. V. *Vliyanie tipa obtekatelya na aerodinamicheskoe soprotivlenie mezhvagonnogo prostranstva skorostnogo poezda. Sb. nauch. tr. Seriya: "Mekhanika"* [Influence of the type of fairing on the aerodynamic resistance of the inter-car space of a high-speed train. Sat. scientific tr. Series: "Mechanics"]. Dnepropetrovsk: Dnepropetr. nats. un-t Publ., 2006, vol. 1, Iss. 10, № 2/1, pp. 113–119. (In Russian)

11. Baker C. J. Keynote lecture — The flow around high speed trains. Proc. of the BBA VI conference. Milano, Italy, 2008, p 34.

12. Baker C. The flow around high speed trains. J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 2010, vol. 98, Iss. 6–7, pp. 277–298. DOI: 10.1016/j.jweia.2009.11.002.

13. Khayrullina A., Blocken B., Janssen W. et al. CFD simulation of train aerodynamics: train-induced wind conditions at an underground railroad passenger platform. J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 2015, vol. 139, pp. 100–110. DOI: 10.1016/j.jweia.2015.01.019.

Received: April 28, 2023

Accepted: May 28, 2023

Author's information:

Dostonbek D. KARIMOV — Postgraduate Student; dostonkarimov325@gmail.com

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

Andrey S. VATAEV — Associate Professor; avataev@yandex.ru

Yan. S. VATULIN — Associate Professor; yan-roos@yandex.ru

Kirill A. SOTNIKOV — Postgraduate Student; k-sotnikov@yandex.ru

УДК 338.47

Оценка перспектив развития совместного потребления транспортных услуг в городах Российской Федерации

Е. М. Волкова¹, М. В. Денисов²

¹Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

²Санкт-Петербургский филиал Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики», Российская Федерация, 190008, Санкт-Петербург, ул. Союза Печатников, 16

Для цитирования: Волкова Е. М., Денисов М. В. Оценка перспектив развития совместного потребления транспортных услуг в городах Российской Федерации // Бюллетень результатов научных исследований. — 2023. — Вып. 2. — С. 136–145. DOI: 10.20295/2223-9987-2023-2-136-145

Аннотация

Цель: Оценка перспектив развития новых форм совместного потребления транспортных услуг в российских городах, а также разработка научно обоснованных рекомендаций для компаний, реализующих подобные проекты. **Методы:** Для достижения цели исследования на первом этапе используются методы системного и сравнительного анализа, синтеза и другие методы общенаучного познания. На втором этапе авторы используют метод опроса посредством анкетирования потенциальных клиентов, сводки и группировки полученных результатов, статистического анализа структуры полученных ответов. Информационной базой исследования послужили материалы открытых источников, периодических изданий, а также интернет-ресурсов, в том числе открытых данных официальных сайтов каршеринговых компаний. **Результаты:** Основным научным результатом является оценка перспектив развития «народного» каршеринга в России с учетом места и роли данной бизнес-модели в стратегических документах, а также по итогам обработки результатов анкетирования потенциальных клиентов подобной транспортной услуги. Определены основные факторы, препятствующие развитию бизнес-модели «народного» каршеринга в городах Российской Федерации, и направления развития подобных транспортных услуг. **Практическая значимость:** В результате проведения исследования авторами сформированы практические рекомендации компаниям, реализующим подобные проекты, а также органам исполнительной власти субъектов РФ, ответственным за транспортное обслуживание населения. Определены возможности стимулирования инициативы «народного» каршеринга.

Ключевые слова: Городской транспорт, пассажирский транспорт, совместное потребление, пассажирские перевозки, рынок транспортных услуг, экономика транспорта, каршеринг.

Введение

Рынок услуг каршеринга стремительно развивается в России, несмотря на небольшой спад, наблюдавшийся в начале пандемии и связанный с ограничениями и запретом пользования каршерингом на определенный период времени.

В 2021 г. в Москве и Петербурге в тестовом режиме был запущен сервис «народного» каршеринга «Рули». Данный вид услуги отличается тем, что договор аренды заключается между двумя физическими лицами — собственником личного автомобиля и пользователем — которые могут быть друзьями или знакомыми. Авторы проекта «Рули» считают, что, чем больше людей пользуются одним автомобилем, тем меньше в городе машин: улично-дорожная сеть разгружается, а на парковках становится больше свободных мест. Это положительно влияет на облик города, его загруженность и экологию. В самом деле, множество научных публикаций, посвященных развитию городского пассажирского транспорта, связано с проблемами экологии и высокой степени загрузки улично-дорожной сети.

Компания Uber в транспортной отрасли является одним из лучших примеров, иллюстрирующих влияние экономики совместного использования в традиционном секторе. Uber и другие службы совместного использования поездок предлагают доступную, безопасную и удобную альтернативу традиционным вариантам транспорта, таким как общественный транспорт или такси. Только в одном Нью-Йорке водителей Uber примерно в 4,5 раза больше, чем водителей «желтых» такси. Это привело к снижению цены на такси в Нью-Йорке с 1 миллиона долларов в 2015 году до менее 200 тысяч долларов сегодня [1]. Аналогичным образом французская платформа BlaBlaCar переживает один из самых быстрых темпов роста в России. BlaBlaCar позволяет пользователям подбирать друг друга для долгих поездок на автомобиле, основываясь на таких качествах, как общие музыкальные предпочтения и комфорт в путешествии. «Для пассажиров BlaBlaCar — это доступное решение, и оно намного быстрее и удобнее, чем обычный поезд. Таким образом, потенциал BlaBlaCar в России огромен, но мы не ожидали, что он будет расти так быстро» [2]. Согласно данным, публикуемым в средствах массовой информации, реализация сервиса «народного» каршеринга сопряжена с технологическими, правовыми и организационными трудностями [3].

Целью нашего исследования является оценка перспектив развития «народного» каршеринга в Москве и Санкт-Петербурге.

Результаты исследования могут быть полезны как бизнесу, так и государству в части оценки перспектив интеграции сервиса «народного» каршеринга в систему транспортного обслуживания населения.

Материалы, методы и объекты исследования

Исследование проводилось в два этапа.

На первом этапе был проведен анализ стратегических документов, посвященных развитию транспорта в крупных городах. Были выявлены место и роль каршеринга в стратегической перспективе с точки зрения регулятора рынка транспортных услуг. Были проанализированы следующие документы:

- Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года;
- Стратегия цифровой трансформации транспортной отрасли Российской Федерации;
- Стратегия развития транспортной системы г. Москвы и Московской области на период до 2035 года;
- Стратегия развития транспортной системы Санкт-Петербурга и Ленинградской области на период до 2030 года.

На втором этапе мы провели анкетирование потенциальных пользователей «народного» каршеринга с целью выяснить их отношение к данной услуге. Анкетирование проводилось для двух категорий потенциальных пользователей: владельцы автомобилей (потенциальные арендодатели), а также потенциальные арендаторы.

В результате анкетирования была получена выборка, которая включает в себя ответы 120 респондентов. Большинство опрошенных (77,5 %) — люди в возрасте от 18 до 25 лет, вторая по доле возрастная группа (14,2 %) — это люди от 26 до 35 лет.

Более чем три четверти опрошенных проживают в Санкт-Петербурге (76,7 %). Почти десятая часть опрошенных (9,2 %) являются жителями Москвы. Опыт и мнения респондентов из других городов также могут быть полезны для данного исследования, несмотря на их малую долю в структуре опрошенных.

Результаты первого этапа исследования

Исходя из целей и задач Транспортной стратегии РФ, в среде городского пассажирского транспорта планируется реализация цифровой трансформации. Потенциал развития каршеринга рассматривается в рамках сервисной модели «мобильность как услуга» (Mobility as a Service/MaaS). Предполагается, что сервисы формата «мобильность как услуга» будут применяться на всех видах городского и пригородного общественного транспорта, при использовании личного транспорта (такси, каршеринг) и услуг проката средств микромобильности. Одним из итогов реализации Стратегии к 2030 году (а также в прогнозе до 2035 года) является активное внедрение беспилотного транспорта совместного

использования, заменяющего собой сегмент таксомоторных перевозок и каршеринга. Мероприятия по развитию «народного» каршеринга в Стратегии не предусмотрены.

В рамках Стратегии цифровой трансформации транспортной отрасли РФ также делается упор на развитие инфраструктуры для беспилотного транспорта, включая легковые автомобили. При этом как перспективные услуги не рассматриваются ни «традиционный», ни «народный» каршеринг.

В Стратегии развития транспортной системы г. Москвы и Московской области на период до 2035 года выделены такие приоритетные направления развития, как развитие пассажирских сервисов типа МaaS («мобильность как услуга») и развитие технологий автоматизированного каршеринга. Подробного описания, что имеется в виду под «автоматизированным» каршерингом, в Стратегии не приводится. Упоминаний о «народном» каршеринге также нет.

В Стратегии развития транспортной системы Санкт-Петербурга и Ленинградской области на период до 2030 года поставлен ряд задач, в числе которых есть задача повышения экологичности и энергоэффективности транспортной системы. Эта задача включает в себя стимулирование пользования сервисами совместного использования автомобилей (каршеринг, карпулинг и т. д.), велосипедным транспортом и средствами индивидуальной мобильности. При этом, как и во всех предыдущих документах, не рассматривается классификация каршеринга на «традиционный» и «народный». Важно отметить, что в рамках данной Стратегии развитие транспорта в Санкт-Петербурге включает мероприятия по развитию электрокаршеринга. Так, согласно Стратегии, в ближайшие годы в Санкт-Петербурге планируется построить 23 новые зарядки для электромобилей, в том числе для электрокаршеринга.

Анализ стратегических документов показал, что ключевым трендом развития пассажирского транспорта в городах будет развитие цифровых сервисов, а также стимулирование отказа от использования личного автотранспорта. Почти везде предусмотрено развитие каршеринга, но при этом о такой его разновидности, как «народный» каршеринг, нигде не упоминается. Несмотря на это, проекты «народного» каршеринга иницируются при поддержке органов государственной власти [4–6].

Результаты второго этапа исследования

В рамках исследования для анализа ответов мы выбрали 113 человек из 120 опрошенных, поскольку 7 человек сообщили, что не планируют получать водительское удостоверение и водить автомобиль. Большая часть опрошенных положительно относится к сервисам каршеринга (рис. 1).

Как Вы относитесь к каршеринговым сервисам (сервисам краткосрочной аренды автомобилей)?

120 ответов

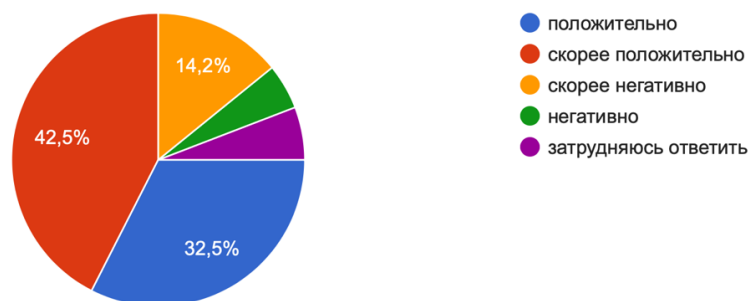


Рис. 1. Отношение пользователей к каршеринговым сервисам
(источник: составлено авторами)

В числе причин использования услуг каршеринга респонденты чаще всего отмечали сокращение расходов на обслуживание собственного автомобиля (44 упоминания). Второе и третье место с разницей в один голос респонденты отдали таким причинам, как отсутствие возможности купить личный автомобиль (32 упоминания) и большой автопарк прокатных автомобилей (31 упоминание). Следующий блок вопросов был направлен на то, чтобы оценить потенциал развития сервиса «народного» каршеринга. Оценка осведомленности о существовании сервисов «народного» каршеринга показала, что только 10,6 % респондентов (9 человек) слышали о «народном» каршеринге ранее. Однако среди остальных респондентов 75,3 % опрошенных (64 человека) отметили, что им было бы интересно узнать об этой услуге больше. Далее респондентам было предложено оценить свое отношение к сервису, прочитав его определение. Среди опрошенных почти 50 % отметили, что относятся к данной услуге положительно (рис. 2).

Народный каршеринг «Рули» – это сервис, который дает возможность легко поделиться своим автомобилем с близкими и знакомыми. Как бы Вы отнеслись к такому сервису?

120 ответов

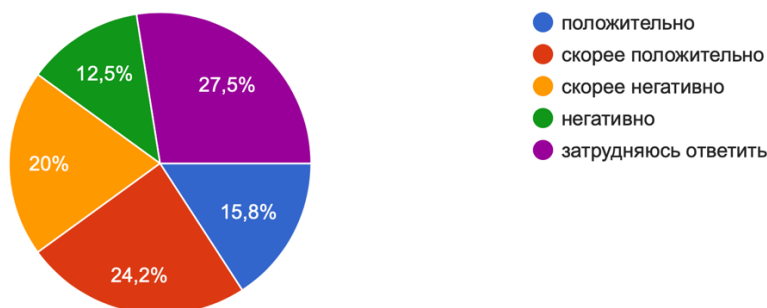


Рис. 2. Отношение респондентов к народному каршерингу «Рули»
(источник: составлено авторами)

Хотели бы Вы брать в аренду автомобиль своего близкого или знакомого человека?

120 ответов

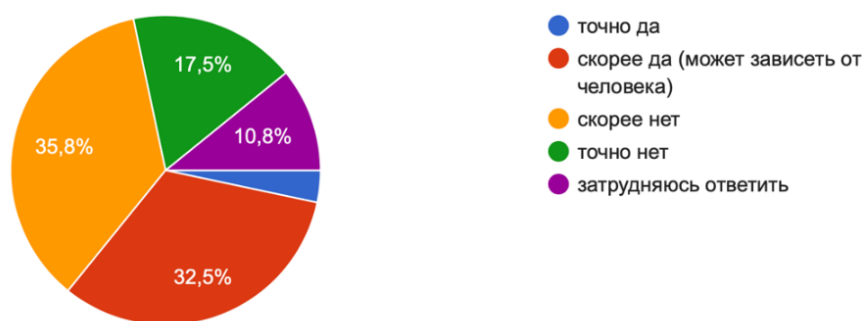


Рис. 3. Отношение респондентов к аренде автомобилей в рамках проекта народного каршеринга (источник: составлено авторами)

На следующем этапе респондентам было предложено оценить свое отношение к услуге «народного» каршеринга уже в качестве потенциального арендодателя или арендатора. При ответе на вопрос о сдаче своего автомобиля в аренду более половины опрошенных отметили, что не готовы доверить свой автомобиль друзьям. При ответе на вопрос о возможности взять в аренду автомобиль у близкого человека или друга также выяснилось, что большинство опрошенных относятся к такой возможности негативно (рис. 3).

Таким образом, отношение респондентов к основной идее проекта «народного» каршеринга как со стороны арендатора автомобиля, так и со стороны арендодателя можно охарактеризовать как достаточно негативное.

В рамках дальнейшего исследования мы попытались выяснить возможные причины такого отношения и недостатки данного сервиса с точки зрения пользователей.

Ключевой недостаток, который назвали респонденты — потенциальные арендодатели, связан с недоверием к навыкам вождения своих друзей и знакомых (72 упоминания). Следующие три недостатка, которые набрали практически равное количество упоминаний, включают: 1) увеличение пробега автомобиля (49 упоминаний), 2) нежелание делиться личным автомобилем с другими, пусть даже близкими людьми, поскольку автомобиль — это личное пространство (49 упоминаний), 3) потенциальное увеличение расходов на автомобиль из-за износа и более частых ремонтов (48 упоминаний). Также, по мнению респондентов, негативной чертой «народного» каршеринга можно считать вопрос межличностных отношений, а именно то, что неловко просить у друзей плату за пользование автомобилем (42 упоминания).

Считаете ли Вы данный проект перспективным?

120 ответов

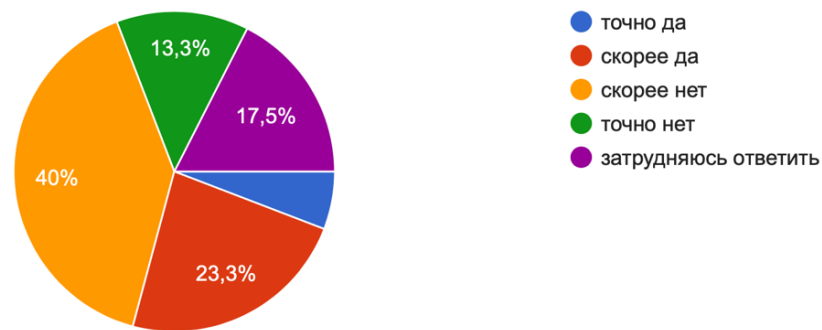


Рис. 4. Мнение респондентов о перспективах развития проекта народного каршеринга (источник: составлено авторами)

Главный недостаток с точки зрения потенциального арендатора схож с недостатком, который выделили владельцы автомобилей: обеспокоенность, связанная с возможными повреждениями на автомобиле друга или попаданием в ДТП (73 упоминания). Вторая негативная характеристика касается возможного ухудшения отношений с друзьями (39 упоминаний). Еще два недостатка, которые также стоит отметить, — это предположительное нежелание друзей делиться личным автомобилем (26 упоминаний) и отсутствие большого количества друзей, владеющих личным автомобилем (25 упоминаний).

Оценка перспектив развития «народного» каршеринга среди респондентов показала, что почти половина опрошенных считает, что данный проект не является перспективным (рис. 4).

Среди причин респонденты выделяли те же недостатки, которые были отмечены ранее, например вопрос доверия, высокие риски, ухудшение отношений с друзьями и другие.

На последнем этапе в ходе анкетирования были выявлены факторы, которые могли бы в перспективе убедить людей пользоваться услугами «народного» каршеринга. Наиболее часто опрошенные отмечали, что их могло бы убедить, если бы государство покрывало расходы на страхование автомобиля (50 упоминаний), поскольку для пользования «народным» каршерингом необходим страховой полис без ограничений круга лиц, допущенных к управлению автомобилем. Вторым по популярности упоминаний стало условие, если бы правительство давало финансовые льготы за участие в проекте (34 упоминания). К таким льготам можно отнести, например, налоговые льготы или скидки на оплату платных парковок.

Обсуждение результатов

В качестве ограничений второго этапа данного исследования можно отметить небольшую выборку респондентов, которая была получена в результате анкетирования. Сбор данных методом «снежного кома» может несколько искажать выборку, поскольку является неконтролируемым и не учитывает критерии репрезентативности. Также количество респондентов изначально было небольшим, и его пришлось еще сократить из-за того, что не у всех респондентов было водительское удостоверение.

Ограниченное количество информации о проекте «народного» каршеринга «Рули», его невысокая популярность на старте во многом объясняют результаты, которые были получены авторами. Будущие исследования российского «народного» каршеринга могут дополнить результаты, полученные в данной работе, когда проект станет общедоступным и можно будет проанализировать отзывы широкого круга реальных пользователей.

Выводы

Сервисы «народного» каршеринга обладают целым рядом преимуществ, в числе которых сравнительно невысокая стоимость услуг и возможность сокращения темпов автомобилизации в российских мегаполисах. Вместе с тем, несмотря на рост российского рынка услуг совместного потребления, проекты «народного» каршеринга, которые находятся в стартовой фазе реализации, не поддерживаются в стратегических планах развития городского транспорта и не пользуются особенной популярностью среди городского населения.

Результаты проведенного опроса потенциальных пользователей «народного» каршеринга показали, что они не считают данную услугу перспективной в связи с низким уровнем доверия и нежеланием испортить отношения с друзьями. Это следует учитывать инициаторам подобных проектов. С другой стороны, стимулировать развитие «народного» каршеринга могли бы различные формы государственной поддержки для участников подобных проектов и потенциальных пользователей данной услуги.

Библиографический список

1. Солдатова А. А. Анализ шеринг-экономики / А. А. Солдатова, С.А. Морозова // Студенческий электрон. научн. журн. — 2018. — № 24(44). — URL: <https://sibac.info/journal/student/44/126968>.
2. Аналитический материал на портале Tadviser. — URL: <http://www.tadviser.ru/>.
3. Скорость напрокат. Каршеринг набирает популярность в Петербурге // Ведомости. — URL: <https://spbvedomosti.ru/news/gorod/skorost-naprokat-karshering-nabiraet-populyarnost-v-peterburge/> (дата обращения: 12.01.2022).

4. Об утверждении Транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года: Распоряжение Правительства РФ от 27 ноября 2021 г. № 3363-р.

5. Стратегия развития транспортной системы г. Москвы и Московской области на период до 2035 года: определение Объединенной коллегии исполнительных органов государственной власти Москвы и Московской области от 14 января 2022 г. № б/н.

6. Стратегия развития транспортной системы Санкт-Петербурга и Ленинградской области на период до 2030 года: решение Координационного совета по развитию транспортной системы г. Санкт-Петербурга и Ленинградской области от 22 февраля 2022 г. № б/н.

Дата поступления: 10.04.2023

Решение о публикации: 10.05.2023

Контактная информация:

ВОЛКОВА Елена Михайловна — канд. экон. наук, доц., кафедра «Экономика транспорта»;
Moonlight34@ya.ru

ДЕНИСОВ Михаил Владимирович — магистрант, Департамент логистики и управления цепями поставок; mixail.denisov.1999@inbox.ru

Assessment of Prospects for the Development of Transport Sharing in the Cities of the Russian Federation

E. M. Volkova¹, M. V. Denisov²

¹Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

²HSE University — St. Petersburg, 16, Soyuza Pechatnikov str., St. Petersburg, 190008, Russia

For citation: Volkova E. M., Denisov M. V. Assessment of Prospects for the Development of Transport Sharing in the Cities of the Russian Federation. *Bulletin of scientific research results*, 2023, iss. 2, pp. 136–145. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2023-2-136-145

Summary

Purpose: To assess the prospects for the development of new forms of joint consumption of transport services in Russian cities, as well as the development of scientifically sound recommendations for companies implementing such projects. **Methods:** To achieve the goal of the research at the first stage the methods of systemic and comparative analysis, synthesis and other methods of general scientific cognition are used. At the second stage, the authors use the method of interviewing by means of questionnaires of potential clients, summary and grouping of the obtained results, statistical analysis of the structure of the responses received. The information base of the study has been the materials of open sources, periodicals, as well as Internet resources, including open data of the official sites of carsharing companies. **Results:** The main scientific result is the evaluation of the prospects of “people’s” carsharing in Russia, taking into account the place and role of this business model in the strategic documents, as well as the results of processing the questionnaires of potential customers of such a transportation service. The main factors hindering the development of the business model of “people’s” carsharing in the cities of the Russian Federation, as well as the directions of development of such transportation services have been determined. **Practical significance:** As a result of the study, the authors have formed practical recommendations for companies implementing such projects, as well as for the executive authorities of the subjects of the Russian Federation responsible for transport services. The possibilities of stimulating the initiative of “people’s” carsharing are determined.

Keywords: Urban transport, passenger transport, shared consumption, passenger transportation, transport services market, transport economy, carsharing.

References

1. Soldatova A. A., Morozova S. A. Analiz shering-ekonomiki [Analysis of the sharing economy]. *Studencheskiĭ elektron. nauchn. zhurn.* [Student electronic scientific journal]. 2018, Iss. 24(44). Available at: <https://sibac.info/journal/student/44/126968>. (In Russian)
2. *Analiticheskiĭ material na portale Tadviser* [Analytical material on the Tadviser portal]. Available at: <http://www.tadviser.ru/>. (In Russian)
3. Skorost' naprokat. Karshering nabiraet populyarnost' v Peterburge [Rental speed. Carsharing is gaining popularity in St. Petersburg]. *Vedomosti* [Vedomosti]. Available at: <https://spbvedomosti.ru/news/gorod/skorost-naprokat-karshering-nabiraet-populyarnost-v-peterburge/> (accessed: January 12, 2023). (In Russian)
4. *Ob utverzhdenii Transportnoy strategii Rossiyskoy Federatsii do 2030 goda s prognozom na period do 2035 goda: Rasporyazhenie Pravitel'stva RF ot 27 noyabrya 2021 g. № 3363-r* [On approval of the Transport Strategy of the Russian Federation until 2030 with a forecast for the period up to 2035: Decree of the Government of the Russian Federation dated November 27, 2021 № 3363-r]. (In Russian)
5. *Strategiya razvitiya transportnoy sistemy g. Moskvy i Moskovskoy oblasti na period do 2035 goda: opredelenie Ob"edinennoy kollegii ispolnitel'nykh organov gosudarstvennoy vlasti Moskvy i Moskovskoy oblasti ot 14 yanvarya 2022 g. № b/n* [Strategy for the development of the transport system of Moscow and the Moscow Region for the period up to 2035: definition of the Joint Board of Executive Bodies of Government of Moscow and the Moscow Region dated January 14, 2022, № b/n]. (In Russian)
6. *Strategiya razvitiya transportnoy sistemy Sankt-Peterburga i Leningradskoy oblasti na period do 2030 goda: reshenie Koordinatsionnogo soveta po razvitiyu transportnoy sistemy g. Sankt-Peterburga i Leningradskoy oblasti ot 22 fevralya 2022 g. № b/n* [Strategy for the development of the transport system of St. Petersburg and the Leningrad region for the period up to 2030: decision of the Coordinating Council for the development of the transport system of St. Petersburg and the Leningrad region dated February 22, 2022 № b/n]. (In Russian)

Received: April 10, 2023

Accepted: May 10, 2023

Author's information:

Elena M. VOLKOVA — PhD in Economics, Associate Professor, Department “Economics of Transport”; Moonlight34@ya.ru

Mikhail V. DENISOV — Master's Degree Student, Department “Logistics and Supply Chain Management”; mixail.denisov.1999@inbox.ru

УДК 338.47

Методологические аспекты организации грузоперевозок железнодорожным транспортом в проектах развития Восточного полигона с учетом рисков инфраструктурных ограничений

Н. А. Журавлева¹, В. В. Уманец²

¹Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

²Центральная дирекция инфраструктуры — филиал ОАО «РЖД» (ЦДИ), Российская Федерация, 129090, Москва, ул. Каланчевская, 35

Для цитирования: Журавлева Н. А., Уманец В. В. Методологические аспекты организации грузоперевозок железнодорожным транспортом в проектах развития Восточного полигона с учетом рисков инфраструктурных ограничений // Бюллетень результатов научных исследований. — 2023. — Вып. 2. — С. 146–160. DOI: 10.20295/2223-9987-2023-2-146-160

Аннотация

Цель: Разработка методологии организации грузовых перевозок в проекте комплексной модернизации БАМа и Транссиба (Восточный полигон). **Методы:** Исследование построено на основе оперативных данных грузового движения на железнодорожной инфраструктуре Восточного полигона ОАО «РЖД», их систематизации и анализе. Использован метод углубленной аналитики структурированных данных зависимости показателей эффективности проектируемой железнодорожной инфраструктуры и пропуска прогнозных объемов грузов с учетом порожних вагонов. **Результаты:** Актуализирована методология регулирования организации грузовых железнодорожных перевозок. Классифицированы ключевые проблемы, риски и ограничения грузовых перевозок в проекте развития Восточного полигона. Приведены результаты статистической обработки и интеллектуального анализа данных, уточняющих параметры прогнозной модели роста объемов грузов и увеличения пропускной способности Восточного полигона. Разработан алгоритм анализа грузовых железнодорожных перевозок в проектах развития Восточного полигона с учетом рисков инфраструктурных ограничений. **Практическая значимость:** Дана оценка степени влияния рисков инфраструктурных ограничений на эффективность организации грузового движения в проекте развития железнодорожной инфраструктуры.

Ключевые слова: Организация грузовых железнодорожных перевозок, Восточный полигон, риски инфраструктурных ограничений, прогнозная модель.

Введение

В период с 2021 по 2022 год произошли серьезные изменения в объемах и структуре грузовых железнодорожных перевозок. Экономическое давление и санкции на РФ, а также смещение торговли на Восток (Азию и Китай) обусловили необходимость ускорения в реализации национальных целей и стратегических задач развития железнодорожного транспорта Российской Федерации, а также комплексного плана модернизации и расширения магистральной инфраструктуры, изложенного в паспорте инвестиционного проекта [1]. При этом ряд

проектных и тактических решений требует серьезного анализа и обоснованной корректировки.

Основной поток по железнодорожной инфраструктуре Восточного полигона составляют грузы, направляемые на экспорт и внутренний рынок.

Так, за период с 2016 по 2020 год наступательно увеличивается динамика таких показателей перевозки грузов, как подача груженых вагонов и грузооборот, а если рассматривать период с 1989 по 2020 год, указанные показатели выросли еще более существенно (на 56 %). При этом рост показателей перевозки грузов стабильно прогрессирует [2].

Следствием указанного увеличения показателей перевозки грузов является рост грузонапряженности и нагрузки на ось, при этом создается ряд серьезных проблем для железнодорожной инфраструктуры. В частности, увеличивается количество и частота появления отказов технических средств при дефиците необходимого времени на техническое обслуживание [3], в свою очередь, каждый отказ влияет на скорость движения грузовых поездов, а равно на сроки доставки грузов, что влечет для ОАО «РЖД» существенные потери [4].

Рост объемов перевозки грузов на Восточном полигоне происходит так резко, что требуется оперативно пересматривать планы и прогнозы. Так, Минтранс РФ совместно с ОАО «РЖД» по итогам анализа прогнозной грузовой базы в июне 2022 года вынуждены были пересмотреть прогноз роста перевозки грузов по Восточному полигону с учетом изменений логистики более 400 предприятий, ранее не вывозивших свои грузы по данному направлению. По предварительным данным, рост грузовой базы к 2030 году относительно 2021 года прогнозируется порядка 60 процентов по всему маршруту [5].

В нынешних условиях нужна методология анализа и организации грузовых перевозок на данном полигоне, учитывающая как структурированные данные прогнозов объемов и классов грузов, так и неструктурированные данные о долгосрочных тенденциях геоэкономики и геополитики, в том числе ESG развития стран импортеров российских углеводородов.

Проблемам железнодорожных перевозок грузов по Восточному полигону начиная с 2013 года в научных исследованиях уделялось особое внимание. Исследовалась проблематика, в том числе методология анализа с разных направлений: оптимизации цепей поставок [6] и вагонопотоков [7], повышения уровня эксплуатации путевого комплекса [8] (повышения надежности рельсов [9], усиления бесстыкового пути и т. д. [10]), управления рисками увеличения нагрузки на инфраструктуру [11], разработки мер по увеличению пропускной способности на Восточном полигоне и его отдельных значимых участках (в т. ч. количественной оценки до и после реализации проектов) [12], повышения провозной способности за счет совершенствования технологии ремонтных работ [13] и др. Однако методологические аспекты анализа больших данных в организации грузоперевозок

железнодорожным транспортом в проектах развития Восточного полигона с учетом рисков инфраструктурных ограничений освещались недостаточно, что явилось поводом для настоящего исследования и попытки решения данной проблемы.

Материалы и методы

В данном исследовании использованы показатели проектов стратегии развития железнодорожного транспорта; результаты исследований отраслевых научных организаций, характеризующие состояния и перспективы развития железнодорожного транспорта. Основу исследования составили структурированные данные оперативных информационно-аналитических систем ОАО «РЖД» в сегменте перевозок грузов Восточного полигона: объемы перевозок грузов, техническое состояние железнодорожной инфраструктуры (отказы технических средств и технологические нарушения), показатели перевозки грузов (сроки доставки). Используются неструктурированные данные о прогнозах развития бизнеса основных грузоотправителей, программы «зеленого развития» экономики стран-экспортеров, цены и конкурентные предложения по определяющей номенклатуре грузов.

Использован метод статистического анализа данных о состоянии и проблемах железнодорожной инфраструктуры, ее «узких мест», пропускной способности и возможности перевозки всех предъявляемых грузов, в том числе с учетом Методики расчета возможностей железнодорожной инфраструктуры для пропуска объемов перевозок грузов и порожних вагонов, утвержденной распоряжением ОАО «РЖД» от 19 мая 2022 г. № 1324р.

Проведено ранжирование проектных рисков развития инфраструктуры полигона методом «А, В, С анализа». Использован метод Парето для классификации и последующей оценки рисков.

Результаты

1. Актуализирована методология регулирования организации грузовых железнодорожных перевозок.

Существующая основа методологической базы анализа перевозок грузов железнодорожным транспортом складывается из методов и подходов, содержащихся в методиках, сформированных на государственном уровне и на уровне ОАО «РЖД».

Методологическую базу на уровне государства возможно ранжировать по шести ключевым параметрам, разделенным на три крупных блока (рис. 4): 1) по субъектам сбора и анализа данных по железнодорожному транспорту; 2) по основным документам, составляющим нормативно-правовую основу; 3) по объектам статистического наблюдения по категориям использования железнодорожной

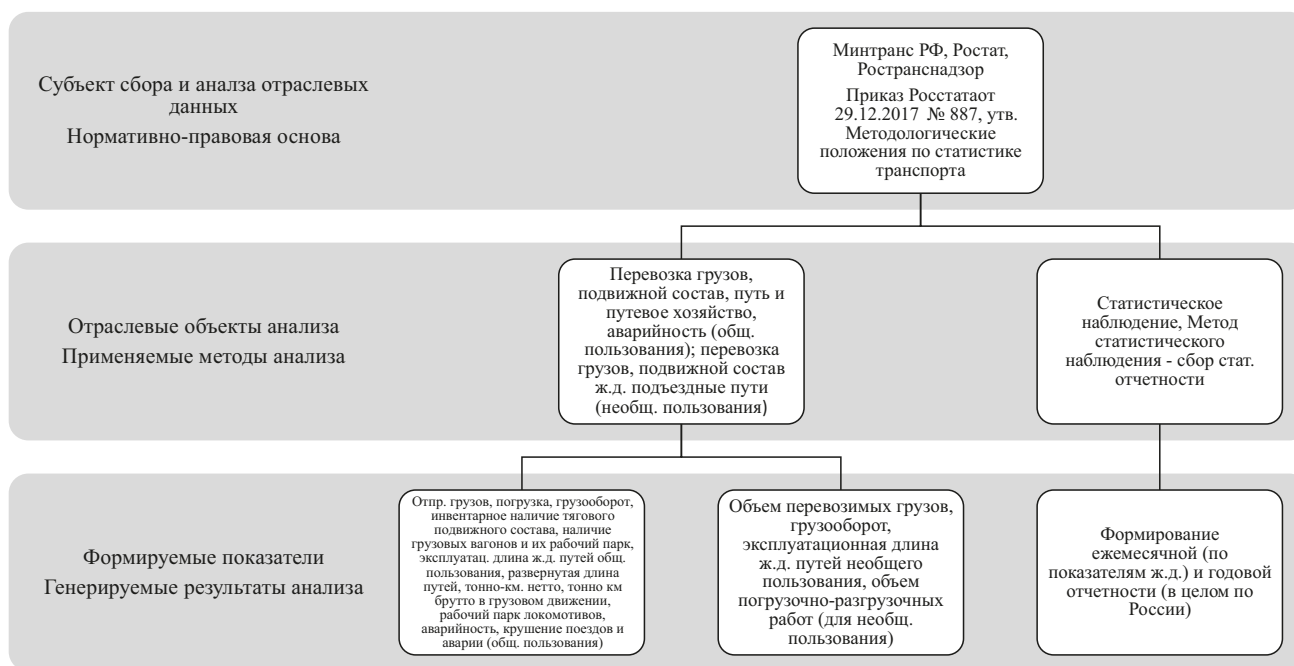


Рис. 1. Структура методологической базы анализа перевозок грузов железнодорожным транспортом на уровне государства. Составлено авторами

инфраструктуры (общего/необщего пользования); 4) по основным методам анализа; 5) по агрегированным показателям; 6) по результатам работы железнодорожного транспорта. В целом данная структура представлена на рис. 1.

Следующий классифицируемый объем методологической базы анализа перевозки грузов на уровне хозяйствующего субъекта ОАО «РЖД» ранжирован по четырем ключевым элементам железнодорожной транспортной системы, обеспечивающим перевозку грузов: управление перевозкой, подвижной состав, эксплуатация железнодорожной инфраструктуры, транспортное обслуживание, разделенным на блоки: нормативно-правовая основа, объект анализа; применяемые методы анализа и их результаты представлены в табл. 1.

В связи с проблемой инфраструктурных ограничений на Восточном полигоне, в отличие от традиционного подхода, в указанную выше систему методологической базы анализа включены методы, позволяющие при формировании прогноза учитывать эксплуатационную обстановку на железнодорожной инфраструктуре, а также экзогенные и эндогенные факторы риска отказов технических средств, которые содержатся в Межгосударственном отраслевом стандарте по управлению рисками в области железнодорожного транспорта ГОСТ 33433—2015 «Безопасность функциональная. Управление рисками на железнодорожном транспорте в Российской Федерации» (Стандарт 33433—2015), проанализированном в работе [14] и Методике расчета возможностей железнодорожной инфраструктуры для пропуска объемов перевозок грузов и порожних вагонов, утвержденной распоряжением ОАО «РЖД» от 19 мая 2022 г. № 1324р.

ТАБЛИЦА 1. Система методологической базы анализа основных параметров перевозок грузов железнодорожным транспортом ОАО «РЖД»

Элемент/показатель	Методики расчета показателей перевозок грузов	Методики использования подвижного состава	Методики расчета возможностей железнодорожной инфраструктуры	Методики оценки качества транспортного обслуживания
Нормативно-правовая база	Распоряжение ОАО «РЖД» от 18.12.2018 № 2717/р «Об утверждении методики расчета максимальной величины грузооборота на сети ОАО «РЖД»; Распоряжение ОАО «РЖД» от 04.03.2022 № 545/р «Об утверждении инструкции по расчету пропускной и провозной способности железных дорог»	Приказ Минтранса РФ от 05.05.2012 № 136 «Об утверждении Порядка мониторинга обеспечения железнодорожным подвижным составом грузоладельцев и использования железнодорожного подвижного состава участниками перевозочного процесса и Методики оценки эффективности использования железнодорожного подвижного состава»; Распоряжение ОАО «РЖД» от 09.02.2021 № 245/р «Об утверждении Методических указаний по сквозному хронологическому учету вагоно-часов задержек при осуществлении перевозок железнодорожным транспортом»	Распоряжение ОАО «РЖД» от 19.05.2022 № 1324р «Об утверждении Методики расчета возможностей железнодорожной инфраструктуры для пропуска объемов перевозок грузов и порожних вагонов»; Приказ Минтранса от 18.07.2018 № 266 «Об утверждении Методики определения пропускной и провозной способностей инфраструктуры железнодорожного транспорта общего пользования»	Распоряжение ОАО «РЖД» от 26.12.2007 № 2434/р «О формировании системы оценки удовлетворенности потребителей услуг в области грузовых перевозок, представляемых ОАО «РЖД»; Стандарт 1.05.503—2007
Объект анализа	Перевозка грузов, перемещение грузов, общий объем перевозок грузов	Показатели объема работы подвижного состава, отражающие его пробег, определяющие выполненные циклы работ, учитывающие временные затраты и задержки	Показатели возможности железнодорожной инфраструктуры	Разновидности перевозок грузов, номенклатуры грузов, категории доходности грузов
Применяемые методы анализа	Экономико-математическое моделирование, сбор статистической отчетности	Моделирование, анализ статистических данных	Статистический анализ данных, математическое моделирование	Интервьюирование экспертов, анализ статистических данных, математический анализ
Результаты анализа	Объем перевозок грузов по родам и видам железнодорожного сообщения и по дорогам; объем перевозок грузов (млн тонн), грузооборот с учетом (и без) пробега вагонов иных собственников в порожнем состоянии (млрд тонно-км); объем максимального грузооборота, определяемый в зависимости от пробега вагонов прочих собственников в порожнем состоянии и вспомогательных показателей	Оборот вагона, вагоно-часы задержек, пробег вагона, производительность вагона	Пропускная способность по перетонам, станциям, с учетом тягового электроснабжения электрифицированных железнодорожных линий и технических устройств локомотивного хозяйства	Показатели удовлетворенности потребителей услуг железнодорожной перевозки (сроки доставки грузов и т. д.)

Составлено авторами.

2. Классифицированы ключевые проблемы, риски и ограничения грузовых перевозок в проекте развития Восточного полигона.

Проблема выражена в росте протяженности путей по сети железных дорог с просроченным сроком ремонта, как следствие, с ограничением пропускных и провозных способностей на участках железнодорожной инфраструктуры (появления «узких мест»), создающих существенные препятствия для перевозки грузов (рис. 2, 3). Протяженность железнодорожных путей ОАО «РЖД» представлена в табл. 2.

ТАБЛИЦА 2. Протяженность железнодорожных путей ОАО «РЖД»

Показатели	Значения
Железнодорожные пути (общ., необщ. пользования), тыс. км	122
Эксплуатационная длина сети (общ. пользования), тыс. км, из них:	87
электрифицированных участков, тыс. км	51,2
участков с тепловозной тягой, тыс. км	49

Источник: [15].

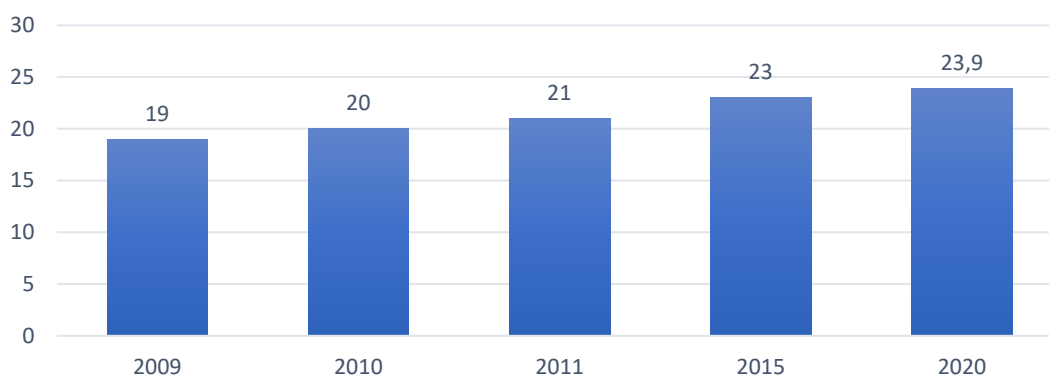


Рис. 2. Динамика протяженности путей с просроченным сроком ремонта, тыс. км.
Составлено по: [17]

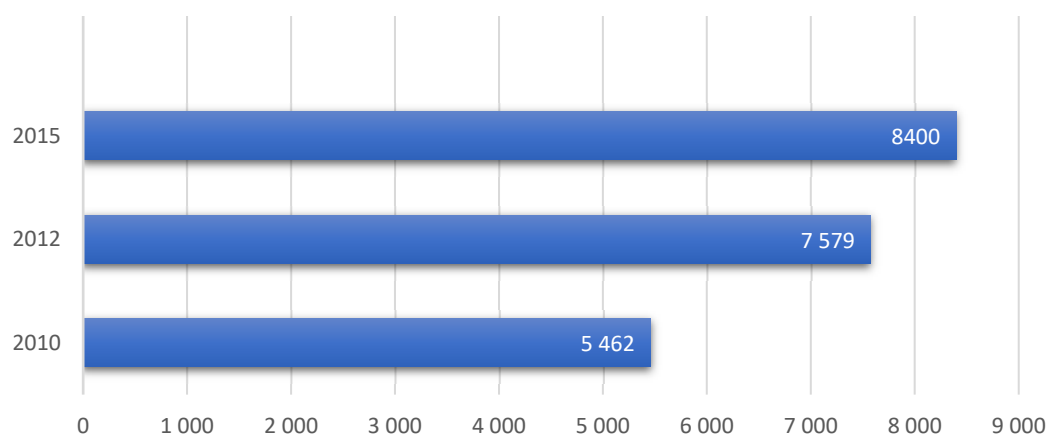


Рис. 3. Динамика протяженности «узких мест» на сети ОАО «РЖД», тыс. км.
Составлено по: [17]

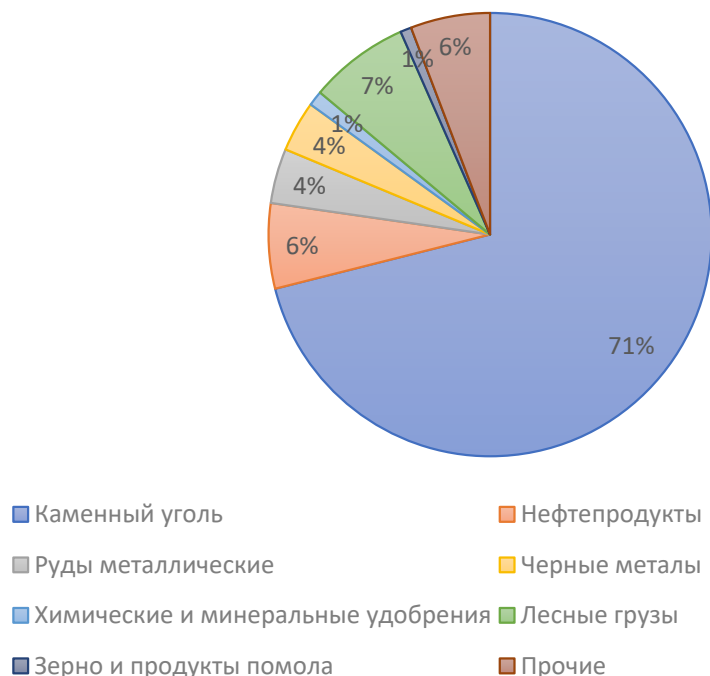


Рис. 4. Структура железнодорожных перевозок грузов ОАО «РЖД» на Дальнем Востоке, 2021 год, доли в процентах. Составлено по: [15]

Так, на конец 2020 года протяженность участков с просроченным сроком ремонта составляла 23,9 тыс. километров, или 17 процентов всей протяженности длины железнодорожных путей [16].

Существенная загрузка железнодорожных участков Восточного полигона выполняется за счет экспортных и внутрироссийских перевозок таких категорий грузов, как уголь, нефть и нефтепродукты (рис. 4).

Запланированные мероприятия по развитию Восточного полигона являются жизненно важными для значительного количества бизнес-структур страны, к которым относятся в первую очередь грузовладельцы и перевозчик — ОАО «РЖД».

К наиболее существенным мероприятиям относятся такие, как: переориентация потоков грузов с направлений западных регионов России, а также месторождений Урала, Сибири в сторону портов Дальнего Востока — это позволит осуществить последующую перевозку грузов морем в страны Азиатско-Тихоокеанского региона; перевозка грузов в Китай в сторону его промышленных агломераций и портов, а также перевозка через Монголию транзитных грузов — при использовании железнодорожных сухопутных переходов Дальнего Востока, Транссиба и станции Забайкальск.

Ведущую роль при этом играет инвестиционный проект, направленный на развитие железнодорожной инфраструктуры Восточного полигона и реализацию национальных целей и стратегических задач, поставленных Президентом РФ. В данный момент реализуется его второй этап — срок окончания предусмотренных в нем мероприятий на 2025 год.

По результатам реализации указанного проекта предполагается увеличение провозной способности железных дорог Восточного полигона до 180 млн тонн к 2024 году, а увеличение перевозок контейнерами в 4 раза, при сокращении времени перевозки от Дальнего Востока до западной границы России до 7 суток [1].

Реализация всех запланированных мероприятий позволит максимально устранить инфраструктурные ограничения, существующие в настоящее время на железных дорогах на Восточном полигоне.

Важно отметить, что инфраструктурные ограничения — это ограничения, формирующиеся под воздействием внутренних и внешних факторов, снижающих возможности расчетной пропускной и провозной способностей, а также качественных параметров эксплуатации магистральной транспортной инфраструктуры [18]. Выражаются они в отказах технических средств, которые формируют риски в прогнозируемых параметрах потребной, провозной, расчетной, наличной и результирующей пропускных способностей.

3. Разработан алгоритм анализа грузовых железнодорожных перевозок в проектах развития Восточного полигона с учетом рисков инфраструктурных ограничений.

Учет в алгоритме неструктурированных данных

Неструктурированные данные применялись для комплексной оценки внешних рисков ОАО «РЖД»: слабых сторон и угроз реализации инвестиционных проектов Восточного полигона. Анализировались данные о стоимости проектов, сроках их реализации; макроэкономические факторы; влияние климатических, инженерно-геологических и гидрологических условий; показатели изменения торгового грузооборота между Азией и Европой с учетом конкурентных маршрутов.

Учет в алгоритме структурированных данных

Оценка внутренних рисков с точки зрения инфраструктурных ограничений Восточного полигона. Выявлены новые риски, помимо рисков отказов технических средств, рис. 5.

На рис. 5 приведены основные риски в зависимости от доли вклада каждого. К группе *A* отнесены риски, имеющие наибольшую вероятность (частоту) реализации. С точки зрения управления рисками именно в отношении данной категории требуются срочные меры по их обработке и минимизации. В категорию *B* вошли риски, вносящие меньшую долю потерь, но также требующие принятия мер после обработки рисков категории *A*. При этом риски категории *B* должны находиться под системным контролем логистического менеджмента. Риски, которые отнесены к категории *C*, оказывают не такое значительное влияние на процесс перевозки грузов, но должны быть предметом регулярного мониторинга.

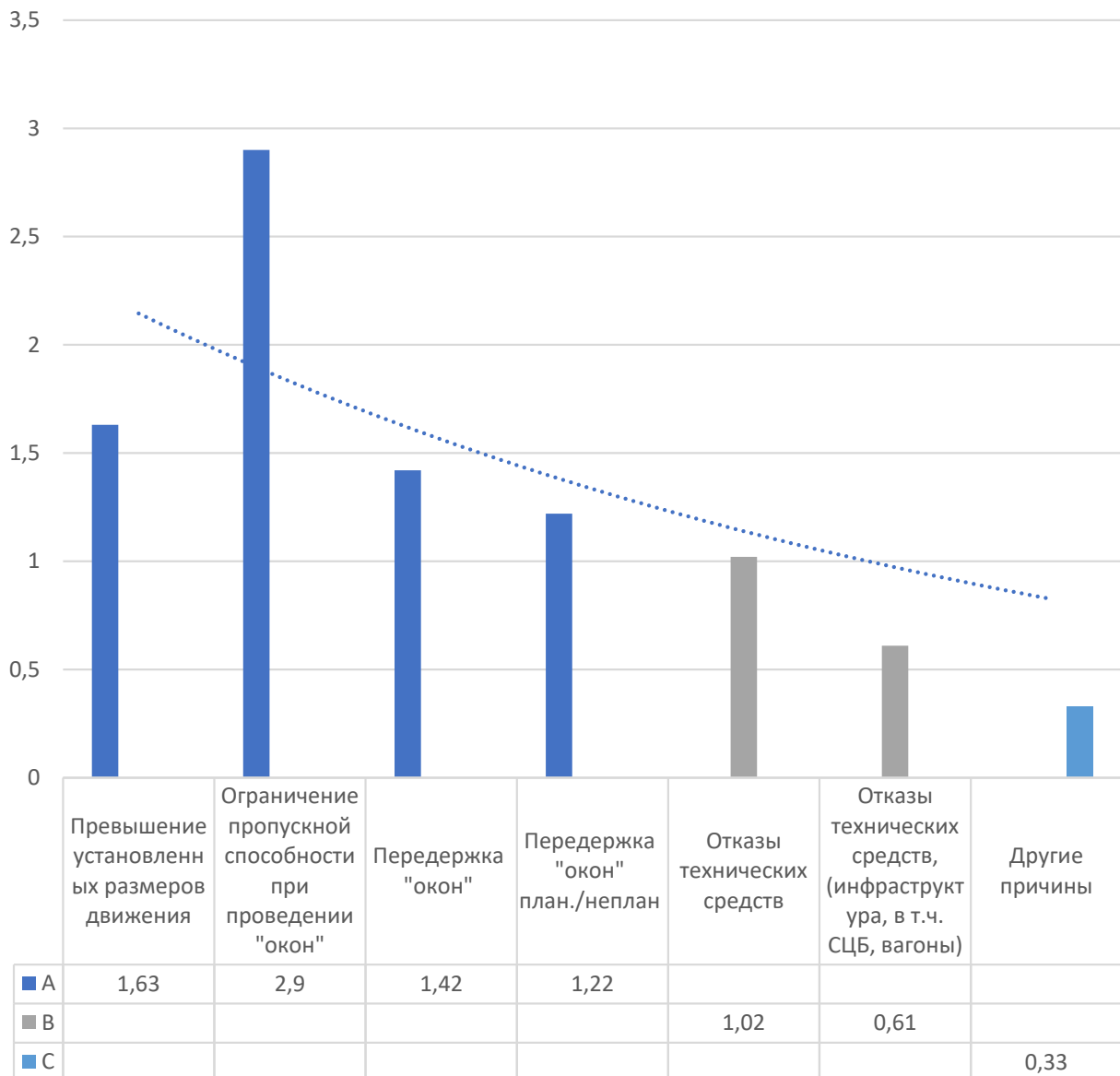


Рис. 5. Классификация основных рисков, вытекающих из инфраструктурных ограничений Восточного полигона. Составлено авторами

Именно указанные риски влекут нарушения со стороны ОАО «РЖД» обязательств перед грузовладельцами (сроков доставки), плановых параметров перевозки грузов (скорости доставки), нарушения требований безопасности движения и эксплуатации железнодорожной инфраструктуры, а также срыва реализации проектов развития Восточного полигона.

Таким образом, с учетом выполненного анализа металогической базы организации грузовых перевозок и исследования основных проблем Восточного полигона, а также классификации рисков, вытекающих из инфраструктурных ограничений Восточного полигона, сформирован алгоритм анализа грузовых железнодорожных перевозок в проектах развития Восточного полигона с учетом рисков инфраструктурных ограничений (табл. 3).

ТАБЛИЦА 3. Алгоритм анализа грузовых железнодорожных перевозок в проектах развития Восточного полигона с учетом рисков инфраструктурных ограничений

1. Ключевые цели анализа				
Вывоз перспективного грузопотока, обеспечение транзита через территорию страны		Реализация проектов развития и модернизации Восточного полигона		
2. Задачи анализа				
Увеличение пропускной и провозной способностей Восточного полигона		Управление рисками инфраструктурных ограничений	Ликвидация «узких мест»	Развитие железнодорожной инфраструктуры
3. Аналитическая база, позволяющая оценить состояние железнодорожной инфраструктуры (общего и необщего пользования) — текущие и перспективные провозные и пропускные способности				
Статистические данные из информационных ресурсов перевозчика ОАО «РЖД»	Статистическая отчетность, формируемая на уровне государства	Нормативно-правовые документы	Методические документы	
4. Выявление и анализ деструктивных факторов, влияющих на железнодорожную инфраструктуру (инфраструктурные ограничения)				
Отказы технических средств (безопасность движения, скорость и сроки доставки грузов)	Технические, технологические	Гидрологические, геологические	Климатические	Макроэкономические
5. Выполнение анализа грузовой работы				
Методы анализа			Показатели анализа	
Дифференцирование	Индексный	Относительных разниц	Провозная и пропускная способность	Объем погрузки
Интегральный	Системный	Ретроспективный	Грузооборот	Приведенная продукция
6. Прогнозирование железнодорожной перевозки грузов по Восточному полигону				

Данный алгоритм состоит из пяти этапов, иерархически выстроенных согласно базовому принципу анализа «сверху», широко применяемого при прогнозировании железнодорожных перевозок грузов. В первую очередь формируются ключевые цели и задачи анализа и составляющие его основу. В нашем случае в качестве целей определены — вывоз перспективного грузопотока и реализации развития и модернизации Восточного полигона. Основной задачей является увеличение пропускной и провозной способностей Восточного полигона, а подзадачи выражены в решении ключевых проблем — ликвидации «узких мест», управление развитием железнодорожной инфраструктурой и рисками инфраструктурных ограничений. Далее определена аналитическая база, способная оценить существующие провозные и пропускные способности железнодорожной инфраструктуры.

Важным аспектом является четвертый этап алгоритма, заключающийся в выявлении и анализе деструктивных факторов — рисков инфраструктурных ограничений. Пятый этап последовательно предписывает выполнение анализа грузовой работы на основе ключевых показателей перевозки с учетом имеющихся проблем инфраструктуры и основных методов анализа. Последовательное выполнение анализа по всем пяти этапам дает возможность получить необходимые данные, позволяющие повысить достоверность прогнозирования перевозки грузов по Восточному полигону.

Заключение

Основополагающие проблемы железнодорожного транспорта на Восточном полигоне прочно связаны с состоянием железнодорожной инфраструктуры, инвестиции в которую отрасль существенно недополучала в последние годы.

Выполненное исследование методологии организации грузоперевозок железнодорожным транспортом показало, что она не в полной мере учитывает существующие и постоянно меняющиеся проблемы развития железнодорожной инфраструктуры на Восточном полигоне.

Данное обстоятельство не позволяет железнодорожному транспорту гибко и быстро реагировать на изменения динамики и структуры грузопотоков, разрабатывать оптимальные управленческие решения развития его инфраструктуры.

Методологическая база организации грузовых перевозок должна строиться с учетом актуального набора структурированных и неструктурированных данных по проекту. В этом случае возможно создать операционную аналитическую модель оценки рисков проектов развития железнодорожной инфраструктуры.

Библиографический список

1. Паспорт инвестиционного проекта «Модернизация железнодорожной инфраструктуры Байкало-Амурской и Транссибирской железнодорожных магистралей с развитием пропускных и провозных способностей (второй этап)», утвержденный Распоряжением Правительства Российской Федерации от 28 апреля 2021 г. № 1100-р. — URL: www.consultant.ru (дата обращения: 27.01.2023).

2. Власенский А. А. О внедрении новых технологических и технических решений на Восточном полигоне / А. А. Власенский // Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО «РЖД»: научно-технический журнал. — М., 2021. — № 3/4. — С. 17.

3. Альберхт В. Г. Бесстыковой путь / В. Г. Альберхт, Н. П. Виногоров, Н. Б. Зверев и др.; под ред. В. Г. Альберхт, А. Я. Когана. — М.: Транспорт, 2000. — 408 с.

4. Правдин Н. В. Прогнозирование грузовых потоков / Н. В. Правдин, М. Л. Дыканюк, В. Я. Негрей. — М.: Транспорт, 1987. — 247 с.
5. Минтранс РФ и РЖД актуализируют прогноз по грузовой базе Восточного полигона с учетом изменений логистики // Интерфакс. — 20.06.2022.
6. Куренков П. В. Политранспортная логистика перевозок каменного угля на Дальневосточном полигоне / П. В. Куренков, С. П. Вакуленко, Д. Ю. Роменский и др. // Железнодорожный транспорт. — 2021. — № 8. — С. 20–26.
7. Король Р. Г. Логистические решения по регулированию порожнего вагонопотока ан Восточном полигоне железных дорог / Р. Г. Король, М. В. Нечипорук // Известия Транссиба. — 2020. — № 3(43). — С. 107–119.
8. Щепотин Г. К. Управление техническим состоянием пути в условиях модернизации Восточного полигона / Г. К. Щепотин // Путь и путевое хозяйство. — 2022. — № 3. — С. 35–37.
9. Щепотин Г. К. Влияние осевых нагрузок на срок службы рельсов Р65 и Р75 в условиях Сибири / Г. К. Щепотин // Путь и путевое хозяйство. — 2020. — № 7. — С. 23–24.
10. Щепотин Г. К. Усиление подшпального основания бесстыкового пути / Г. К. Щепотин. — Екатеринбург: УрГУПС, 2008. — 149 с.
11. Волков Б. А. Учет рисков при увеличении пропускной и провозной способности на Восточном полигоне БАМа / Б. А. Волков, Е. В. Ганенко, Н. А. Насонова // Путь и путевое хозяйство. — 2022. — № 8. — С. 33–35.
12. Куренков П. В. Мероприятия по развитию железнодорожной инфраструктуры Восточного полигона и участка Междуреченск — Тайшет / П. В. Куренков, О. Н. Мадьяр, А. В. Астафьев // ТРАНСПОРТ: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. — 2022. — № 7. — С. 1115. — DOI: 10.36535/0236-1914-2022-07-2.
13. Краковский Ю. М. Повышение провозной способности сети за счет рациональной организации восстановительных работ пути / Ю. М. Краковский, В. А. Начигин // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. — 2020. — Т. 66. — № 2. — С. 109–115. — DOI: 10.26731/1813-9108.2020.2(66).109-115.
14. Теоретические и концептуальные проблемы логистики: монография (научное издание) / Под. науч. ред. З. Б. Хмельницкой. — Пенза: РИО ПГАУ, 2019. — С. 26.
15. Транспорт России 2022: Стат. сб./Росстат. — М., 2022. — Т. 65. — 101 с.
16. Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период 2035 года, утвержденная Распоряжение Правительства Российской Федерации от 27 ноября 2021 г. № 3336-р.
17. Аналитический доклад Грузовой железнодорожный транспорт в 2010–2015 гг. ИПЕМ, май 2016 г.

18. Распоряжение ОАО «РЖД» от 5 августа 2022 г. № 2042/р «Об утверждении временной Методики расчета прогнозной модели доставки грузовых отправок по инфраструктуре ОАО «РЖД»». — URL: www.consultant.ru (дата обращения: 27.01.2023).

Дата поступления: 05.05.2023

Решение о публикации: 27.05.2023

Контактная информация:

ЖУРАВЛЕВА Наталья Александровна — д-р экон. наук, проф.; zhuravleva_na@mail.ru

УМАНЕЦ Виталий Владимирович — зам. начальника юридической службы Центральной дирекции инфраструктуры; compresor78@mail.ru

Methodological Aspects of the Organization of Freight Transportation by Rail in the Development Projects of the Eastern Polygon Considering Risks of Infrastructure Constraints

N. A. Zhuravleva¹, V. V. Umanets²

¹Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

²Central Directorate of Infrastructure — Branch of Russian Railways, JSC, 35, Kalanchevskaya St., Moscow, 129090, Russian Federation

For citation: Zhuravleva N. A., Umanets V. V. Methodological Aspects of the Organization of Freight Transportation by Rail in the Development Projects of the Eastern Polygon Considering Risks of Infrastructure Constraints. *Bulletin of scientific research results*, 2023, iss. 2, pp. 146–160. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2023-2-146-160

Summary

Purpose: To develop a methodology for the organization of freight transportation in the project of comprehensive modernization of the Baikal-Amur Mainline (BAM) and Trans-Siberian Railway (Transsib) (Eastern polygon).

Methods: The study is based on operational data of freight traffic on the railway infrastructure of the Eastern polygon of JSC “Russian Railways”, their systematization and analysis. The method of in-depth analysis of structured data on the dependence of the performance indicators of the projected railway infrastructure and the passage of projected freight volumes, taking into account empty wagons, is used. **Results:** The methodology of regulation of the organization of freight rail transportation has been updated. The key problems, risks and restrictions of freight transportation in the Eastern polygon development project are classified. The results of statistical processing and data mining are presented, specifying the parameters of the forecast model for the growth of freight volumes and the increase in the capacity of the Eastern polygon. An algorithm has been developed for analyzing freight rail transportation in the projects of the development of the Eastern polygon, taking into account the risks of infrastructure restrictions. **Practical significance:** An assessment of the degree to which risks of infrastructure restrictions impact the effectiveness of the organizing freight traffic in the railway infrastructure development project is given.

Keywords: Organization of freight rail transportation, Eastern polygon, risks of infrastructure restrictions, forecast model.

References

1. *Pasport investitsionnogo proekta "Modernizatsiya zheleznodorozhnoy infrastruktury Baykalo-Amurskoy i Transsibirskoy zheleznodorozhnykh magistralei s razvitiem propusknykh i provoznykh sposobnostey (vtoroy etap)"*, utverzhennyy Rasporyazheniem Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii ot 28 aprelya 2021 g. № 1100-r [Passport of the investment project "Modernization of the railway infrastructure of the Baikal-Amur and Trans-Siberian Railways with the development of throughput and carrying capacity (second stage)", approved by Order of the Government of the Russian Federation dated April 28, 2021 № 1100-r]. Available at: www.consultant.ru (accessed: January 27, 2023). (In Russian)
2. Vlasenskiy A. A. O vnedrenii novykh tekhnologicheskikh i tekhnicheskikh resheniy na Vostochnom poligone [On the introduction of new technological and technical solutions at the Eastern test site]. *Byulleten' Ob"edinennogo uchenogo soveta OAO "RZhD": nauchno-tekhnicheskij zhurnal* [Bulletin of the Joint Scientific Council of Russian Railways: a scientific and technical journal]. Moscow, 2021, Iss. 3/4, p. 17. (In Russian)
3. Al'berkht V. G., Vinogorov N. P., Zverev N. B. et al. *Besstykovoy put'* [Seamless path]. Moscow: Transport Publ., 2000, 408 p. (In Russian)
4. Pravdin N. V., Dykanyuk M. L., Negrey V. Ya. *Prognozirovaniye gruzovykh potokov* [Forecasting cargo flows]. Moscow: Transport Publ., 1987, 247 p. (In Russian)
5. *Mintrans RF i RZhD aktualiziruyut prognoz po gruzovoy baze Vostochnogo poligona s uchetom izmeneniy logistiki* [The Ministry of Transport of the Russian Federation and Russian Railways update the forecast for the cargo base of the Eastern range, taking into account changes in logistics]. Interfaks, 20.06.2022. (In Russian)
6. Kurenkov P. V., Vakulenko S. P., Romenkskiy D. Yu. Politransportnaya logistika perevozok kamennogo uglya na Dal'nevostochnom poligone [Polytransport logistics of coal transportation at the Far East landfill]. *Zheleznodorozhnyy transport* [Railway transport]. 2021, Iss. 8, pp. 20–26. (In Russian)
7. Korol' R. G., Nechiporuk M. V. Logisticheskie resheniya po regulirovaniyu porozhnego vagonopotoka an Vostochnom poligone zheleznykh dorog [Logistical solutions for the regulation of the empty car traffic in the Eastern range of railways]. *Izvestiya Transsiba* [Izvestiya Transsib]. 2020, Iss. 3(43), pp. 107–119. (In Russian)
8. Shchepotin G. K. Upravlenie tekhnicheskim sostoyaniem puti v usloviyakh modernizatsii Vostochnogo poligona [Influence of axial loads on the service life of R65 and R75 rails in Siberia]. *Put' i putevoe khozyaystvo* [Way and track management]. 2022, Iss. 3, pp. 35–37. (In Russian)
9. Shchepotin G. K. Vliyaniye osevykh nagruzok na srok sluzhby rel'sov R65 i R75 v usloviyakh Sibiri [Influence of axial loads on the service life of R65 and R75 rails in Siberia]. *Put' i putevoe khozyaystvo* [Way and track management]. 2020, Iss. 7, pp. 23–24. (In Russian)
10. Shchepotin G. K. *Usilenie podshpal'nogo osnovaniya besstykovogo puti* [Strengthening of the sleeper base of a seamless path]. Ekaterinburg: UrGUPS Publ., 2008, 149 p. (In Russian)
11. Volkov B. A., Ganenko E. V., Nasonova N. A. Uchet riskov pri uvelichenii propusknoy i provoznoy sposobnosti na Vostochnom poligone BAMA [Accounting for risks with an increase

in throughput and carrying capacity at the Eastern BAM test site]. *Put' i putevoe khozyaystvo* [Path and track facilities]. 2022, Iss. 8, pp. 33–35. (In Russian)

12. Kurenkov P. V., Mad'yar O. N., Astaf'ev A. V. Meropriyatiya po razvitiyu zheleznodorozhnoy infrastruktury Vostochnogo poligona i uchastka Mezhdurechensk — Tayshet [Measures for the development of the railway infrastructure of the Eastern test site and the section Mezhdurechensk — Taishet]. *TRANSPORT: nauka, tekhnika, upravlenie. Nauchnyy informatsionnyy sbornik* [TRANSPORT: science, technology, management. Scientific information collection]. 2022, Iss. 7, p. 1115. DOI: 10.36535/0236-1914-2022-07-2. (In Russian)

13. Krakovskiy Yu. M., Nachigin V. A. Povyshenie provoznoy sposobnosti seti za schet ratsional'noy organizatsii vosstanovitel'nykh rabot puti [Increasing the carrying capacity of the network due to the rational organization of track restoration work]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovanie* [Modern technologies. System analysis. Modeling]. 2020, vol. 66, Iss. 2, pp. 109–115. DOI: 10.26731/1813-9108.2020.2(66).109-115. (In Russian)

14. *Teoreticheskie i kontseptual'nye problemy logistiki: monografiya (nauchnoe izdanie). Pod. nauch. red. Z. B. Khmel'nitskoy* [Theoretical and conceptual problems of logistics: monograph (scientific edition). Under. scientific ed. Z. B. Khmel'nitsky]. Penza: RIO PGAU, 2019, p. 26. (In Russian)

15. *Transport Rossii 2022: Stat. sb./Rosstat* [Transport of Russia 2022: Stat. Sat/Rosstat]. Moscow, 2022, vol. 65, 101 p. (In Russian)

16. *Transportnaya strategiya Rossiyskoy Federatsii do 2030 goda s prognozom na period 2035 goda, utverzhennaya Rasporyazhenie Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii ot 27 noyabrya 2021 g. № 3336-r* [Transport strategy of the Russian Federation until 2030 with a forecast for the period of 2035, approved by the Order of the Government of the Russian Federation of November 27, 2021 № 3336-r]. (In Russian)

17. *Analiticheskiy doklad Gruzovoy zheleznodorozhnyy transport v 2010–2015 gg. IPEM, may 2016 g.* [Analytical report Freight rail transport in 2010–2015 IPEM, May 2016]. (In Russian)

18. *Rasporyazhenie OAO "RZhD" ot 5 avgusta 2022 g. № 2042/r "Ob utverzhdenie vremennoy Metodiki rascheta prognoznoy modeli dostavki gruzovykh otpravok po infrastrukture OAO "RZhD"* [Order of Russian Railways dated August 5, 2022 № 2042/r "On Approval of the Temporary Method for Calculating a Predictive Model for the Delivery of Freight Shipments through the Infrastructure of Russian Railways"]. Available at: www.consultant.ru (accessed: January 27, 2023). (In Russian)

Received: May 05, 2023

Accepted: May 27, 2023

Author's information:

Natalia A. ZHURAVLEVA — Dr. Sci. in Economics, Professor; zhuravleva_na@mail.ru

Vitaliy V. UMANETS — Deputy Head of the Legal Service of the Central Directorate of Infrastructure; compresor78@mail.ru

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ — ТРАНСПОРТУ

УДК 625.12.033.38

Перспективные технологии усиления основной площадки земляного полотна подбалластным защитным слоем с применением высокопроизводительных комплексов российского производства

С. В. Акулинин, В. Б. Воробьев, В. А. Ульянов

АО «Тулажелдормаш», Группа ПТК, Российская Федерация, 105066, Россия, Москва, ул. Ольховская, 4/2

Для цитирования: Акулинин С. В., Воробьев В. Б., Ульянов В. А. Перспективные технологии усиления основной площадки земляного полотна подбалластным защитным слоем с применением высокопроизводительных комплексов российского производства // Бюллетень результатов научных исследований. — 2023. — Вып. 2. — С. 161–170. DOI: 10.20295/2223-9987-2023-2-161-170

Аннотация

Цель: Рассмотреть вопрос необходимости проведения мероприятий по усилению основной площадки земляного полотна железнодорожного пути для снижения влияния ремонтов пути на инфраструктуру и обеспечения и повышения провозной способности железнодорожных линий. Показать необходимость увеличения выработки ведущих машин по технологии закрытого перегона с высоким качеством, а также предложить проведение дополнительных мероприятий, направленных на оптимизацию количества машин и персонала, задействованных в производственном процессе. **Методы:** Сравнение применяемых в настоящее время технологий усиления основной площадки земляного полотна подбалластными защитными слоями автотракторной техникой и железнодорожно-строительными машинами, путевыми комплексами зарубежного производства с предлагаемой технологией и использованием высокоэффективной путевой техники отечественного производства. Анализ показателей выработки и выбор оптимального варианта. **Результаты:** Указана необходимость приоритетного выбора отечественных технологий и путевых машин для выполнения капитальных ремонтов пути как наиболее эффективного способа повышения несущей способности верхнего строения пути. Рассмотрены актуальные требования к технологическим процессам и путевой технике для обеспечения устойчивой эксплуатации железнодорожного пути в условиях растущей грузонапряженности железных дорог. Представлены технические характеристики новой путевой машины для вырезки и уплотнения балласта с созданием подбалластных защитных слоев. Приводятся данные об особенностях конструкции путевой машины. **Практическая значимость:** Показаны необходимость внедрения высокотехнологичной техники и инновационных технологий, обладающих высокой выработкой в сравнении с зарубежными аналогами, и возможный экономический эффект от внедрения предлагаемых технологий. Предложенная технология позволит увеличить продолжительность жизненного цикла железнодорожного пути и снизить расходы на его эксплуатацию.

Ключевые слова: Железнодорожный путь, подбалластный защитный слой, технологический процесс, ремонт пути, многофункциональная путевая техника.

Введение

Одним из важнейших средств железнодорожного транспорта является железнодорожный путь. От состояния железнодорожного пути зависят непрерывность и безопасность движения поездов, объем перевозок [1]. Железнодорожный путь работает в различных климатических условиях, и на его эксплуатационные свойства непосредственное влияние оказывают природные факторы (температура, атмосферные осадки и пр.) [1, 2]. От организации текущего содержания и соблюдения периодичности ремонтов зависит долговечность конструкции верхнего строения пути.

К 2025 году на сети железных дорог прогнозируется увеличение количества участков пути с грузонапряженностью более 200 млн т-км брутто/км в год. Возможные реалии будущей среды определяются следующими параметрами:

- рост грузонапряженности на 20–60 %;
- уменьшение количества «окон» на 30–50 %;
- снижение «оконного» времени на 20–50 %;
- снижение предоставляемых технологических «окон».

Для реализации Транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года, утвержденной распоряжением Правительства РФ от 27 ноября 2021 г. № 3363-р [3], необходимо развивать грузовые перевозки с повышенными осевыми нагрузками, весом и длиной поезда, обеспечить стабильную эксплуатационную работу инфраструктуры.

Проблема обеспечения стабильности земляного полотна

Земляное полотно на всем протяжении сети 86,763 тыс. км в основном удовлетворяет требованиям перевозочного процесса, однако с различными дефектами и деформациями эксплуатируется 7,804 тыс. км (9 %). Очевидно, что при разработке проектов новых насыпей, особенно на слабом основании (переувлажненных глинистых грунтах), актуальное значение имеют правильная оценка величины осадки насыпи и обеспечение уширения основной площадки земляного полотна. Сложные условия работы грунтов основной площадки привели к широкому распространению дефектов и деформаций этого элемента в виде балластных углублений и пучин, что вызывает повышенные затраты на содержание пути. Нормативный срок превышен на 52,5 тыс. км, или 61 %, что способствует накоплению и дальнейшему развитию дефектности.

В настоящее время ОАО «Российские железные дороги» с 2019 года с участием ведущих профильных вузов проводит активную работу по разработке конструкции и технологий содержания железнодорожного пути, обеспечивающих наработку 2,5 млрд тонн брутто пропущенного тоннажа. Однако возможности

усиления пути за счет повышения мощности верхнего строения ограничены, в то время как работа с характеристиками земляного полотна более перспективна.

Изучением работы земляного полотна и возникающих в ходе эксплуатации деформаций и дефектов занимались многие отечественные и зарубежные ученые. Значительный вклад в развитие отечественной науки о земляном полотне внесли Е. С. Ашпиз, В. В. Виноградов, Г. М. Шахунянц, Т. Г. Яковлева и др. Вопросы технологии и организации работ при строительстве и реконструкции земляного полотна железных дорог нашли отражение в работах С. П. Першина, А. М. Призмазона, Э. С. Спиридонова и др.

Опыт укладки подбалластных защитных слоев

Зарубежный опыт показал, что на содержание пути с подбалластным защитным слоем требуется 20 % расходов от работ на путях традиционных конструкций, так как исключается трудоемкая выправка пути по уровню, обычно необходимая в процессе эксплуатации. Подбалластный защитный слой, уложенный на земляное полотно, может служить 40–50 лет. При этом в ходе текущего содержания пути выполняется только натяжение клемм рельсовых скреплений немногочисленными мобильными бригадами.

Отечественные исследования и работы по сооружению защитного слоя земляного полотна из щебеночно-песчаной смеси проводились на опытных полигонах, в том числе на участке экспериментального кольца ВНИИЖТа на станции Щербинка Московской железной дороги, что позволило накопить определенный опыт для дальнейших разработок нормативной базы и технологий [4].

Ведущими учеными Петербургского государственного университета путей сообщения под руководством доктора технических наук, профессора Л. С. Блажко выполнен анализ способов повышения несущей способности грунтов основной площадки земляного полотна на примере устройства подбалластного защитного слоя на линии Санкт-Петербург — Москва общестроительной техникой и машиной АНМ 800-R австрийской компании Plasser & Theurer, предназначенной для механизации устройства подбалластных защитных слоев [5, 6]. Производительность АНМ 800-R составляет до 70 м/ч в зависимости от глубины и ширины вырезки имеющегося балластного слоя, а также от рода грунта срезаемого земляного полотна.

По качеству выполняемых работ традиционная дорожно-строительная техника не могла конкурировать с АНМ 800-R, так как не позволяла обеспечить равномерную оптимальную влажность смеси по всему слою, а следовательно, достигнуть максимального равнопрочного уплотнения. Кроме того, существовали сложности с равномерной толщиной слоя и качеством поверхности.

Недостатки традиционных технологий

Основным и существенным недостатком традиционной технологии вырезки и очистки загрязненного балласта являлось отсутствие оборудования на щебнеочистительных машинах автоматизированной системы с контурами подъемно-рихтовочного устройства и заглублением баровой цепи на проектные отметки. АНМ 800-R выполняла все эти операции автоматически, однако производительность машины была низкой. Повысить ее можно было за счет увеличения количества машин, но это повлекло бы дополнительные расходы на эксплуатацию техники и содержание контингента.

Существующие во время ремонтных работ ограничения не позволяют применить многие из тех способов, которые используются при строительстве нового земляного полотна. Устройство классических защитных слоев из смеси щебнеочно-песчано-гравийных грунтов — надежный способ усиления основной площадки, однако его главный недостаток заключается в необходимости вырезки грунтов на глубину до 1 м, что в условиях большинства российских железных дорог становится дорогостоящей технологией и не вписывается в традиционные схемы ремонта пути.

Таким условиям хорошо отвечают способы с применением геосинтетических материалов, которые обеспечивают выполнение необходимых функций при меньшей толщине. К примеру, георешетки позволяют сократить толщину защитного слоя более чем в два раза, улучшив его характеристики. Эффективное применение геосинтетических материалов возможно только при соблюдении условий, при которых геотекстильный материал сохраняет свои фильтрационные свойства в течение нормативного срока службы [7, 8].

Приоритетным направлением является усиление земляного полотна на реконструкции и капитальном ремонте пути в сжатые сроки, минимизируя влияние ремонта на движение поездов. Выбор организационно-технологических решений при выполнении реконструкции и ремонте земляного полотна получил обоснование в трудах ученых ПГУПС и РУТ (МИИТ), коллективами которых наряду с научными исследованиями проведена огромная практическая работа с ремонтными и строительными организациями.

Исходя из этого, крайне необходима разработка и внедрение новых требований к технике и технологиям ремонта пути.

Особенности отечественной разработки

Существующие технологии укладки подбалластных защитных слоев автодорожной техникой и дорогостоящей низкопроизводительной машиной АНМ 800-R не удовлетворяли требованиям железнодорожников в условиях растущего объема

перевозок. Перед отечественными машиностроителями стояла сложная задача — разработать такую технику, которая позволяла бы выполнять укладку подбалластного защитного слоя без съема рельсошпальной решетки в «окно» с выработкой, превышающей зарубежные аналоги.

Благодаря результатам научных исследований ПГУПС в области усиления основной площадки земляного полотна, а также исходя из опыта укладки подбалластного защитного слоя на Октябрьской железной дороге стало возможным определить основные параметры и требования к проектированию техники и к материалу подбалластного защитного слоя.

Для решения изложенной задачи конструкторским коллективом ООО «КБ «Тулажелдормаш» (входит в Группу ПТК) разработана путевая машина для вырезки, укладки подбалластного защитного слоя и уплотнения балласта ЩОМ-МР (щебнеочистительная машина — машина распределительная), внедрение которой позволит повысить производительность и эффективность работ.

Коллективом РУТ (МИИТ) совместно с конструкторами ООО «КБ «Тулажелдормаш» в 2022 году были разработаны «Технические требования к конструкции подбалластного защитного слоя с использованием продуктов от вырезки старого балласта щебнеочистительными комплексами» [9].

Стендовые испытания виброплит ЩОМ-МР проводились на заводе АО «Тулажелдормаш» и показали выработку 200 м/ч с модулем деформации подбалластного защитного слоя, соответствующего «Техническим требованиям к конструкции подбалластного защитного слоя с использованием продуктов от вырезки старого балласта щебнеочистительными комплексами».

На основании результатов стендовых испытаний предложена технология на основе отечественной разработки.

Внедрение ЩОМ-МР (рис. 1) в цепочке с ЩОМ-2000 (рис. 2) позволит повысить качество выполнения работ по вырезке и очистке загрязненного щебеночного балласта, а также создание подбалластного защитного слоя.

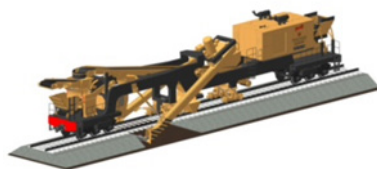


Рис. 1. Машина ЩОМ-МР



Рис. 2. Комплекс для устройства подбалластного защитного слоя

Технические характеристики ЩОМ-МР

Параметр	Величина показателя
Вписывание в габарит в транспортном положении, ГОСТ 9238—2013	1-Т
Производительность в режиме: – удаления выплесков, м ³ /ч – замены балласта, м/ч – формирования подбалластного защитного слоя, м/ч	600 200 200
Глубина вырезки щебня под подошвой шпал, мм	250–600
Ширина вырезки щебня, мм	4000–6000
Глубина вырезки накопленных балластных материалов вторым баровым устройством от уровня верха головки рельсов, мм	до 600
Ширина вырезки накопленных балластных материалов вторым баровым устройством, мм	3900–6000
Скорость движения собственным ходом в двух направлениях, км/ч	0,06–1,5
Транспортировка осуществляется по кривым малого радиуса: – ЩОМ-МР – ЩОМ-МР в сцепе с ЩОМ-2000	от 125 м от 130 м
Величина понижения пути за один проход машины, мм, не менее	150
Мощность энергетической установки, кВт, не менее	400
Экипаж, чел.	4
Срок службы, лет	35

При работе комплекса обеспечивается укладка подбалластного защитного слоя в уплотнительном состоянии за один проход толщиной от 200 до 400 мм. ЩОМ-МР может выполнять работу в кривой минимального радиуса 300 м. Подробные характеристики машины представлены в таблице.

Комплекс машин способен выполнять сразу несколько ключевых задач: получать необходимый объем засорителя и обеспечивать сформированный заданный гранулометрический состав подбалластного защитного слоя с последующей подачей его под рельсошпальную решетку. Это гарантирует стабильную работу по укладке и уплотнению подбалластного защитного слоя с производительностью до 200 м/ч и повторное использование очищенного балласта.

Комплекс оснащен подъемно-рихтовочными устройствами, которые устанавливают рельсошпальную решетку на проектную ось пути. Захваты роликового типа позволяют иметь сменные бандажи по рабочим поверхностям, обеспечивающие удержание рельсовой головки. Наличие двухпоточной конвейерной системы обеспечивает подачу материала полного объема с каждой из сторон. Уплотнение верхней и боковой поверхности щебеночно-песчано-гравийной смеси выполняется до требуемого значения — 120 Мпа коэффициента деформативности. За беспрепятственную работу ЩОМ-МР отвечает отвал-планировщик высотой не менее 300 мм и конвейер-распределитель с шириной рабочей зоны 4–5 м.

Предлагаемая концепция обеспечивает:

- формирование подбалластного защитного слоя высотой до 300 мм и шириной до 5 м в полном объеме из материала балластного слоя, вырезанного и очищенного первой секцией ЩОМ-2000;
- использование очищенного щебня в объеме до 700 м³/км для предварительной балластировки пути;
- применение комплекса на всех технологиях ремонта пути при очистке или замене балласта, учитывая достигнутую производительность при формировании подбалластного защитного слоя и выполнении операции балластировки пути;
- дополнительным преимуществом данной концепции является использование 100 % объема вырезанного первого слоя балласта для формирования подбалластного защитного слоя и балластировки пути, что на 40 % сокращает объем вывозимых материалов при работе комплекса.

Перспектива применения технологии

В апреле 2021 года на полигоне Юго-Восточной железной дороги в рамках пилотного проекта по плану внедрения технологий ремонтно-путевых работ отработывалась новая технология глубокой очистки и стабилизации балластной призмы с применением щебнеочистительного комплекса ЩОМ-2000 и выправочно-подбивочно-отделочной машины ВПО-С. Результаты показали ее преимущества по критериям рабочей скорости, производительности и качеству стабилизации балластной призмы — темпы выполнения ремонтных работ увеличились вдвое.

При включении в состав технологической цепочки ЩОМ-МР решаются сразу две сложные задачи, связанные с созданием подбалластно-защитного и послойного объемно-уплотненного балластного слоя из очищенного щебня.

Главное преимущество такой технологии заключается в том, что равномерная объемно-уплотненная балластная призма правильной геометрии создается сразу же по завершении «окна», что дает возможность без промедления открывать движение поездов со скоростью от 80 до 100 км/ч вместо установленных нормативом 60 км/ч [10].

Это позволит значительно повысить пропускную способность на сети железных дорог. Следует также отметить, что внедрение технологии укладки подбалластных защитных слоев увеличивает межремонтные сроки верхнего строения пути до 20 %. Начало серийного выпуска новой техники намечено на 2025 год.

Права интеллектуальной собственности оформлены патентом на изобретение «Способ формирования подбалластного защитного слоя и комплекс машин для его осуществления» [11].

Библиографический список

1. СП 238.1326000.2015. Железнодорожный путь. — М.: Стандартинформ, 2015. — 71 с.
2. Яковлева Т. Г. Железнодорожный путь / Т. Г. Яковлева, Н. И. Карпущенко, С. И. Клинов и др.; Под ред. Т. Г. Яковлевой. — М.: Транспорт, 2010. — 405 с.
3. Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года, утвержденная распоряжением Правительства РФ от 27 ноября 2021 г. № 3363-р.
4. Козлов А. В. Сооружение защитного слоя земляного полотна из щебеночно-песчаной смеси на опытном участке экспериментального кольца ВНИИЖТа на ст. Щербинка Московской железной дороги / А. В. Козлов // Научные труды ОАО ЦНИИС. — М.: ОАО ЦНИИС, 2005. — Вып. 228. — С. 44–56.
5. Блажко Л. С. Анализ способов повышения несущей способности грунтов основной площадки земляного полотна / Л. С. Блажко, С. Н. Чуян, В. Б. Захаров и др. // Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2016. — Вып. 3(48). — С. 328–336.
6. Шмелев В. А. Современные технологии и материалы, применяемые для ремонта и усиления земляного полотна / В. А. Шмелев // Материалы международной научно-технической конференции, посвященной 100-летию со дня рождения профессора Г. М. Шахунянца. — Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути и сооружений. Повышение качества подготовки специалистов и уровня научных исследований. 19–20 октября 2004 г. — М.: МИИТ, ОАО «РЖД», 2004.
7. Блажко Л. С. Защита от кольматирования геотекстильных материалов, применяемых в балластной призме в качестве разделительного слоя / Л. С. Блажко, В. И. Штыков, Ю. А. Канцибер и др. // Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2014. — Вып. 4(41). — С. 22–26.
8. Уланов И. С. Оценка осадки земляного полотна на участках слабых оснований / И. С. Уланов // Мир транспорта. — 2017. — № 4. — С. 102–108.
9. Технические требования к конструкции подбалластного защитного слоя с использованием продуктов от вырезки старого балласта щебнеочистительными комплексами (для опытного применения), РУТ (МИИТ), утвержденные ОАО «РЖД» № ЦДИ-375 от 22.02.2022. — 5 с.
10. Инструкция по обеспечению безопасности движения поездов при производстве путевых работ от 14.12.2016 № 2540/р. — 209 с.
11. Патент № 277616 Российская Федерация. Способ формирования подбалластного защитного слоя и комплекс машин для его осуществления / ООО «КБ «Тулажелдормаш», 14.07.2022.

Дата поступления: 23.03.2023

Решение о публикации: 07.04.2023

Контактная информация:

АКУЛИНИН Сергей Викторович — технический директор; 3953@svmail.ru

ВОРОБЬЕВ Владимир Борисович — канд. техн. наук, председатель совета директоров; puteetz@yandex.ru

УЛЬЯНОВ Виталий Андреевич — инженер; 0208@svmail.ru

Prospective Technologies for Strengthening the Main Trackbed with a Sub-Ballast Protective Layer Using High-Performance Complexes of Russian Production

S. V. Akulinin, V. B. Vorobyov, V. A. Ulyanov

AO "Tulazheldormash", PTK Group, 4/2 Olkhovskaya str., Moscow, 105066, Russian Federation

For citation: Akulinin S. V., Vorobiev V. B., Ulyanov V. A. Prospective Technologies for Strengthening the Main Trackbed with a Sub-Ballast Protective Layer Using High-Performance Complexes of Russian Production. *Bulletin of scientific research results*, 2023, iss. 2, pp. 161–170. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2023-2-161-170

Summary

Purpose: To examine the necessity of conducting measures to strengthen the main trackbed of railway tracks in order to reduce the impact of track repairs on infrastructure, ensure and enhance the carrying capacity of railway lines. To demonstrate the need to increase the output of high-quality leading machines using closed-loop technology, as well as to propose additional measures aimed at optimizing the number of machines and personnel involved in the production process. **Methods:** A comparison is made between the currently employed technologies for strengthening the main trackbed with sub-ballast protective layers using automotive and tractor equipment and railway construction machinery, as well as track complexes of foreign production, with the proposed technology and the utilization of high-efficiency domestic track machinery. Analysis of productivity indicators and the selection of the optimal option. **Results:** The necessity of prioritizing domestic technologies and track machinery for conducting major track repairs is indicated as the most effective means of increasing the load-bearing capacity of the track superstructure. Current requirements for technological processes and track machinery to ensure the sustainable operation of railway tracks under growing freight traffic intensity are examined. Technical specifications of the new track machine for ballast excavation, compaction, and the creation of sub-ballast protective layers are presented. Details regarding the design features of the track machine are provided. **Practical significance:** The need for implementing high-tech equipment and innovative technologies with higher productivity compared to foreign counterparts is demonstrated, along with the potential economic benefits of adopting the proposed technologies. The suggested technology will increase the lifespan of railway tracks and reduce operating costs.

Keywords: Railway track, sub-ballast protective layer, technological process, track repair, multifunctional track machinery.

References

1. SP 238.1326000.2015. *Zheleznodorozhnyy put'* [SP 238.1326000.2015. Railway track]. Moscow: Standartinform Publ., 2015, 71 p. (In Russian)
2. Yakovleva T. G., Karpushchenko N. I., Klinov S. I. et al. *Zheleznodorozhnyy put'* [Railway way]. Moscow: Transport Publ., 2010, 405 p. (In Russian)
3. *Transportnaya strategiya Rossiyskoy Federatsii do 2030 goda s prognozom na period do 2035 goda, utverzhennaya rasporyazheniem Pravitel'stva RF ot 27 noyabrya 2021 g. № 3363-r* [Transport strategy of the Russian Federation until 2030 with a forecast for the period until 2035, approved by the order of the Government of the Russian Federation of November 27, 2021 № 3363-r]. (In Russian)
4. Kozlov A. V. Sooruzhenie zashchitnogo sloya zemlyanogo polotna iz shchebenochno-peschanoy smesi na opytном uchastke eksperimental'nogo kol'tsa VNIIZhTa na st. Shcherbinka Moskovskoy zheleznoy dorogi [Construction of a protective layer of subgrade from crushed stone-sand mixture at the experimental site of the VNIIZhT experimental ring at st. Shcherbinka of the Moscow

Railway]. *Nauchnye trudy OAO TsNIIS* [Scientific works of JSC TsNIIS]. Moscow: OAO TsNIIS Publ., 2005, Iss. 228, pp. 44–56. (In Russian)

5. Blazhko L. S., Chuyan S. N., Zakharov V. B. Analiz sposobov povysheniya nesushchey sposobnosti gruntov osnovnoy ploshchadki zemlyanogo polotna [Analysis of ways to increase the bearing capacity of soils of the main subgrade area]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University]. 2016, Iss. 3(48), pp. 328–336. (In Russian)

6. Shmelev V. A. *Sovremennyye tekhnologii i materialy, primenyaemye dlya remonta i usileniya zemlyanogo polotna. Materialy mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, posvyashchennoy 100-letiyu so dnya rozhdeniya professora G. M. Shakhunyantsa. Sovremennyye problemy proektirovaniya, stroitel'stva i ekspluatatsii zheleznodorozhnogo puti i sooruzheniy. Povyshenie kachestva podgotovki spetsialistov i urovnya nauchnykh issledovaniy. 19–20 oktyabrya 2004 g.* [Modern technologies and materials used to repair and strengthen the subgrade. Proceedings of the international scientific and technical conference dedicated to the 100th anniversary of the birth of Professor G. M. Shakhunyants. Modern problems of design, construction and operation of the railway track and structures. Improving the quality of training of specialists and the level of scientific research. October 19–20, 2004]. M.: MIIT, OAO “RZhD” Publ., 2004. (In Russian)

7. Blazhko L. S., Shtykov V. I., Kantsiber Yu. A. Zashchita ot kol'matirovaniya geotekstil'nykh materialov, primenyaemykh v ballastnoy prizme v kachestve razdelitel'nogo sloya [Protection from clogging of geotextile materials used in a ballast prism as a separating layer]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University]. 2014, Iss. 4(41), pp. 22–26. (In Russian)

8. Ulanov I. S. Otsenka osadki zemlyanogo polotna na uchastkakh slabykh osnovaniy [Evaluation of subgrade settlement in areas of weak foundations]. *Mir transporta* [World of Transport]. 2017, Iss. 4, pp. 102–108. (In Russian)

9. *Tekhnicheskie trebovaniya k konstruksii podballastnogo zashchitnogo sloya s ispol'zovaniem produktov ot vyrezki starogo ballasta shchebneochistitel'nymi kompleksami (dlya opytnogo primeneniya), RUT (MIIT), utverzhdennyye OAO “RZhD” № TsDI-375 ot 22.02.2022* [Technical requirements for the design of the under-ballast protective layer using products from cutting old ballast by crushed stone cleaning complexes (for experimental use), RUT (MIIT), approved by Russian Railways № TsDI-375 dated 22.02.2022]. 5 p. (In Russian)

10. *Instruktsiya po obespecheniyu bezopasnosti dvizheniya poezdov pri proizvodstve putevykh rabot № 2540/r ot 14.12.2016* [Instruction for ensuring the safety of train traffic in the production of track works № 2540/r dated 12/14/2016]. 209 p. (In Russian)

11. *Sposob formirovaniya podballastnogo zashchitnogo sloya i kompleks mashin dlya ego osushchestvleniya* [The method of forming a sub-ballast protective layer and a set of machines for its implementation]. Patent RF, no. 277616, 2022. (In Russian)

Received: March 23, 2023

Accepted: April 07, 2023

Author's information:

Sergey V. AKULININ — Technical Director; 3953@svmail.ru

Vladimir B. VOROBYOV — PhD in Engineering, Chairman of the Board of Directors;
puteetz@yandex.ru

Vitaly A. ULYANOV — Engineer; 0208@svmail.ru

УДК 629.4.014

Применение машинного обучения для анализа технических характеристик и параметров эксплуатируемого подвижного состава на высокоскоростных железнодорожных магистралях

А. Н. Сычугов

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

Для цитирования: Сычугов А. Н. Применение машинного обучения для анализа технических характеристик и параметров эксплуатируемого подвижного состава на высокоскоростных железнодорожных магистралях // Бюллетень результатов научных исследований. — 2023. — Вып. 2. — С. 171–180. DOI: 10.20295/2223-9987-2023-2-171-180

Аннотация

Цель: Машинное обучение — это одна из самых популярных технологий в настоящее время, которая находит применение в различных отраслях. Одной из таких отраслей является железнодорожный транспорт, где машинное обучение может существенно улучшить процессы управления локомотивами и электропоездами. Статья посвящена исследованию возможности применения машинного обучения для анализа технических характеристик и параметров подвижного состава на примере электропоездов, эксплуатирующихся на высокоскоростных железнодорожных магистралях. В статье будут рассмотрены механизмы машинного обучения для анализа данных, а также предложены практические рекомендации по использованию машинного обучения для анализа данных на железнодорожном транспорте. **Методы:** Метод k-средних (k-means) — один из наиболее популярных алгоритмов машинного обучения для кластеризации, который позволяет разбить набор данных на k схожих групп или кластеров. Алгоритм основан на поиске центроидов (средних значений) каждого кластера и присвоении объектов к тому кластеру, который имеет наиболее близкий центроид. В зависимости от выбора начальных значений центроидов и параметров алгоритма, разбиение данных на кластеры может быть разным. Алгоритм k-средних является относительно простым в реализации и эффективным алгоритмом кластеризации, который может быть использован в качестве первоначальной оценки для более сложных алгоритмов кластеризации; метод линейной регрессии — это статистический алгоритм, используемый для определения связи между двумя непрерывными переменными. Алгоритм использует линейную функцию, которая описывает связь между зависимой переменной и одной или несколькими независимыми переменными. **Результаты:** Алгоритм обработки и первичного анализа характеристик и параметров высокоскоростного подвижного состава, результаты кластеризации параметров, методика прогнозирования технических характеристик перспективного высокоскоростного подвижного состава. **Практическая значимость:** Показаны методы применения машинного обучения для анализа технических характеристик и параметров эксплуатируемого подвижного состава на высокоскоростных железнодорожных магистралях. Методы позволят обосновать и спрогнозировать необходимые характеристики при разработке технических требований для высокоскоростного транспорта в России. С помощью применения машинного обучения можно повысить точность расчета технико-экономических моделей высокоскоростных магистралей, а в дальнейшем сократить затраты на эксплуатацию подвижного состава.

Ключевые слова: Машинное обучение, подвижной состав, прогнозирование технических характеристик транспорта, анализ данных, высокоскоростной транспорт.

Машинное обучение — это одна из самых популярных технологий в настоящее время, которая находит применение в различных отраслях. Одной из таких отраслей является железнодорожный транспорт, где машинное обучение может существенно улучшить процессы управления локомотивами, электровозами и электропоездами.

Одно из основных применений машинного обучения в железнодорожном транспорте — это оптимизация процессов технического обслуживания и ремонта оборудования. С помощью алгоритмов машинного обучения можно предсказывать возможные отказы и сбои в работе оборудования, а также оптимизировать процессы его технического обслуживания. Инженеры General Electric используют машинное обучение для анализа данных, получаемых от локомотивов, что позволяет предсказывать возможные отказы оборудования [1]. Еще одно применение машинного обучения на железнодорожном транспорте — это управление движением поездов. С помощью алгоритмов машинного обучения можно оптимизировать график движения поездов, учитывая множество факторов, таких как погода, количество поездов, проведение работ на пути и т. д. Это позволяет сократить время в пути и повысить эффективность работы железнодорожного транспорта. Компания Deutsche Bahn использует машинное обучение для оптимизации графика движения поездов [2]. Кроме того, машинное обучение может быть использовано для анализа данных о состоянии инфраструктуры железнодорожного транспорта, такой как состояние рельсов, мостов и тоннелей. Это позволяет оперативно выявлять возможные проблемы и предотвращать аварии. BNSF Railway использует машинное обучение для анализа данных о состоянии своей инфраструктуры [3]. Это далеко не все примеры применения технологий machine learning и artificial intelligence на железнодорожном транспорте. Машинное обучение имеет большой потенциал для применения на железнодорожном транспорте. Рассмотрим пример применения базовых алгоритмов машинного обучения для анализа характеристик и параметров высокоскоростного подвижного состава.

С целью определения технических характеристик перспективного высокоскоростного подвижного состава выполним анализ параметров эксплуатируемого подвижного состава на высокоскоростных железнодорожных магистралях Европы и Азии. В качестве исходной базы данных используем данные Международного союза железных дорог [4].

Максимальная скорость на маршрутах ВСМ сегодня колеблется между 240–350 км/ч на большинстве основных линий и 200–250 км/ч на модернизированных линиях. Лидером по этому показателю являются поезда серий CRH в Китае, скорость которых может достигать 350 км/ч. Максимальная скорость для новых построенных магистралей должна составлять не менее 300–360 км/ч, с возможностью движения до 400 км/ч. Максимальная скорость должна определяться по коммерческим факторам (время в пути между городами), оценке стоимости

проекта (чрезвычайно высокая скорость может оказаться экономически невыгодной) и стать причиной больших технических сложностей.

В настоящее время можно классифицировать ВСПС на рынке по трем типам:

– оптимальная высокая скорость (более 300 км/ч): работает в основном на выделенных высокоскоростных линиях.

– высокая скорость (240–300 км/ч): самый распространенный тип высокоскоростного поезда, работающего в мире сегодня, и работает в основном на выделенной линии;

– высокая скорость для обычных линий (200–250 км/ч): работает как на выделенной высокоскоростной линии, так и на модернизированной традиционной линии [5].

Необходимость в перспективном высокоскоростном подвижном составе была обусловлена новыми технологиями, развитием систем электрического привода с преобразователями энергии, выполненными на IGBT, которые улучшили энергоэффективность и снизили эксплуатационные расходы. Самый распространенный в настоящее время тип — двигатели переменного тока.

В последние годы активно развиваются технологии по применению синхронных двигателей с постоянными магнитами, которые имеют свои преимущества и недостатки с точки зрения веса, эффективности и управляемости. Линейные двигатели могут стать перспективой в качестве силовой установки, но не будут широко использоваться в основном из соображений стоимости и совместимости с существующей инфраструктурой.

Рекуперативное торможение необходимо для снижения потребления энергии и может даже использоваться вместо механических тормозов для остановки поезда, чтобы уменьшить расходы на техническое обслуживание, однако механические тормоза все равно будут необходимы в качестве резервной системы в случае чрезвычайной ситуации.

Использование технологий для получения оптимального распределения силы тяги и тормозных усилий в поезде может быть необходимо для улучшения сцепления колесо-рельс. Сила сцепления, конечно, почти пропорциональна нагрузке на ось — показателю, который необходимо уменьшать с ростом скорости, для уменьшения динамического воздействия на путь.

При разработке технических требований для высокоскоростного транспорта компания (оператор) опирается на действующие собственные или зарубежные требования. Однако на стадии обоснования инвестиций в проект достаточными и необходимыми данными являются:

- тяговые характеристики;
- максимальная эксплуатационная скорость;
- пассажироместимость;
- исполнение (сосредоточенная или распределенная тяга);
- род тока;

- нагрузка на ось;
- длина поезда.

На основании этого ряда параметров выполняется оценка достижимости целевых параметров проекта, таких как: время в пути, выполнение графика и заданного объема пассажирских перевозок. На этапе обоснования инвестиций или подготовки технических требований машинное обучение можно применить для прогнозирования указанных выше технических характеристик на основании имеющихся данных о подвижном составе. В нашем случае данные представлены в виде pdf-файла, который содержит таблицу с перечислением всех серий ВСПС, которые находились или находятся в эксплуатации, а также операторов подвижного состава и технических характеристик электропоездов.

Работу с данными продолжим с помощью блокнотов Colab [6]. Установим и подключим необходимые библиотеки, предварительно разместив наш файл с данными в облачном пространстве Google:

```
#https://github.com/astanin/python-tabulate
pip install tabula-py
import tabula
#https://pandas.pydata.org/
import pandas as pd
from google.colab import drive
drive.mount('/content/gdrive')
```

Проанализируем результат преобразования данных. Для этого с помощью метода `head()` напечатаем первые 5 строк таблицы. Результат выполнения кода представлен на рис. 1.

```
pages = 'all'
df = tabula.read_pdf('/content/gdrive/MyDrive/high_speed.pdf', pages=pages)
result_df = pd.concat(df)
result_df.head()
```

order	Country\r/Region	Photograph	Owner or Operator	Suppliers	Class	Trainset Formula\rM: Motor Car,\rT: Trailer Car,\rL: Locomotive,\rMB: Motor Bogie,\rTB: Trailer Bogie	Features\rC: Concentrated,\rA: Articulated,\rT: Tilting,\rD: Double Decker	
0	1.0	Austria	NaN	ÖBB	Siemens	"Railjet"\rSiemens Taurus\r(OBB 1216) +\rSieme...	1L6T	C
1	2.0	Austria	NaN	WestBahn	Stadler	4010	2M4T	NaN
2	3.0	France	NaN	SNCF	Alstom	TGV PSE	2L8T	C, A
3	4.0	France	NaN	La Poste	Alstom	TGV Postal	NaN	C, A
4	5.0	France	NaN	SNCF	Alstom	TGV Atlantique	2L10T	C, A

5 rows x 9 columns

Рис. 1. Результат первичной обработки информации

В результате предварительной обработки был получен dataframe. Информацию о названии столбцов и типах данных в этих столбцах получим с помощью следующих команд:

```
result_df.info () #Этот метод выводит информацию о DataFrame, включая тип и столбцы индекса, ненулевые значения и использование памяти.
```

```
result_df.columns.values.tolist () #Этот метод выводит информацию список имен столбцов dataframe.
```

Данные представлены следующими типами: float64, object. Часть данных в строках имеет тип данных NaN (Not a Value). Для последующей обработки данных выполним предварительную обработку данных, для этого сначала удалим столбцы, которые не содержат данных (например, столбец ['Photograph']), и для дальнейшего удобства работы с данными переименуем столбцы.

Выполним кластеризацию полученного массива данных. Для этого воспользуемся одним из наиболее широко применяемых алгоритмов машинного обучения — кластеризация K-средних. Программа написана с помощью библиотеки scikit-learn, где реализована улучшенная версия алгоритма k-means++ [7]. Алгоритм k-means++ выбирает начальные центроиды кластера, используя выборку на основе эмпирического распределения вероятностей вклада точек в общую инерцию. Этот метод ускоряет сходимость. Листинг представлен ниже:

```
#https://matplotlib.org/  
import matplotlib.pyplot as plt  
#https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.cluster.KMeans.html  
from sklearn.cluster import KMeans  
# https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.decomposition.PCA.html  
from sklearn.decomposition import PCA  
kmeans = KMeans(n_clusters=3, random_state=2023).fit(data)  
labels = kmeans.labels_  
data['cluster'] = labels
```

Визуализируем полученный результат (рис. 2) кластеризации и проанализируем полученные результаты.

На рис. 2 получены три кластера. Отметим, что кластеризация с другим числом кластеров не дала хорошего результата. Как отмечалось ранее, весь высокоскоростной подвижной состав условно классифицирован на три класса в зависимости от скорости. В результате машинного обучения получен очень близкий результат:

– подвижной состав со скоростью эксплуатации до 250 км/ч и удельной мощностью от 7 кВт/т до 15 кВт/т;

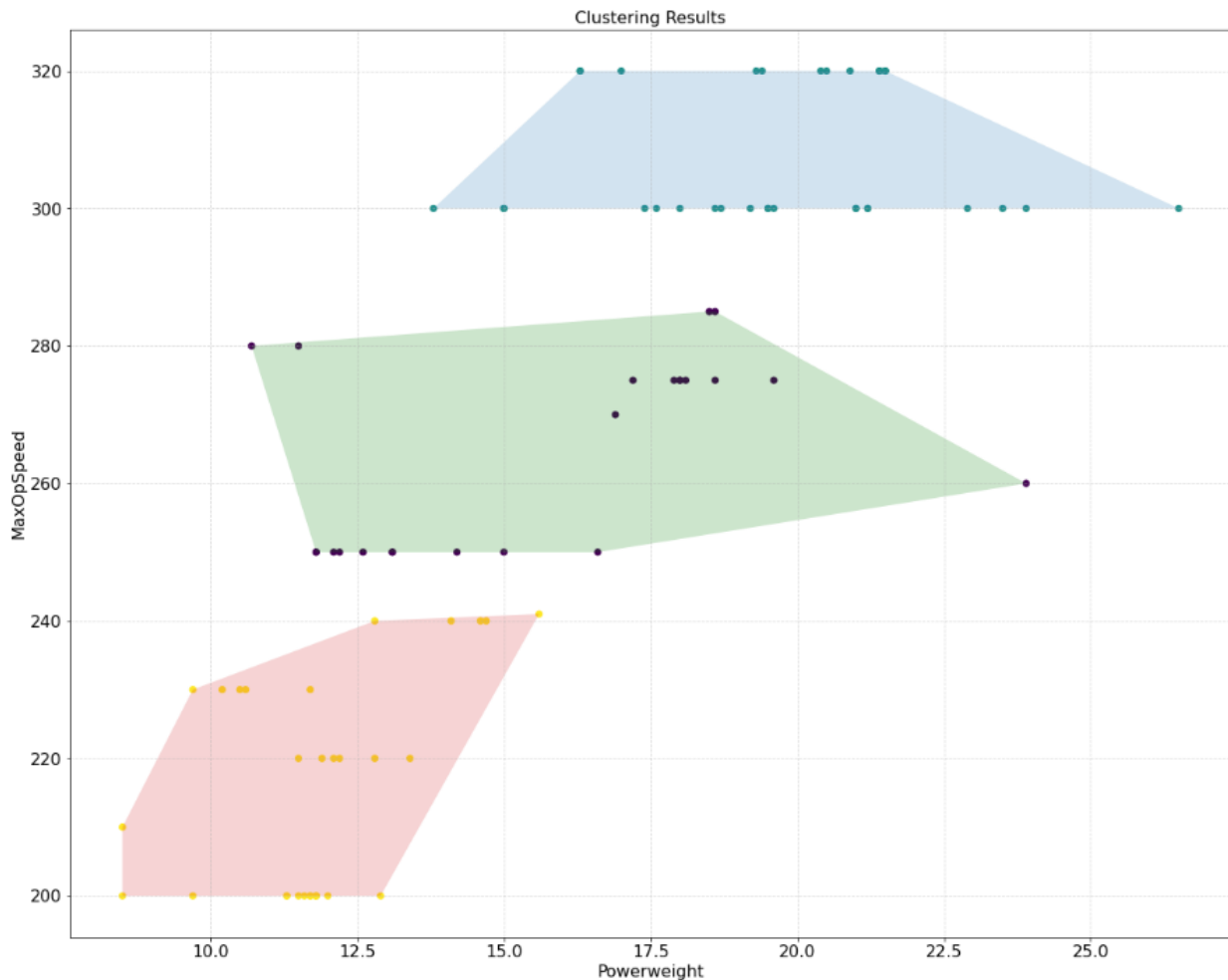


Рис. 2. Результат кластеризации данных

– подвижной состав со скоростью эксплуатации от 250 до 300 км/ч и удельной мощностью от 11 до 20 кВт/т;

– подвижной состав со скоростью свыше 300 км/ч и удельной мощностью от 15 до 25 кВт/т.

Например, мощность электропоезда «Сапсан» составляет 8 МВт, масса поезда версии В1 — 656 тонн, значит, показатель удельной мощности составляет 12,2 кВт/т. Поезд отнесен ко второму кластеру (область зеленого цвета на рис. 2), поскольку эксплуатируется со скоростью 250 км/ч. Согласно полученным результатам, увеличить скорость эксплуатации до 300 км/ч невозможно без увеличения тяговой мощности электрооборудования.

Аналогичным образом можно выполнить кластеризацию по другим признакам. Полученный результат позволяет судить о зависимости необходимой удельной и абсолютной мощности электропоезда от планируемой скорости для перспективных ВСМ. Уточнить показатель удельной мощности можно с помощью применения машинного обучения с учителем. Наиболее простым примером является модель линейной регрессии. Для изучаемого датафрейма входными данными

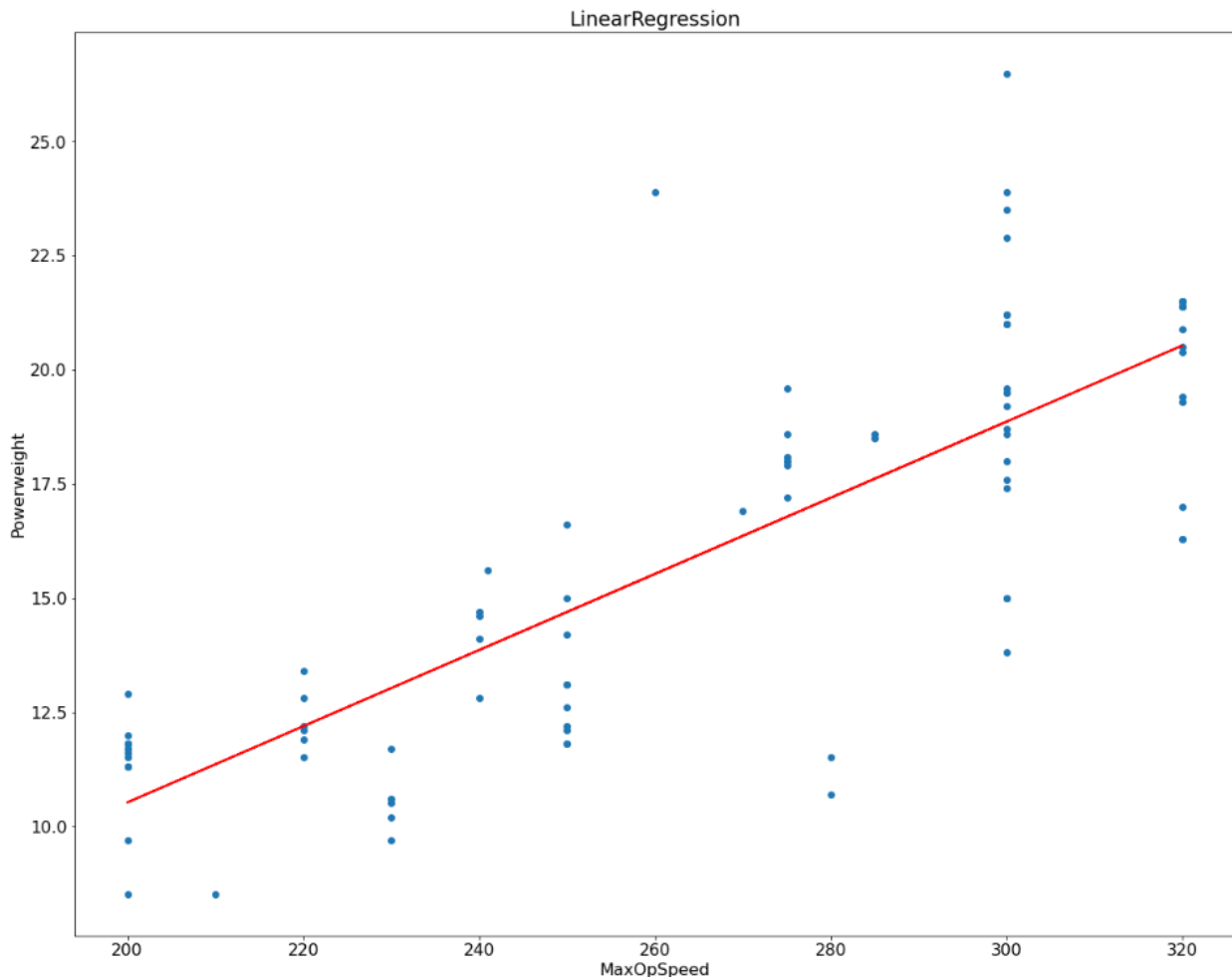


Рис. 3. Результат построения линейной регрессии

объявим скорость эксплуатации, а откликом является удельная мощность. Решение такой задачи позволяет «предсказать» значение удельной мощности, зная скорость эксплуатации. Точность модели оценим стандартной R^2 статистики [8]. Программная реализация представлена ниже:

```
#https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.linear\_model.LinearRegression.html
```

```
from sklearn.linear_model import LinearRegression
model = LinearRegression()
X = np.array(result_df['Powerweight']).reshape((-1, 1))
y = result_df['MaxOpSpeed']
model = LinearRegression().fit(X, y)
```

Результат обучения представлен на рис. 3.

Значение метрики линейной регрессии $R^2 = 0,66$ означает, что 66 % дисперсии зависимой переменной являются объяснимым влиянием независимых

переменных, включенных в модель. Таким образом, это может быть интерпретировано как довольно сильная связь между переменными, но также указывает на наличие других факторов, которые не были включены в модель и влияют на зависимую переменную. К таким факторам следует отнести систему энергоснабжения линии ВСМ (постоянный/переменный ток), регион эксплуатации (равнинный/горный) и другие факторы.

В рамках выполненных исследований использовался очень небольшой массив открытых данных с ограниченным набором параметров. Тем не менее даже на таком небольшом объеме удалось выполнить кластеризацию технических характеристик, построить модель линейной регрессии. Располагая большими объемами данных об эксплуатационных и технических характеристиках подвижного состава, можно исключить многие человеческие ошибки, принимать взвешенные решения, основанные на данных и опыте компьютерных моделей. Такое применение машинного обучения позволяет снизить риски и оптимизировать работу железнодорожного транспорта.

Уже в ближайшей перспективе машинное обучение может быть применено для решения важнейших задач российских железных дорог. Выделим задачи, наиболее актуальные на сегодняшний день:

1. Повышение безопасности движения

Системы машинного обучения могут анализировать данные инфраструктуры, включая препятствия, нарушения целостности железнодорожного полотна и другие факторы, которые могут привести к сходу подвижного состава, и заблаговременно предупредить машиниста или автоматически остановить поезд.

2. Энергетический менеджмент/управление графиком движения поездов

Системы машинного обучения могут анализировать данные о поездах, включая их скорость, время и местоположение, а также другие факторы. На основе этих данных компьютер может создать оптимальный график движения поездов, что не только повышает эффективность перевозок, но и снижает затраты на топливо.

3. Организация ремонта по фактическому состоянию

Важной задачей является прогнозирование вероятности отказов локомотивов. Применение машинного обучения позволяет собрать и проанализировать огромное количество данных, включая данные об отказах, технические характеристики, история (журнал) о выполненных ремонтах и обслуживании, эксплуатационные данные и т. д. Анализ этих данных позволяет создать модель, способную определять по событию, какая деталь или узел может выйти из строя.

Библиографический список

1. Machine Learning // General Electric. — URL: <https://www.ge.com/research/technology-domains/artificial-intelligence/machine-learning> (дата обращения: 21.03/2023).

2. Artificial intelligence at DB // Deutsche Bahn. — URL: https://www.deutschebahn.com/en/artificial_intelligence-6935068 (дата обращения: 21.03.2023).
3. Artificial Intelligence // BNSF Railway URL: <https://www.bnsf.com/news-media/railtalk/innovation/artificial-intelligence.html> (дата обращения: 21.03/2023).
4. High-speed Data // INTERNATIONAL UNION OF RAILWAYS (UIC). — URL: <https://uic.org/passenger/highspeed/article/high-speed-data-and-atlas> (дата обращения: 21.03.2023).
5. Highspeed // INTERNATIONAL UNION OF RAILWAYS (UIC). — URL: <https://uic.org/passenger/highspeed/> (дата обращения: 21.03/2023).
6. Colab // Colab. — URL: <https://colab.research.google.com/> (дата обращения: 21.03/2023).
7. Sklearn.cluster.KMeans // Scikit-learn. — URL: <https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.cluster.KMeans.html> (дата обращения: 21.03.2023).
8. Sklearn.linear_model.LinearRegression // Scikit-learn URL: https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.linear_model.LinearRegression.html (дата обращения: 21.03.2023).

Дата поступления: 06.05.2023

Решение о публикации: 25.05.2023

Контактная информация:

СЫЧУГОВ Антон Николаевич — аспирант; sychugov@pgups.ru

Application of Machine Learning to Analyze the Technical Characteristics and Parameters of the Rolling Stock in Operation on High-Speed Railway Lines

A. N. Sychugov

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

For citation: Sychugov A. N. Application of Machine Learning to Analyze the Technical Characteristics and Parameters of the Rolling Stock in Operation on High-Speed Railway Lines. *Bulletin of scientific research results*, 2023, iss. 2, pp. 171–180. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2023-2-171-180

Summary

Purpose: Machine learning is one of the most popular technologies at the present time, which finds application in various industries. One such industry is rail transport, where machine learning can significantly improve the management of locomotives and electric trains. The article is devoted to the study of the possibility of using machine learning to analyze the technical characteristics and parameters of the rolling stock using electric trains operating on high-speed railway lines as an example. The article discusses machine learning mechanisms for data analysis, as well as offers practical recommendations for using machine learning for data analysis on railway transport. **Methods:** The k-means method is one of the most popular machine learning algorithms for clustering, which allows to split a dataset into k similar groups or clusters. The algorithm is based on finding the centroids (mean values) of each cluster and assigning objects to the cluster that has

the closest centroid. Depending on the choice of the initial values of the centroids and the parameters of the algorithm, the partitioning of data into clusters can be different. In addition, k-means is a relatively easy-to-implement and efficient clustering algorithm that can be used as an initial estimate for more complex clustering algorithms; The linear regression method is a statistical algorithm used to determine the relationship between two continuous variables. The algorithm uses a linear function that describes the relationship between the dependent variable and one or more independent variables. **Results:** Algorithm for processing and primary analysis of the characteristics and parameters of high-speed rolling stock, the results of parameter clustering, a technique for predicting the technical characteristics of prospective high-speed rolling stock. **Practical significance:** The methods of application of machine learning for the analysis of technical characteristics and parameters of the operated rolling stock on high-speed railway lines are shown. The methods will allow to substantiate and predict the necessary characteristics when developing technical requirements for high-speed transport in Russia. Using machine learning, it is possible to improve the accuracy of calculating the technical and economic models of high-speed highways, and further reduce the cost of operating rolling stock.

Keywords: Machine learning, rolling stock, predicting the technical characteristics of transport, data analysis, high-speed transport.

References

1. Machine Learning. General Electric. Available at: <https://www.ge.com/research/technology-domains/artificial-intelligence/machine-learning> (accessed: March 21, 2023).
2. Artificial intelligence at DB. Deutsche Bahn. Available at: https://www.deutschebahn.com/en/artificial_intelligence-6935068 (accessed: March 21, 2023).
3. Artificial Intelligence. BNSF Railway. Available at: <https://www.bnsf.com/news-media/railtalk/innovation/artificial-intelligence.html> (accessed: March 21, 2023).
4. High-speed Data. INTERNATIONAL UNION OF RAILWAYS (UIC). Available at: <https://uic.org/passenger/highspeed/article/high-speed-data-and-atlas> (accessed: March 21, 2023).
5. Highspeed. INTERNATIONAL UNION OF RAILWAYS (UIC). Available at: <https://uic.org/passenger/highspeed/> (accessed: March 21, 2023).
6. Colab. Colab. Available at: <https://colab.research.google.com/> (accessed: March 21, 2023).
7. Sklearn.cluster.KMeans. Scikit-learn. Available at: <https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.cluster.KMeans.html> (accessed: March 21, 2023).
8. Sklearn.linear_model.LinearRegression. Scikit-learn URL: https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.linear_model.LinearRegression.html (accessed: March 21, 2023).

Received: May 06, 2023

Accepted: May 25, 2023

Author's information:

Anton N. SYCHUGOV — Postgraduate Student; sychugov@pgups.ru

УДК 629.4.053: 629.424.14(045)

Система автоматического управления скоростью маневрового тепловоза в режиме горочной работы

С. Н. Журавлев¹, О. Е. Пудовиков²

¹АО «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава» (АО «ВНИКТИ»), Российская Федерация, 140402, Коломна, ул. Октябрьской революции, 410

²Российский университет транспорта РУТ (МИИТ), Российская Федерация, 127994, Москва, ул. Образцова, 9

Для цитирования: Журавлев С. Н., Пудовиков О. Е. Система автоматического управления скоростью маневрового тепловоза в режиме горочной работы // Бюллетень результатов научных исследований. — 2023. — Вып. 2. — С. 181–194. DOI: 10.20295/2223-9987-2023-2-181-194

Аннотация

Цель: Показана актуальность разработки систем автоматического регулирования скорости маневровых тепловозов в режиме горочной работы. Приведено математическое описание электропередачи маневрового тепловоза типа ТЭМ7А как исполнительного элемента системы автоматического управления и поезда как объекта управления. Синтезирована функциональная схема системы управления, разработан принцип ее работы для удовлетворения основных требований, предъявляемых к маневровым тепловозам при работе на сортировочной горке. Синтезирован ПИ-регулятор скорости, параметры которого обеспечивают минимум интегральной ошибки скорости второго порядка. **Методы:** Оптимальные значения регулятора найдены с помощью метода Монте-Карло. **Результаты:** Приведены результаты имитационного моделирования. **Практическая значимость:** Установлено, что разработанная система управления обеспечивает плавное формирование переходных процессов и поддерживает заданное значение скорости в режимах надвига и роспуска состава в диапазоне скоростей до 15 км/ч, что способствует увеличению пропускной способности сортировочных горок нового поколения, оборудованных системами управления сортировочным процессом.

Ключевые слова: Скорость, маневровый тепловоз, система управления, электропередача, оптимизация, интегральная ошибка, моделирование.

Введение

Маневровая работа тепловозов на станциях, оборудованных горками, сопряжена с низкой энергоэффективностью электропередачи в целом и силовой установки в частности, что связано с частыми сменами позиции контроллера машиниста и значительным временем работы в переходных режимах, причем конкретные характеристики и условия горочной работы имеют случайную природу и зависят от целого ряда факторов — уклоны горочных путей и переломы профиля, масса поступающих на переработку поездов, максимальная скорость движения при надвиге и роспуске и др. [1–3]. В настоящее время в большинстве случаев управление маневровым тепловозом при осуществлении горочной работы происходит в ручном режиме — качество формируемого переходного процесса, продолжительность работы на различных позициях контроллера машиниста, а следовательно,

и эффективность всего тепловоза определяются профессиональными качествами локомотивной бригады или машиниста. Следует отметить, что вопросы поддержания требуемых скоростей надвига и роспуска состава важны не только с точки зрения обеспечения высокой экономичности преобразования энергии в тепловозе, но и с точки зрения технологии расформирования состава, пропускной способности сопряженных железнодорожных путей и т. д.

Анализ научных работ в области автоматизации подвижного состава [4–7] и опыт эксплуатации электроподвижного состава показывают, что для решения задачи поддержания требуемых скоростей тепловоза целесообразно применение систем автоматического управления скоростью маневрового тепловоза. Основными трудностями при их разработке для тепловозов, предназначенных для работы на сортировочной горке, являются низкая скорость движения состава (не более 10–15 км/ч) и высокая точность ее поддержания.

Первый отечественный успешный опыт разработки автоматического регулятора скорости движения маневрового тепловоза принадлежит АО «ВНИКТИ», специалистами которого разработан алгоритм автоматического регулирования скорости и его интеграции в систему адаптивного комбинированного (по возмущению и отклонению регулируемой величины) управления силовой установкой тепловоза ТЭМ7А [8, 9]. Экспериментальные результаты его применения, полученные в парке приема сортировочной станции, показали, что он реализует возложенные на него задачи регулирования скорости в диапазоне 1,8–21,6 км/ч с точностью 0,18 км/ч. Особенностью разработанного регулятора является поисковый характер его работы, что приводит к вынужденным колебаниям переменных в системе управления и скорости движения, снижению плавности хода.

В данной работе авторами решена задача разработки и исследования системы автоматического управления скоростью маневрового тепловоза для горочной работы, обеспечивающей плавное формирование переходных процессов.

Математическая модель электропередачи маневрового тепловоза как исполнительного элемента

Исполнительным элементом системы автоматического управления скоростью является электропередача маневрового тепловоза, упрощенная функциональная схема которой представлена на рис. 1.

Математическое описание дизеля как объекта теории автоматического управления осуществляется на основе второго закона Ньютона [10]:

$$\frac{d\omega_{\text{д}}}{dt} = \frac{M_{\text{и}} - M_{\text{м}} - M_{\text{н}}}{J}, \quad (1)$$

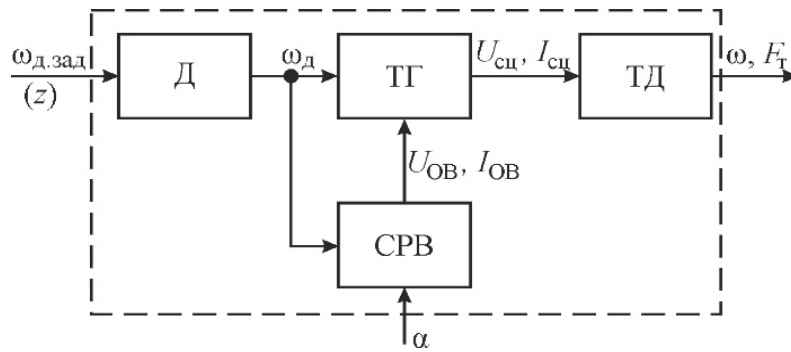


Рис. 1. Функциональная схема электропередачи маневрового тепловоза: Д — дизель; ТГ — тяговый генератор; ТД — тяговый двигатель; СРВ — система регулирования возбуждения ТГ; $\omega_{д.зад}$, $\omega_{д}$ — заданная частота вращения вала Д и фактическая частота вращения вала Д; z — выход штока силового сервомотора регулятора частоты вращения; $U_{сц}$, $I_{сц}$ — напряжение и ток обмотки якоря ТГ; $U_{ОВ}$, $I_{ОВ}$ — напряжение и ток обмотки возбуждения ТГ; α — угол открытия тиристорov управляемого выпрямителя; ω — частота вращения вала ТД; F_T — сила тяги

где $M_{и}$ — индикаторный момент, вычисляемый по формуле:

$$\frac{dM_{и}}{dt} = \left(\frac{5}{\omega_{д}Z / 100} + 1 \right) \cdot \left(k_{и} \frac{Z}{2} - M_{и} \right); \tag{2}$$

$M_{м}$ — момент механических потерь:

$$M_{м} = k_{м} \omega_{д}^2; \tag{3}$$

$M_{н}$ — момент нагрузки:

$$M_{н} = \frac{U_{ТГ} I_{ТГ}}{\omega_{д}}, \tag{4}$$

здесь $k_{м}$, $k_{и}$ — эмпирические коэффициенты;

$U_{ТГ}$ — напряжение тягового генератора;

$I_{ТГ}$ — ток тягового генератора.

Система регулирования напряжения СРВ ТГ состоит из синхронного возбудителя, представляющего собой обращенную однофазную синхронную машину в режиме генератора, в обмотку ротора которой включен управляемый выпрямитель. Уравнение СРВ записывается на основании законов Фарадея, Кирхгофа и Ома:

$$U_{ОВ} = C_{в} \omega_{в} I_{вв} - I_{св} R_{св} - L_{св} \frac{dI_{св}}{dt}, \tag{5}$$

где $C_{в}$ — электромагнитная постоянная возбудителя;

$\omega_{в}$ — частота вращения ротора возбудителя;

I_{CB} — ток обмотки ротора возбуждателя;

I_{BB} — ток обмотки возбуждения возбуждателя, который определяется по формуле:

$$L_{BB} \frac{dI_{BB}}{dt} = U_{BB} - I_{BB} R_{BB}, \quad (6)$$

где $R_{CB}, L_{CB}, L_{BB}, R_{BB}$ — параметры эквивалентной схемы замещения синхронного возбуждателя.

Ток обмотки возбуждения тягового синхронного генератора находим из выражения:

$$L_{OB} \frac{dI_{OB}}{dt} = \alpha k_{\alpha} U_{OB} - I_{OB} R_{OB}, \quad (7)$$

где k_{α} — коэффициент преобразования управляемого преобразователя.

Выпрямленное напряжение обмотки якоря генератора аппроксимировано на основании реальной характеристики генератора, применяемого на тепловозе ТЭМ7А:

$$U_{cц} = \omega_{д} \begin{pmatrix} 0,209 I_{OB} - 1,021 \cdot 10^{-7} I_{cц} - 1,709 \cdot 10^{-3} I_{OB}^2 + 7,341 \cdot 10^{-7} I_{cц} I_{OB} - \\ -2,794 \cdot 10^{-7} I_{cц}^2 - 2,359 \cdot 10^{-8} I_{cц} I_{OB}^2 - 3,692 \cdot 10^{-11} I_{OB} I_{cц}^2 + \\ +4,969 \cdot 10^{-6} I_{OB}^3 + 2,888 \cdot 10^{-8} I_{cц}^3 \end{pmatrix}. \quad (8)$$

Ток силовой цепи ТД, состоящей из последовательно включенных обмоток якоря и возбуждения, определяется из уравнения:

$$(L_{OB,ТД} + L_{OЯ,ТД}) \frac{dI_{cц}}{dt} = U_{cц} - C_{ТД} \omega I_{cц} - I_{cц} (R_{OB,ТД} + R_{OЯ,ТД}), \quad (9)$$

Момент ТД:

$$M_{ТД} = 0,0029 I_{cц}^2 + 4,465 I_{cц} - 19,519. \quad (10)$$

Частота вращения вала ТД:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{M_{ТД} - M_{с}}{J_{\Sigma}}. \quad (11)$$

Сила тяги:

$$F_T = \frac{2M_{ТД}\mu_{ред}\eta_{ред}}{D_{кп}}, \quad (12)$$

где $\mu_{ред}$, $\eta_{ред}$ — передаточное отношение и КПД тягового редуктора;
 $D_{кп}$ — диаметр колес колесной пары.

Математическая модель поезда как объекта управления

Математическая модель поезда должна отражать преобразование силы тяги F_k или торможения B в перемещение поезда со скоростью V . Основное уравнение движения:

$$(P + Q) \frac{dv}{dt} = F_k - (W_0 + W_d) - B, \quad (13)$$

где P — масса тепловоза;

Q — масса вагонов;

W_0 — сила основного сопротивления движению;

W_d — сила дополнительного сопротивления движению.

Основное сопротивление движению определяется как сумма сопротивления движению вагонов (масса вагонов пересчитывается на каждом шаге для случаев отцепки) и тепловоза:

$$W_0 = \frac{w' \cdot P + w'' \cdot Q}{P + Q}, \quad (14)$$

где w' , w'' — основные удельные сопротивления движению тепловоза и вагонов, определяемые в функции скорости поезда и числа осей вагонов.

Сила дополнительного сопротивления движению учитывает сопротивление поезда от уклона с учетом положения на продольном профиле центра масс каждого вагона и тепловоза и сопротивление поезда от кривой с учетом положения центра тепловоза или вагона в кривой.

Синтез структурной схемы системы управления

В результате анализа условий горочной работы основными требованиями, предъявляемыми к системе автоматического управления скоростью маневрового тепловоза, являются:

- осуществление процессов разгона/торможения с заданными показателями качества переходного процесса;
 - поддержание заданной скорости движения при изменении профиля пути, массы поезда и т. д.;
 - обеспечение ограничений в тяговом электроприводе и дизель-генераторной установке;
 - реализация взаимодействия между электрическим и электропневматическими тормозами;
 - возможность интеграции системы автоматического управления скоростью в топологию существующих информационных систем тепловоза, автоматических локомотивных сигнализаций, систем автоматизации сортировочных станций и т. д.
- Выполнение первых двух требований достигается выбранной структурой системы управления и структурой регулятора скорости и значениями его параметров, в то время как выполнение остальных требований обеспечивается структурой и алгоритмом работы только системы управления. Функциональная схема системы автоматического управления скоростью, разработанная с учетом приведенных требований, показана на рис. 2.

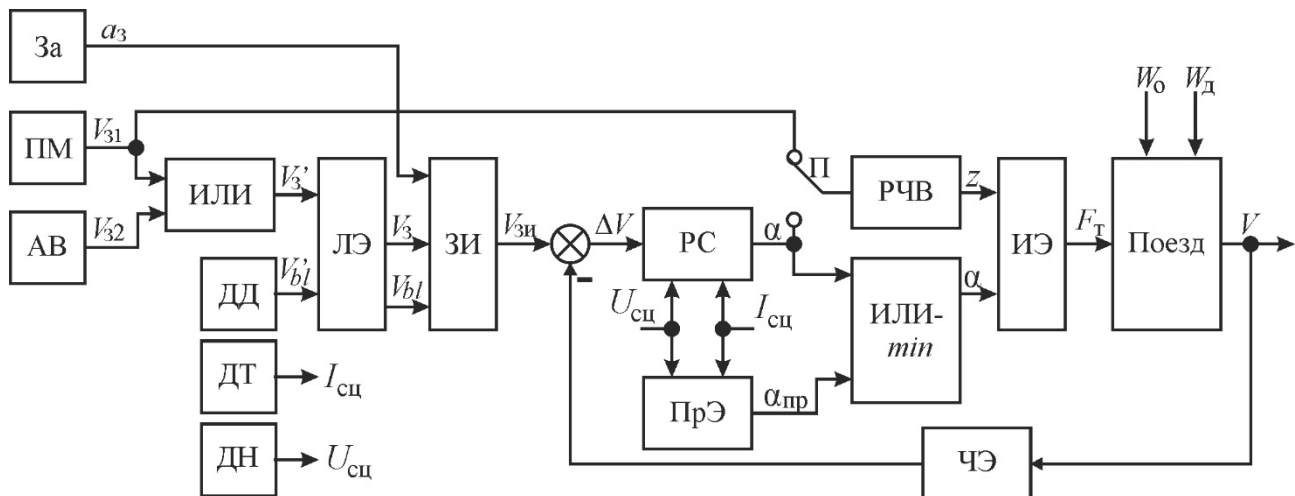


Рис. 2. Функциональная схема системы автоматического управления скоростью: ПМ — пульт машиниста; $N_{км}$ — позиция контроллера машиниста; АВ — система автоведения; V_{31} , V_{32} , $V_{3и}$, V_3' , V_3 — заданные значения скорости; V — фактическая скорость поезда; ИЛИ, ИЛИ-min — логические элементы; ЛЭ — логический элемент; V_{bl}' — сигнал от датчика давления в тормозных цилиндрах; ЗИ — задатчик интенсивности; Z_a — задатчик ускорения пульта машиниста; ΔV — рассогласование между значениями $V_{3и}$ и V ; ЧЭ — чувствительный элемент (датчик скорости); ИЭ — исполнительный элемент; ПрЭ — программный элемент; ДН, ДТ — датчики напряжения и тока; РС — регулятор скорости поезда; ДД — дискретный датчик блокировки режима тяги

Система содержит пульт машиниста, с помощью которого возможно дискретное задание скорости V_{31} , соответствующее позиции контроллера машиниста $N_{км}$; вышестоящую систему автоведения АВ, которая вводит заданное значение скорости V_{32} ; элемент ИЛИ, на выходе которого величина скорости V_3' соответствует одному из двух значений V_{31} или V_{32} . Логический элемент ЛЭ необходим для блокирования режимов тяги и торможения в случае включения пневматического тормоза в обход системы автоматического управления скоростью, что сигнализируется сигналом V_{bl}' . В систему введен задатчик интенсивности ЗИ, обеспечивающий плавное изменение задания на скорость $V_{зи}$ до уровня V_3 с ускорением a_3 , задаваемым задатчиком ускорения Z_a пульта машиниста, и выполнение ограничения по плавности хода в переходных режимах движения поезда. Элемент сравнения вычисляет рассогласование ΔV между значением скорости $V_{зи}$ и фактической скоростью поезда V , измеренной чувствительным элементом ЧЭ (датчиком скорости). Для регулирования частоты вращения вала дизеля применен регулятор РЧВ, выход которого z является управляющим входом для дизеля Д (рис. 1), входящего в состав исполнительного элемента ИЭ. Переключатель П осуществляет подключение РЧВ к пульта машиниста или выходу регулятора скорости в зависимости от используемого режима работы тепловоза. Регулятор скорости поезда РС рассчитывает второй управляющий сигнал, подаваемый на ИЭ, — угол открытия тиристоров α управляемого выпрямителя системы регулирования возбуждения ТГ (рис. 1). Программный элемент ПрЭ учитывает информацию об ограничениях тягового генератора по напряжению $U_{сц}$ и току $I_{сц}$, для чего в систему введены соответствующие датчики ДН и ДТ. Элемент ИЛИ- \min выбирает из двух сигналов α и $\alpha_{пр}$ наименьший и подает его ИЭ.

Синтез регулятора скорости и алгоритма работы системы автоматического управления скоростью

К основным показателям качества, применяемым при оценке переходного процесса на транспорте, относят ошибку в установившемся режиме, т. е. после завершения переходного процесса, колебательность переходного процесса, перерегулирование и др. Зачастую вид и параметры регулятора или алгоритма управления, обеспечивающие оптимальные значения одного из показателей качества, приводят к неудовлетворительным значениям другого (например, система управления, синтезированная в работе [8], обеспечивает требуемую ошибку в установившемся режиме, но вызывает колебательный характер переходного процесса), т. к. достижение желаемых величин различных показателей качества — задача противоречивая. Дополнительную трудность составляет нелинейность объекта управления и исполнительного элемента, из-за чего применение стандартных настроек подчиненных или модальных контуров регулирования автоматического

управления не обеспечит требуемых показателей качества и устойчивости во всем диапазоне изменения задающих и возмущающих воздействий.

Для решения возникших противоречий выберем в качестве целевой функции интегральную оценку второго порядка:

$$I_2 = \int_0^{\infty} (V(\infty) - V(t))^2 dt, \quad (15)$$

где $V(\infty)$ и $V(t)$ — это скорости тепловоза при времени $t \rightarrow \infty$ и в текущий момент времени t .

Выражение (1) запишем в дискретном виде:

$$I_2 = \sum_0^{t_{\text{пп}}} (V(t_{\text{пп}}) - V_i)^2, \quad (16)$$

где $V(t_{\text{пп}})$ — скорость тепловоза при завершении переходного процесса;

V_i — скорость тепловоза в i -й момент времени.

В качестве регулятора скорости применим пропорционально-интегральный регулятор (ПИ-регулятор), передаточная функция которого имеет вид:

$$W_{\text{pc}}(p) = k_{\text{pc}} + \frac{1}{\tau_{\text{pc}} p}, \quad (17)$$

где k_{pc} , τ_{pc} — коэффициент усиления и постоянная времени регулятора соответственно.

Варьируемыми параметрами будут являться параметры регулятора k_{pc} и τ_{pc} .

Очевидно, что варьируемые параметры регулятора необходимо менять таким образом, чтобы интегральная оценка $I_2 \rightarrow \min$.

В настоящее время существует большое количество методов оптимизации, позволяющих с высокой точностью определить точки того или иного оптимума. В данной работе для нахождения экстремума интегральной ошибки применим метод Монте-Карло, который является статистическим методом решения глобальной оптимизации. Для определения минимума интегральной оценки задаем значения параметров регулятора скорости k_{pc} и τ_{pc} случайным образом, проводим итерационные расчеты и находим величину I_2 . При достаточно большом количестве расчетов метод Монте-Карло гарантирует нахождение глобального минимума с высокой вероятностью. Для повышения качества управления целесообразно подобные расчеты провести для различных масс поездов и профилей пути, что, учитывая специфику работы на сортировочных горках, не потребует значительных затрат времени и ресурсов. Это позволит адаптировать систему управления к изменениям возмущающих воздействий в широком диапазоне.

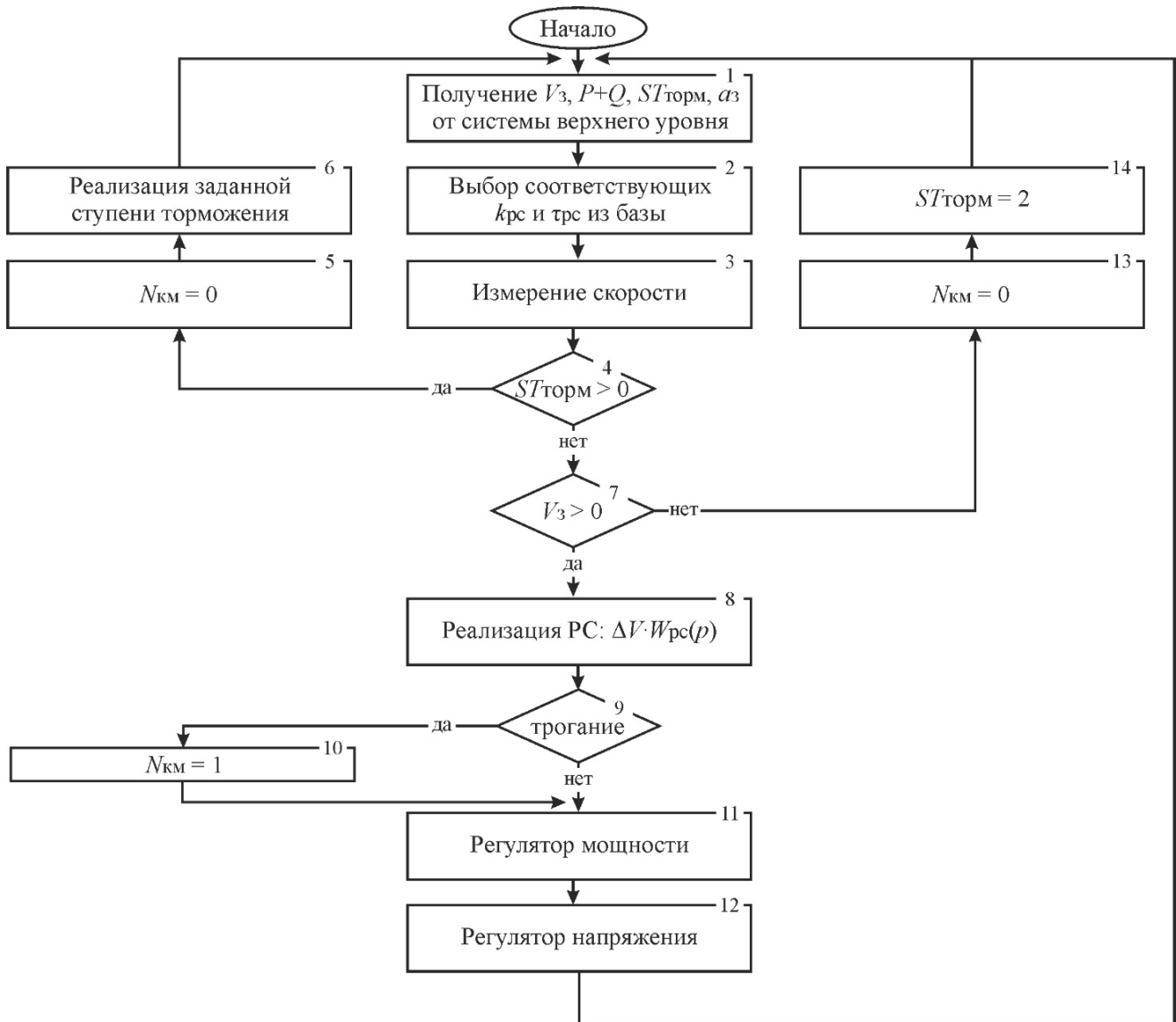


Рис. 3. Схема алгоритма управления тепловозом в режиме поддержания скорости

Алгоритм работы системы показан на рис. 3. В блоке 1 система автоматического управления скоростью получает от систем верхнего уровня заданную скорость, массу поезда, степень торможения $ST_{\text{орм}}$, а также интенсивность разгона. В блоке 2 в зависимости от массы поезда выбираются соответствующие параметры регулятора k_{pc} и τ_{pc} , определенные заранее. В блоке 3 производится измерение скорости движения локомотива. В блоке 4 анализируется заданная степень торможения от системы верхнего уровня. При заданной степени более 0 в блоках 5 и 6 осуществляется сброс тяговой позиции и реализация заданных ступеней торможения. В блоке 7 анализируется заданная скорость движения локомотива и при нулевом значении в блоке 14 осуществляется реализация

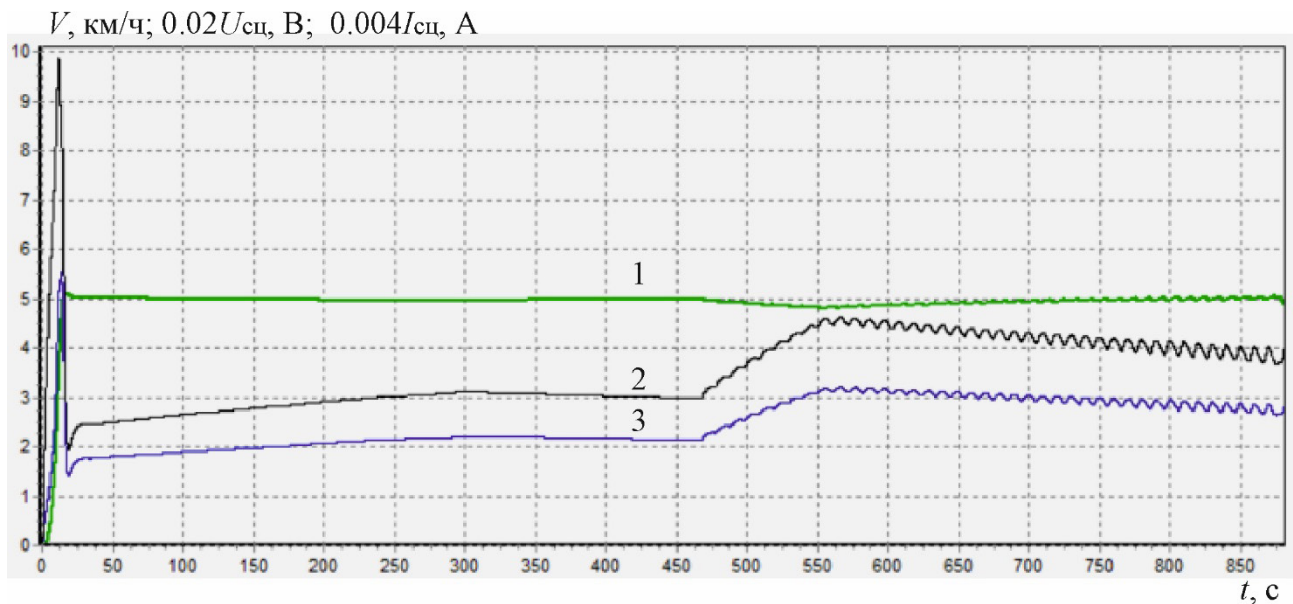
второй ступени торможения для удержания состава на месте. В блоке 8 реализован пропорционально-интегральный закон регулирования для расчета $U_{\text{зад}}$. Блок 9 необходим для перевода локомотива в режим «тяга». В блоках 11 и 12 реализуются регулятор мощности и регулятор напряжения ТГ соответственно. Регулятор мощности генератора на основании текущих значений напряжения $U_{\text{сц}}$ и тока $I_{\text{сц}}$ осуществляет функции ограничения задания при превышении угла управления тиристорами значения $\alpha_{\text{пр}}$. Регулятор напряжения является подчиненным регулятором скорости и мощности, но формально входит в его состав. На первом шаге в регулятор напряжения осуществляется ввод фактического и заданного значений напряжения тягового генератора, далее определяется величина рассогласования (между заданным и фактическим значением напряжения), по значению осуществляется регулирование напряжения через задание угла открытия тиристорov.

Результаты моделирования и их обсуждение

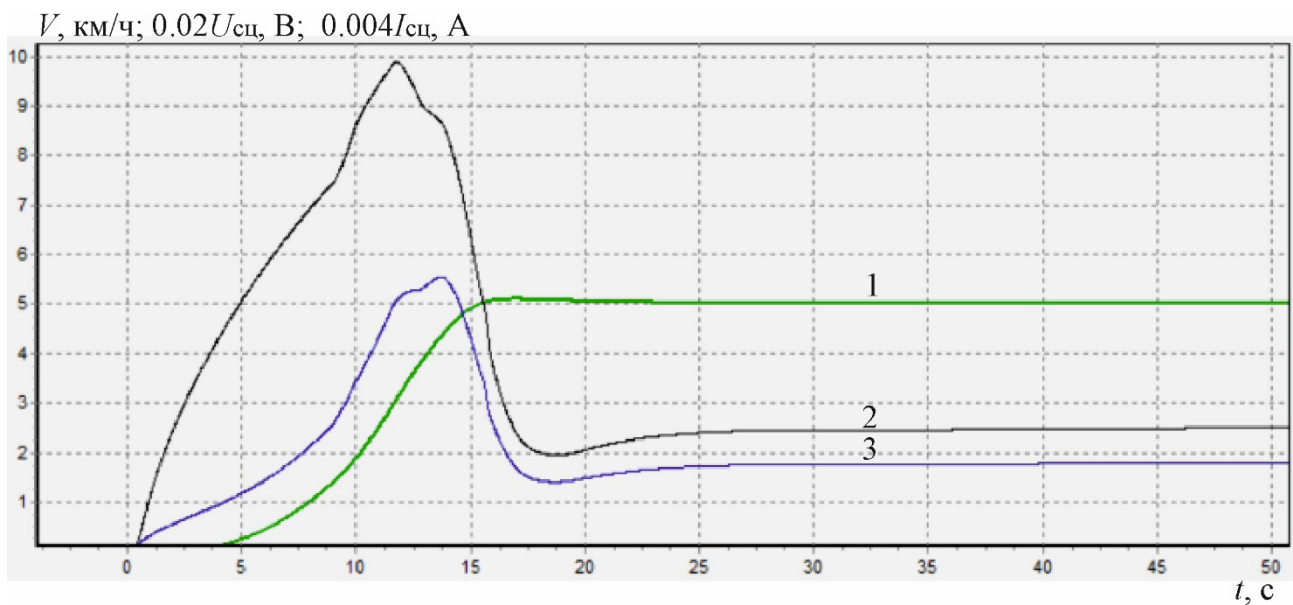
Моделирование разработанной системы было проведено для тепловоза типа ТЭМ7А. Модель электропередачи соответствует уравнениям (1) – (11), модель поезда — (12), (13); структура системы управления соответствует схеме (рис. 2), алгоритмы работы системы управления и регулятора скорости — алгоритму (рис. 3).

Было выполнено имитационное моделирование для различных вариантов профилей сортировочных путей, расстояний до горба горки (от 200 до 770 м), масс состава (от 800 до 6400 т), количества вагонов (от 20 до 80), диапазон заданий скорости принимался от 2 до 10 км/ч. В результате получены зависимости интегральной ошибки от значений параметров РС. Для примера на рис. 4, а приведены временные зависимости скорости V , тока $I_{\text{сц}}$ и напряжения $U_{\text{сц}}$ силовой цепи для поезда массой 2560 т (в составе поезда 32 вагона по 80 т), показывающие отработку синтезированной системы автоматического управления задания скорости $V_3 = 5$ км/ч при роспуске состава (процесс роспуска начинается в момент времени $t = 550$ с). Значения параметров РС $k_{\text{pc}} = 20$, $\tau_{\text{pc}} = 117,6$ с обеспечивают минимум функции $I_2 = 429,1$ в переходном процессе разгона (рис. 4, б).

Несмотря на колебания тока и напряжения, возникающие при отцепе вагонов, регулятор скорости отрабатывает эти возмущения с максимальной динамической ошибкой менее 0,15 км/ч, установившаяся же ошибка асимптотически стремится к нулю. Время регулирования в достаточно сильной степени определяется прежде всего массой состава и составляет 20–200 с. Применение задатчика интенсивности совместно с ПИ-регулятором скорости позволило сформировать плавные переходные процессы во всем диапазоне изменения задающих и возмущающих воздействий.



a



б

Рис. 4. Временные зависимости скорости V (1), тока $I_{\text{сц}}$ (2) и напряжения $U_{\text{сц}}$ (3) силовой цепи тягового электропривода тепловоза ТЭМ7А в процессе разгона и роспуска состава

Заключение

В результате проведенных исследований разработаны структура и алгоритм работы системы автоматического управления скоростью тепловоза ТЭМ7А в режиме горочной работы. Исполнительным элементом системы является электропередача тепловоза, лимитирующими параметрами — ток и напряжение тягового генератора. В качестве регулятора скорости применен ПИ-регулятор,

обеспечивающий минимум интегральной ошибки скорости второго порядка. Адаптивность регулятора к различным условиям эксплуатации по массе состава, диапазону рабочих скоростей обеспечивается выбором соответствующих значений параметров регулятора, найденных с помощью метода оптимизации Монте-Карло. В результате проведенных имитационных экспериментов установлена работоспособность разработанных решений, синтезированные система управления и регулятор скорости могут быть рекомендованы для применения на маневровых тепловозах, занятых горочной работой.

Библиографический список

1. Кузнецова И. А. Оценка технико-энергетической эффективности работы маневровых тепловозов путем моделирования рабочих процессов оборудования в режимах эксплуатации: специальность 05.22.07: «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация»: дисс. ... канд. техн. наук / И. А. Кузнецова; АО. — М.: Всероссийский научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта, 2018. — 168 с.
2. Щуров Н. И. Анализ режимов работы силовых установок маневровых тепловозов / Н. И. Щуров, Е. Г. Гурова, С. В. Макаров и др. // Современные проблемы науки и образования. — 2014. — № 3. — С. 104.
3. Шелухин В. И. Автоматизация и механизация сортировочных горок / В. И. Шелухин. — М.: Маршрут, 2005. — 240 с.
4. Тун А. З. Система автоматического управления скоростью движения электропоезда городской транспортной системы города Янгон: специальность 05.13.06: «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами»: автореф. дисс. ... канд. техн. наук / А. З. Тун. — М.: Московский государственный университет путей сообщения (МИИТ), 2016. — 24 с.
5. Пудовиков О. Е. Система автоматического регулирования движения перспективного электропоезда: специальность 05.09.03: «Электротехнические комплексы и системы, включая их управление и регулирование»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / О. Е. Пудовиков. — М.: Московский государственный университет путей сообщения (МИИТ), 2000. — 134 с.
6. Пудовиков О. Е. Система автоматического управления скоростью грузового поезда с распределенной тягой / О. Е. Пудовиков, В. Г. Сидоренко и др. // Электротехника. — 2019. — № 9. — С. 47–54.
7. Dong H. Automatic Train Control System Development and Simulation for High-Speed Railways / H. Dong, B. Ning, B. Cai et al. // IEEE circuits and systems magazine. — 2010. — Vol. 10. — Iss. 2.
8. Журавлев С. Н. Система управления силовой установкой маневрового тепловоза с алгоритмом автоматического регулирования скорости / С. Н. Журавлев // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. — 2021. — № 3–4. — С. 31–38.

9. Патент № 2616111 Российская Федерация, МПК В60L 15/20 (2006.01), В60L 11/02 (2006.01). Способ регулирования скорости движения тепловоза с электрической передачей: № 2016103650: заявл. 04.02.2016: опубл. 12.04.2017 / С. И. Ким, С. Н. Журавлев, А. А. Пронин и др.; заявитель ОАО «Российские железные дороги». — 9 с.

10. Марков В. А. Моделирование системы автоматического регулирования частоты вращения дизельного двигателя / В. А. Марков и др. // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. — 2019. — № 7. — С. 35–46.

Дата поступления: 30.04.2023

Решение о публикации: 20.05.2023

Контактная информация:

ЖУРАВЛЕВ Сергей Николаевич — заместитель главного инженера; s_zhuravlev@mail.ru

ПУДОВИКОВ Олег Евгеньевич — д-р техн. наук, доц., зав. кафедрой; olegp@mail.ru

Automatic Speed Control System of a Hump-Shunting Diesel Locomotive

S. N. Zhuravlev¹, O. E. Pudovikov²

¹Scientific-Research and Design-Technology Institute of Rolling Stock, 410, Oktyabrskoy Revolutsii str., Kolomna, 140402, Russian Federation

²Russian University of Transport RUT (MIIT), 9/9, Obraztsova str., Moscow, 127994, Russian Federation

For citation: Zhuravlev S. N., Pudovikov O. E. Automatic Speed Control System of a Hump-Shunting Diesel Locomotive. *Bulletin of scientific research results*, 2023, iss. 2, pp. 181–194. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2023-2-181-194

Summary

Purpose: The importance of developing automatic speed control systems for hump-shunting diesel locomotives is demonstrated. Using as an example a shunting diesel locomotive of Type TEM7A a mathematical description is provided of electric power transmission as a final controlling element of the automatic control system and of a train as a control object. A flow-chart of the control system is generated and the system's principle of operation is designed so as to ensure the main requirements to the hump-shunting locomotives are met. The PI speed controller is developed with parameters that provide for a maximum second-order integral accuracy of speed control. **Methods:** Controller's optimum values are found using the Monte Carlo simulation. **Results:** The results of a simulation modeling are presented. **Practical significance:** The designed control system is found to ensure a smooth transient response and to maintain a given value of speed within the range of 15 km/h when pushing over a hump or at breaking up, providing for an increased shunting capacity of new generation hump yards featuring shunting control systems.

Keywords: Speed, shunting diesel locomotive, control system, electrical power transmission, optimization, integral inaccuracy, modeling.

References

1. Kuznetsova I. A. *Otsenka tekhniko-energeticheskoy effektivnosti raboty manevrovyykh teplovozov putyom modelirovaniya rabochikh protsessov oborudovaniya v rezhimakh ekspluatatsii* [Evaluating technical and energy efficiency of shunting diesel locomotives through modeling equipment operating procedures under operating conditions]. Moscow: AO “VNIIZhT” (Rail Research Institute of JSC Russian Railways) Publ., 2018, 168 p. (In Russian)
2. Shchurov N. I., Gurova E. G., Makarov S. V. et al. Analiz rezhimov raboty silovyykh ustanovok manevrovyykh teplovozov [Analysis of operating conditions of shunting diesel locomotive power plants]. *Sovremennyye problem nauki i obrazovaniya* [Modern problems of science and education]. 2014, Iss. 3, p. 104. (In Russian)
3. Shelukhin V. I. *Avtomatizatsiya i mekhanizatsiya sortirovochnyykh gorok* [Hump yards automation and mechanization]. Moscow: Marshrut Publ., 2005. 240 p. (In Russian)
4. Tun A. Z. *Sistema avtomaticheskogo upravleniya skorostyu dvizheniya elektropoyezda gorodskoy transportnoy systemy goroda Yangon* [An automatic speed control system of an electric train of the Yangon city transport infrastructure]. Moscow: FGAOU VO RUT (MIIT) (Russian University of Transport) Publ., 2016, 24 p. (In Russian)
5. Pudovikov O. Ye. *Sistema avtomaticheskogo regulirovaniya dvizheniya perspektivnogo elektropoyezda* [An advanced electric train automatic speed control system]. Moscow: FGAOU VO RUT (MIIT) (Russian University of Transport) Publ., 2000, 134 p. (In Russian)
6. Pudovikov O. Ye., Sidorenko V. G., Sidorova N. N. et al. Sistema avtomaticheskogo upravleniya skorostyu gruzovogo poyezda s raspredelennoy tyagoy [An automatic speed control system of a distributed power freight train]. *Elektrotekhnika* [Electrical engineering]. 2019, Iss. 9, pp. 47–54. (In Russian)
7. Dong H., Ning B., Cai B. et al. Automatic Train Control System Development and Simulation for High-Speed Railways. *IEEE circuits and systems magazine*, 2010, vol. 10, Iss. 2.
8. Zhuravlev S. N. Sistema upravleniya silovoy ustanovki teplovoza s avtomaticheskim regulirovaniyem skorosti [A shunting diesel locomotive power plant control system featuring an automatic speed control algorithm]. *Avtomatizatsiya i modelirovaniye v proyektirovanii i upravlenii* [Automation and modeling in design and management]. 2021, Iss. 3–4, pp. 31–38. (In Russian)
9. Kim S. I., Zhuravlev S. N., Pronin A. A. et al. *Sposob regulirovaniya skorosti dvizheniya teplovoza s elektricheskoy peredachey* [A method for controlling the speed of a locomotive with electric transmission]. Patent RF, no. 2616111, 2016. (In Russian)
10. Markov V. A., Pozdnyakov E. F., Furman V. V. et al. Modelirovaniye sistemy avtomaticheskogo regulirovaniya chastoty vrashcheniya dizelnogo dvigatelya [Modeling automatic rotation frequency control systems of a diesel engine]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroyeniye* [BMSTU Journal of Mechanical Engineering]. 2019, Iss. 7, pp. 35–46. (In Russian)

Received: April 30, 2023

Accepted: May 20, 2023

Author's information:

Sergey N. ZHURAVLEV — Deputy Chief Engineer; s_zhyravlev@mail.ru

Oleg E. PUDOVNIKOV — Dr. Sci. in Engineering, Assistant Professor, Head of the Department; olegp@mail.ru