НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

ИЗВЕСТИЯ ПЕТЕРБУРГСКОГО УНИВЕРСИТЕТА ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ, том 18, выпуск 4, 2021

ISSN (Print) 1815-588X

ISSN (Online) 2658-6851

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

Издатель
Общество с ограниченной ответственностью «Издательский дом Т-ПРЕССА» по договору № ЭОА21990 от 01.03.2021 г.

Адрес учредителя
190031, СПб., Московский пр., 9,
тел. (812) 314-92-32

Адрес издателя
190031, СПб., наб. реки Фонтанки, 117-А,
пом. 1Н, офис 350,
e-mail: izvestia@izvestiapgups.org

Свидетельство о регистрации средства массовой информации
ПИ № ФС2-7499 от 06.04.2005 г., выдано Федеральной службой по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия, Управление по Северо-Западному федеральному округу

Журнал зарегистрирован
в Российском индексе научного цитирования (РИНЦ)

Журнал включен в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий (решение Президиума Высшей аттестационной комиссии Минобрнауки России от 29.12.2015 г., № 6/6)

Журнал публикует научные статьи в областях технические науки (05.00.00), транспорт (05.22.00)

Журнал имеет институт рецензирования

Журнал распространяется
по адресно-целевой подписке через редакцию и каталог ОАО «Роспечать» (индекс 18509)

РЕДАКЦИЯ ЖУРНАЛА

Главный редактор
А. Ю. Панычев, канд. экон. наук, доцент

Заместитель главного редактора
А. К. Канаев, д-р техн. наук, профессор

Научный редактор
А. М. Евстафьев, д-р техн. наук, профессор

Выпускающий редактор
Э. А. Горелик

Перевод на английский язык
А. Н. Крышня, У. Л. Романова

Верстка
А. А. Стуканова

МЕЖДУНАРОДНЫЙ РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Панычев Александр Юрьевич, канд. экон. наук, доцент, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия, председатель Совета

Шнайдер Экхард, профессор, Фраунгоферовский институт неразрушающего контроля, Саарбрюкен, Германия

Ситаж Марек, профессор, Силезский технический университет, Польша

Христов Христо, профессор, Технический университет, София, Болгария

РЕДКОЛЛЕГИЯ

Сапожников Валерий Владимирович, д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия, председатель редколлегии
Бадёр Михаил Петрович, д-р техн. наук, профессор, РУТ (МИИТ), Москва, Россия
Белаш Татьяна Александровна, д-р техн. наук, профессор, Санкт-Петербург, Россия
Беленцов Юрий Алексеевич, д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия
Блажко Людмила Сергеевна, д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия
Бороненко Юрий Павлович, д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия
Брынь Михаил Ярославович, д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия
Губачева Лариса Александровна, д-р техн. наук, профессор, Восточно-Украинский национальный университет им. В. Даля, Луганск, Украина
Егоров Владимир Викторович, д-р техн. наук, доцент, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия
Канаев Андрей Константинович, д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия
Ледяев Александр Петрович, д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия
Петрова Татьяна Михайловна, д-р техн. наук, профессор, Санкт-Петербург, Россия
Покровская Оксана Дмитриевна, д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия
Смирнов Владимир Николаевич, д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия
Соловьева Валентина Яковлевна, д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия
Талантова Клара Васильевна, д-р техн. наук, доцент, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия
Титова Тамила Семеновна, д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия
Фролов Юрий Степанович, д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия
Шангина Нина Николаевна, д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия
Штыков Валерий Иванович, член-корр. РАН, д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Фото на обложке из архивов библиотеки ФГБОУ ВО ПГУПС. 1910 г.

Подписано в печать с оригинал-макета 25.12.2021.
Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная. Печать МФУ.
Усл. печ. л. 21,125. Установочный тираж 300 экз.

Заказ . Цена свободная.
Отпечатано в типографии ООО «Издательство ОМ-Пресс»
190031, СПб., наб. р. Фонтанки, 117

© ФГБОУ ВО ПГУПС, 2021

SCIENTIFIC PUBLICATION

PROCEEDINGS OF PETERSBURG TRANSPORT UNIVERSITY, volume 18, issue 4, 2021

ISSN (Print) 1815-588X
ISSN (Online) 2658-6851

Founder
Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Emperor Alexander I Petersburg State Transport University"

Publisher
Limited Liability Company "T-PRESSA Publishing House", under contract N ЭОА21990 dated March 01, 2021

Founder's address
190031, St. Petersburg, Moskovskiy pr., 9, (812) 314-92-32

Publisher's address
190031, St. Petersburg, room 1H, office 350, 117-A, Fontanka River emb., e-mail: izvestia@izvestiapgups.org

Mass media registration certificate number
ПИ N ФС2-7499 dd. 06.04.2005 issued by the Federal service for the monitoring of legislation compliance in the sphere of mass communications and the preservation of cultural heritage, North West Federal district division

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

The journal is included in the List of leading peer-reviewed scientific journals and publications

The journal publishes scientific articles in the fields of Technics (05.00.00), Transport (05.22.00)

The journal has the Peer-review division

The journal is destributed by direct subscription via Editorial office and Rospechat catalogue (item 18509)

JOURNAL STAFF

Editor–in–chief
A. Yu. Panychev, PhD of Economics, Associate Professor

Deputy chief editor
A. Kanayev, D. Eng. Sci., Professor

Science editor
A. Evstafev, D. Eng. Sci., Professor

Executive editor
E. Gorelik

English translation
A. Kryshnia, U. Romanova

Layout
A. Stukanova

INTERNATIONAL EDITORIAL BOARD

Aleksander Panychev, PhD in Economics, Associate Professor, Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia, Chairman of Editorial board

Ekhard Shneider, Professor, Fraunhofer Institute for Non-Destructive Testing, Saarbrucken, Germany

Marek Sitazh, Professor, Silesian University of Technology, Poland

Khristo Khristov, Professor, Technical University of Sofia, Bulgaria

EDITORIAL TEAM

Valeriy Sapozhnikov, D. Eng. Sci., Professor, Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia, Chairman of Editorial team
Mikhail Badyer, D. Eng. Sci., Professor, Russian University of Transport, Moscow, Russia
Tatiana Belash, D. Eng. Sci., Professor, St. Petersburg, Russia
Yury Belentsov, D. Eng. Sci., Professor, Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia
Liudmila Blazhko, D. Eng. Sci., Professor, Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia
Yuriy Boronenko, D. Eng. Sci., Professor, Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia
Mikhail Bryn', D. Eng. Sci., Professor, Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia
Larisa Gubachyeva, D. Eng. Sci., Professor, Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, Luhansk, Ukraine
Vladimir Egorov, D. Eng. Sci., Associate Professor, Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia
Andrey Kanayev, D. Eng. Sci., Professor, Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia
Aleksander Ledyayev, D. Eng. Sci., Professor, Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia
Tatiana Petrova, D. Eng. Sci., Professor, St. Petersburg, Russia
Oksana Pokrovskaya, D. Eng. Sci., Professor, Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia
Vladimir Smirnov, D. Eng. Sci., Professor, Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia
Valentina Solovyova, D. Eng. Sci., Professor, Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia
Klara Talantova, D. Eng. Sci., Associate Professor, Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia
Tamila Titova, D. Eng. Sci., Professor, Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia
Yury Frolov, D. Eng. Sci., Professor, Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia
Nina Shangina, D. Eng. Sci., Professor, Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia
Valeriy Shtikov, corresponding member of the Russian Academy of Sciences, D. Eng. Sci., Professor, Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Published by Limited Liability Company "OM-Press Publishing House"
190031, St. Petersburg, Fontanka River emb., 117
Open price

© Petersburg State Transport University, 2021

СОДЕРЖАНИЕ

→ СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ – ТРАНСПОРТУ

А. А. Воробьев, Я. С. Ватулин, Д. Д. угли Каримов

Воздействие воздушного потока на аэродинамическое устройство для пантографа 453

И. Г. Киселев, Д. Н. Курилкин, М. А. Шрайбер

Тепловая модель асинхронного тягового электродвигателя тепловоза 460

А. Ф. Колос, К. И. Иванова

Упругие характеристики подрельсового основания безбалластного железнодорожного пути 469

А. Т. угли Лесов, В. О. Иващенко

Энергооптимизация режимов движения поезда на языке программы C# 480

Г. И. Никифорова

Исследование логистической цепи доставки груза в условиях выбора транспортно-экспедиторской компании 491

А. И. Чудаков, В. О. Иващенко, А. П. Зеленченко, Н. В. Лысов

Оптимизация систем управления пригородных электропоездов 499

→ ПРОБЛЕМАТИКА ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

А. Б. Гайипов

Влияние погрешностей и ошибок измерения на частоту отцепок вагонов во внеплановый ремонт на железных дорогах Республики Узбекистан 507

О. Д. Покровская, А. В. Сугоровский, И. В. Рыбакова, М. А. Марченко, М. В. Шевердова

Особенности организации работы станции и железнодорожного вокзального комплекса при пуске «Аэроэкспресса» 515

А. Г. Филиппов, С. С. Смирнов, Д. В. Язев, И. П. Александров

Определение потребных размеров движения пригородных поездов с учетом суточной и внутрисуточной неравномерностей распределения пассажиропотока 528

В. В. Широкова, Н. А. Кузьмина, Г. В. Санькова

Исследование влияния пропуска тяжеловесных поездов на пропускную и провозную способности железнодорожных участков 537

→ ОБЩЕТЕХНИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

П. В. Великоруссов, М. М. Воронина, М. М. Шевченко

К истории вопроса проверки знаний обучающихся на примере Института инженеров путей сообщения 546

А. П. Зеленченко, А. А. Богдан, М. Ш. Шадмонходжаев

Источник питания для позиции безразборной диагностики подшипников 554

Ю. В. Креселюк

Анализ проблем механических редукторов транспортных систем и их решение с помощью магнитного датчика 561

В. А. Кручек, А. А. Горбачев, Р. А. Иванов

Методика диагностирования дизельных двигателей автомобильной техники по параметрам акустического сигнала 571

О. Н. Числов, Д. С. Безусов

Принципы теории нечетких множеств в формализации инфраструктурно-технологического взаимодействия припортовой железнодорожной транспортной системы 578

Т. М. Шманёв, В. И. Ульяницкая, И. В. Ванюшин, М. С. Пухова, А. Ю. Ситников

Пути повышения эффективности капитальных вложений в инфраструктуру с целью ее адаптации для обеспечения доступной среды 591

И. А. Терёхин, А. Ю. Балакин

Оценка возможности применения альтернативных источников электрической энергии для питания собственных нужд тяговых подстанций дистанции электроснабжения на примере ЭЧЭ-20 «Броневая» 601

СОДЕРЖАНИЕ

→ HIGH TECHNOLOGIES FOR TRANSPORT

A. A. Vorob'ev, Ya. S. Vatulin, D. D. ugli Karimov

The effect of air flow on an aerodynamic device for a pantograph 453

I. G. Kiselev, D. N. Kurilkin, M. A. Shreiber

Thermal model of an asynchronous traction motor of a diesel locomotive 460

A. F. Kolos, K. I. Ivanova

Elastic characteristics of the underrail base of a ballastless railway track 469

A. T. ugli Lesov, V. O. Ivaschenko

Energy optimization of train movement modes in the language of C# program 480

G. I. Nikiforova

Investigation of the logistics chain of cargo delivery in the context of choosing a freight forwarding company 491

A. I. Chudakov, V. O. Ivashchenko, A. P. Zelenchenko, N. V. Lysov

Optimization of control systems for suburban trains 499

→ PROBLEMATIC OF TRANSPORT SYSTEM

A. B. Gayipov

Influence of inaccuracies and measurement errors on frequency of uncoupling of cars for unscheduled repairs on the railways of the Republic of Uzbekistan 507

O. D. Pokrovskaya, A. V. Sugorovsky, I. V. Rybakova, M. A. Marchenko, M. V. Sheverdova

Organisational features in the work of a railway station complex during the launch of "Aeroexpress" 515

A. G. Filippov, S. S. Smirnov, D. V. Yazev, I. P. Aleksandrov

Determination of the required amount of traffic of suburban trains, taking into account all-day and intraday irregularities in passenger traffic distribution 528

V. V. Shirokova, N. A. Kuzmina, G. V. Sankova

Study of the influence of handling heavy trains on the carriage and traffic capacity of railway sections 537

→ GENERAL TECHNICAL PROBLEMS AND SOLUTION APPROACH

P. V. Velikorussov, M. M. Voronina, M. M. Shevchenko

On the history of the question of checking students' knowledge on the example of the Institute of Railway Engineers 546

A. P. Zelenchenko, A. A. Bogdan, M. Sh. Shadmonkhodzhaev

Power supply for a CIP position for bearings 554

Yu. V. Kreselyuk

Analysis of the problems of mechanical gearboxes of transport systems and their solution using a magnetic sensor 561

V. A. Kruchek, A. A. Gorbachev, R. A. Ivanov

Methodology for diagnosing diesel engines of automotive vehicles by the parameters of the acoustic signal 571

O. N. Chislov, D. S. Bezusov

The principles of the theory of fuzzy sets in the formalization of infrastructural and technological interaction of the port railway transport system 578

T. M. Shmanyov, V. I. Ulyanitskaya, V. Vanyushin, M. S. Pukhova, A. Yu. Sitnikov

Ways of improving the efficiency of capital investments into the infrastructure in order to adapt it to ensure accessible environment 591

I. A. Terekhin, A. Yu. Balakin

Evaluation of the possibility of using alternative sources of electrical energy to power auxiliaries of traction substations of power supply divisions on the example of ECHE-20 "Bronevaya" 601

УДК 621.336.7

Воздействие воздушного потока на аэродинамическое устройство для пантографа

А. А. Воробьев, Я. С. Ватулин, Д. Д. угли Каримов

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

Для цитирования: *Воробьев А. А., Ватулин Я. С., Каримов Д. Д. угли.* Воздействие воздушного потока на аэродинамическое устройство для пантографа // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2021. – Т. 18. – Вып. 4. – С. 453–459.
DOI: 10.20295/1815-588X-2021-4-453-459

Аннотация

Цель: Оценить влияние параметров токоприемников скоростных и высокоскоростных поездов на величину аэродинамического сопротивления. Изучить воздействие воздушного потока на аэродинамическое устройство для пантографа с использованием программы SolidWorks. **Методы:** Проведено сравнение полученных значений аэродинамического воздушного сопротивления с теми, которые были определены ранее. **Результаты:** С помощью аэродинамического устройства можно уменьшить скорость воздушного потока, воздействующего на пантограф, уменьшить значения аэродинамического сопротивления и энергопотребления, продлить срок службы токоприемников. **Практическая значимость:** Предлагаемая конструкция может улучшить токосъем, что позволит снизить нагрузки на контактный провод и полоз токоприемника, понизить энергопотребление электроподвижного состава.

Ключевые слова: Токоприемник, пантограф, аэродинамическое сопротивление, лобовой воздушный поток, расчет аэродинамических сил, аэродинамическое устройство.

Государственно-акционерная компания «Узбекистон Темир Йуллари» была образована 7 ноября 1994 г. Указом Президента Республики Узбекистан № УП-982 на базе линейных подразделений, предприятий и организаций системы железнодорожного транспорта, расположенных на территории Республики Узбекистан.

Основными задачами отрасли были:

– создание единой железнодорожной транспортной сети;

– продолжение электрификации основных участков железных дорог;

– развитие инфраструктуры железнодорожного транспорта, включающее модернизацию железнодорожных путей, а также переход на оптико-волоконную систему телекоммуникаций;

– развитие собственной ремонтной базы подвижного состава;

– восстановление и обновление подвижного состава;

– поиск альтернативных транспортных коридоров, обеспечивающих выход на мировой рынок и повышение экспортного потенциала Узбекистана [1, 2].

Основанием для решения вышеперечисленных приоритетных задач являются: Государственная программа по реализации стратегии действий по пяти приоритетным направлениям развития Республики Узбекистан в 2017–2021 гг. «Год развития науки, просвещения и цифровой экономики» [3], «Меры по ускоренному реформированию предприятий с участием государства и приватизации государственных активов» [4], «Программа локализации производства товаров на внутреннем и внешнем рынке на 2020–2021 гг. » [5], «Меры по реализации инвестиционной программы Республики Узбекистан на 2021–2023 годы» [6].

В 2016 г. были завершены строительство электрифицированной железной дороги «Ангрен – Пап», проходящей через горный перевал Камчик, протяженностью 123,2 км, в том числе 19,2 км тоннеля, в 2017 г. – электрификация участка Карши – Термез, протяженностью 325 км, а также строительство нового железнодорожного участка Бухара – Мискин, протяженностью 357,3 км, приобретены 2 электропоезда «AFROSIYOB».

В 2018 г. была введена в эксплуатацию новая железнодорожная линия Ургенч – Хива, протяженностью 33,8 км, а также в Хиве было окончено строительство нового железнодорожного вокзала. Также завершилась электрификация нового участка Карши – Китаб, протяженность которого составляет 124 км. В 2019 г. закончены строительно-монтажные работы по проекту электрификации участка Пап – Наманган – Андижан и II этапа по проекту строительства железнодорожной линии Бухара – Мискин.

В настоящее время четыре высокоскоростных комфортабельных электропоезда «AFROSIYOB» успешно курсируют по маршрутам Ташкент – Самарканд – Бухара и Ташкент – Самарканд – Карши, которые позволили расширить туристические перевозки по железной дороге, создавая достойную конкуренцию с авиа- и автотранспортными перевозками. Электропоезд был разработан по самым передовым технологиям в Испании специалистами компании «Talgo».

Завершение строительства новых железнодорожных участков Бухара – Мискин и Ургенч – Хива дает возможность организовать высокоскоростное движение по направлениям Ташкент – Самарканд – Бухара – Хива, что позволит осуществить удобное и быстрое передвижение пассажиров и туристов по историческим местам Республики Узбекистан. Таким образом, с каждым готом растет пассажирооборот.

Приведенные данные (см. таблицу) показывают, что на железных дорогах Республики Узбекистан ежегодно увеличивается объем пассажирских перевозок. Решение этой проблемы напрямую зависит от скоростей движения. Например, железнодорожный состав на участке Ташкент – Ургенч, в 2016 г. проходивший данное расстояние за 16 ч 40 мин, в настоящее время затрачивает на преодоление того же пути 13 ч 35 мин. Расстояние между Ташкентом и Ургенчем, равное 1100 км, включает в себя участок протяженностью 330 км между городами Бухара и Мискин. Скорость ветра на этом участке будет равна 36–39 м/с. Повышение скоростей движения вместе с ветряной нагрузкой сказывается на аэродинамическом сопротивлении токоприемника и в конечном итоге на качестве токосъема.

Изменение показателей пассажирских перевозок

Показатели	2019 г.	2020 г.	2021 г.	2022 г.	2023 г.
Пассажирский оборот железнодорожного транспорта, млн пасс.-км	4385,2	1794,9	3243,2	3341	3441
Темп роста, %	101,3	40,9	180,7	103,0	103,0
Железнодорожные пассажирские перевозки, млн человек	23,37	6,28	12,33	12,82	13,21
Темп роста, %	103,3	26,9	196,3	104,0	103,0

На рис. 1 приведены данные по аэродинамическому сопротивлению токоприемника для скоростных (7–10 %) и высокоскоростных (12–15 %) поездов соответственно.

Аэродинамические свойства токоприемников принято оценивать по его аэродинамическим характеристикам [7–9], которые представляются в виде зависимостей аэродинамических сил лобового сопротивления и подъемной силы от скорости встречного воздушного потока воздуха [10]. Эти характеристики можно получить при продувке токоприемника в аэродинамической трубе, натурном эксперименте, на участке электрифицированной железной дороги, а также путем расчета аэродинамических сил по классическим формулам.

Аэродинамическое лобовое сопротивление определяется следующим образом:

$$P_{\text{втх}} = C_x S_x \rho \frac{v_{\text{в}}^2}{2},$$

где C_x – коэффициент аэродинамического лобового сопротивления токоприемника; S_x – площадь миделевого сечения токоприемника, м^2; ρ – массовая плотность воздуха, кг/м^3; $V_{\text{в}}$ – скорость воздушного потока, м/с.

Из этой формулы видно, что аэродинамическое сопротивление токоприемника зависит от квадрата скорости воздушного потока. С ростом скорости лобового воздушного потока также будет увеличиваться аэродинамическое сопротивление, что может привести к излому токоприемника (рис. 2).

Для уменьшения аэродинамического сопротивления и энергопотребления электроподвижного состава предлагается конструкция, пред-

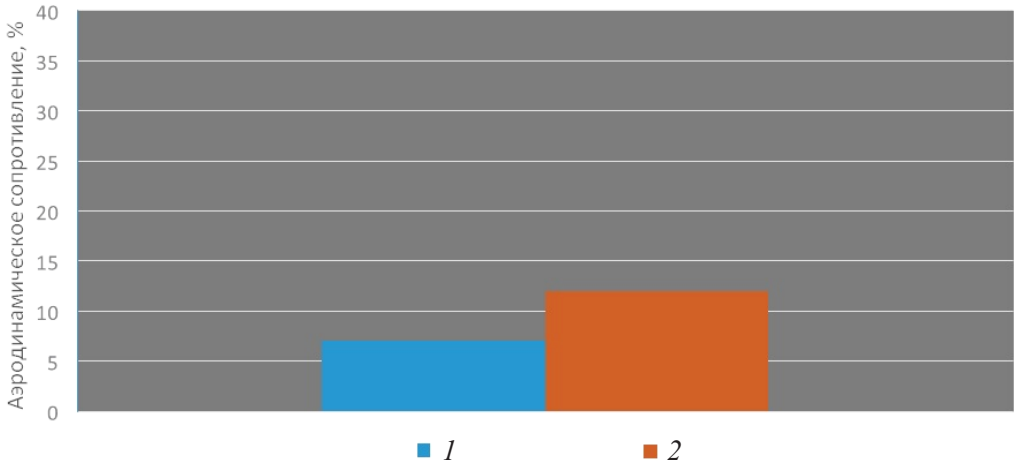


Рис. 1. Влияние параметров токоприемников скоростных (*1*) и высокоскоростных (*2*) поездов на величину аэродинамического сопротивления

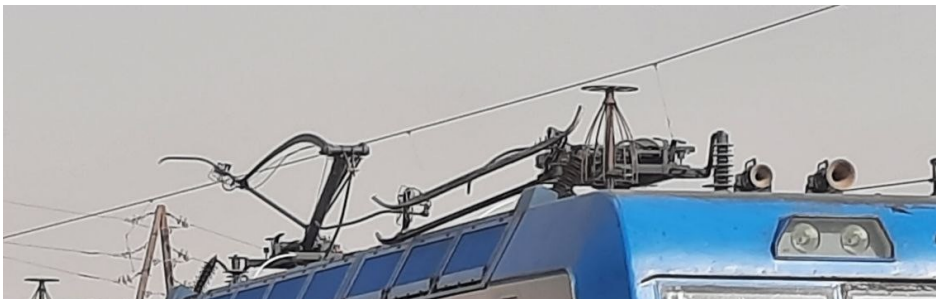


Рис. 2. Токоприемник электровоза UzEL после аварии

ставленная на рис. 3. Моделирование производилось в программном комплексе SolidWorks, расчеты аэродинамических сил – по приведенной формуле (см. с. 455).

На рис. 4 представлено воздействие воздушного потока на аэродинамическое устройство для пантографа

Для получения необходимых характеристик использовался аэродинамический экран, и от него был подан воздушный поток со скоростью до 35,406 м/с (дано красным цветом). После столкновения с аэродинамическим экраном происходило разделение воздушного потока, что способствовало уменьшению скорости потока воздуха, воздействующего на рабочую поверхность токоприемника (показано синим цветом), до 7,587 м/с.

Таким образом, созданная модель аэродинамического устройства в программном комплексе SolidWorks будет способствовать снижению аэродинамического сопротивления, предотвращению излома узлов пантографа, поддержанию стабильного контакта токоприемника и контактной линии, повышению энергоэффектив-

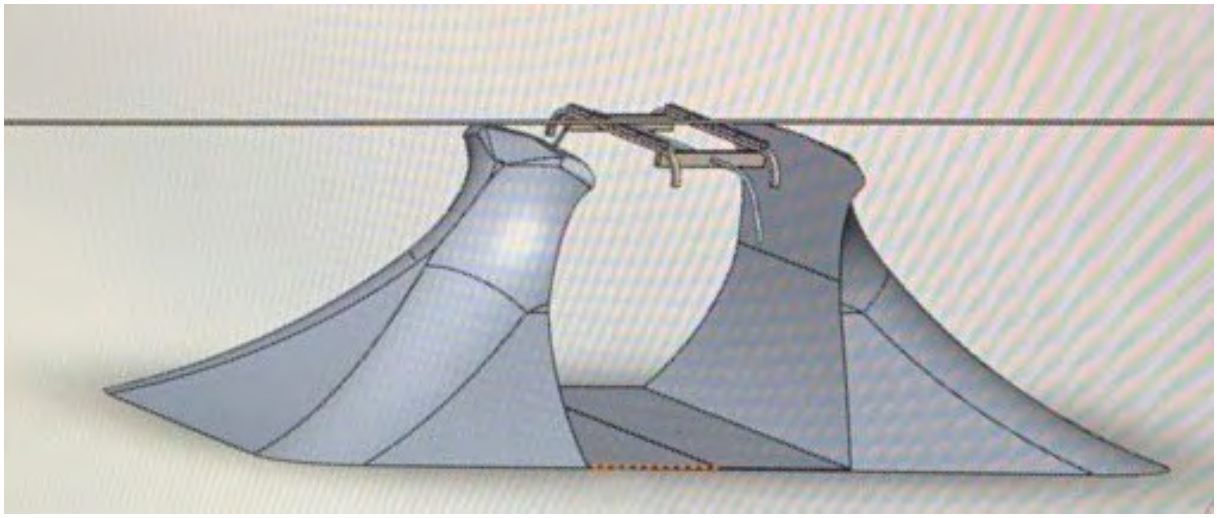


Рис. 3. Аэродинамическое устройство для токоприемника

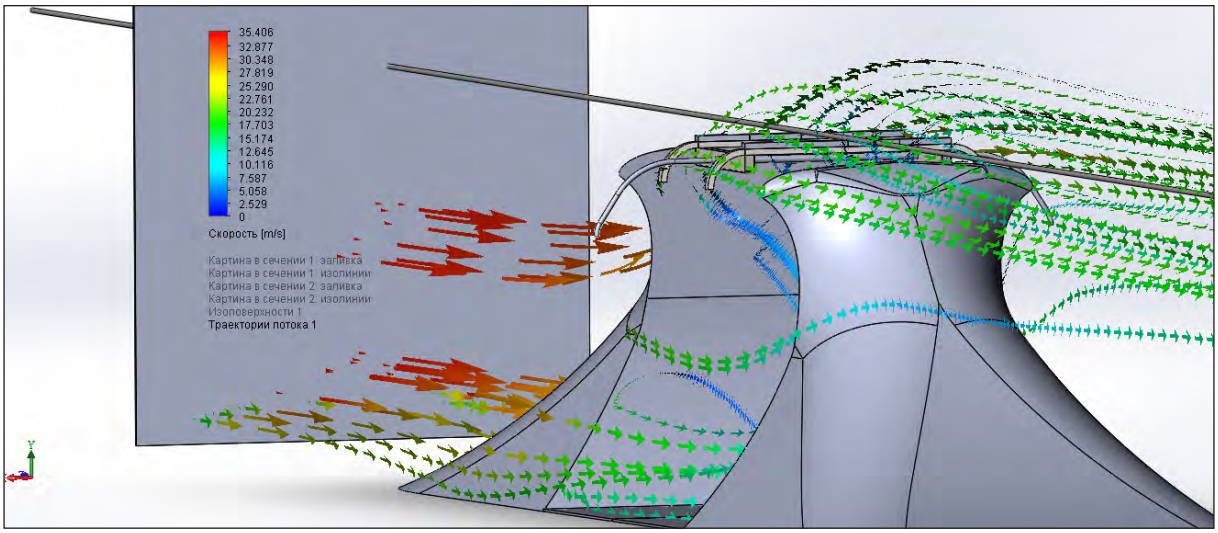


Рис. 4. Воздействие воздушного потока на аэродинамическое устройство для пантографа

ности конструкции путем уменьшения усилия на подъем токоприемника.

Из приведенной классической формулы (см. с. 455) и рис. 4 видно, что с помощью аэродинамического устройства можно в несколько раз снизить скорость воздушного потока, воздействующего на пантограф, а это способствует улучшению энергопотребления и в конечном итоге позволит продлить срок службы токоприемников.

Библиографический список

1. Бизнес-план АО «УТЙ» на 2019 г. – Ташкент: АО «УТЙ», 2019. – 5 с.

2. Бизнес-план АО «УТЙ» на 2020–2023 гг. – Ташкент: АО «УТЙ», 2020. – 6 с.

3. Государственная программа по реализации стратегии действий по пяти приоритетным направлениям развития Республики Узбекистан в 2017–2021 гг. – Указ Президента Республики Узбекистан УП-5953 от 2 марта 2020 г. – URL: http://lex.uz/ru/docs/4751561 (дата обращения: 04.10.2021).

4. Меры по ускоренному реформированию предприятий с участием государства и приватизации государственных активов. – Указ Президента Республики Узбекистан от 27 октября 2020 г. – URL: http://lex.uz/ru/docs/5068824 (дата обращения: 04.10.2021).

5. Программа локализации производства товаров на внутреннем и внешнем рынке на 2020–2021 гг. – Постановление кабинета министров Республики Узбекистан № 136 от 10 марта 2020 г. – URL: http://lex.uz/ru/docs/4759735 (дата обращения: 04.10.2021).

6. Меры по реализации инвестиционной программы Республики Узбекистан на 2021–2023 гг. – Постановление Президента Республики Узбекистан от 28 декабря 2020 г. – URL: http://lex.uz/ru/docs/5189874 (дата обращения: 04.10.2021).

7. Маслов Г. П. Влияние аэродинамической подъемной силы токоприемника на качество токосъема / Г. П. Маслов, Е. Н. Панзо // Совершенствование схем устройств электроснабжения транспорта и проектирование их конструкций: сб. науч. трудов. – Екатеринбург: Урал. гос. ун-т путей сообщения, 2006. – Вып. 48 (131). – С. 168–174.

8. Маслов Г. П. О выборе рациональной аэродинамической характеристики токоприемника / Г. П. Маслов, О. И. Поздняков, Е. Н. Панзо // Исследования и разработка ресурсосберегающих технологий на железнодорожном транспорте: Межвуз. сб. науч. трудов с междунар. участием. – Самара: Самарск. ин-т инженеров ж-д. транспорта, 2002. – Вып. 23. – С. 70–71.

9. Воробьев А. А.Эволюция конструкции подвижного состава легкорельсового транспорта в Санкт-Петербурге / А. А. Воробьев, А. М. Будюкин, В. Г. Кондратенко, Д. Д. угли Каримов // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2020. – Т. 17. – Вып. 1. – С. 62–71.

10. Маслов Г. П. О методах определения аэродинамических показателей полоза токоприемника / Г. П. Маслов, О. И. Поздняков, А. В. Широкова, А. П. Стариков // Повышение надежности работы устройств электроснабжения железных дорог: сб. науч. трудов. – Екатеринбург: Урал. гос. акад. путей сообщения, 2000. – Вып. 13 (95). – С. 53–57.

Дата поступления: 13.10.2021
Решение о публикации: 24.11.2021

Контактная информация:
ВОРОБЬЕВ Александр Алфеевич – д-р техн. наук, доц.;79219751198@yandex.ru
ВАТУЛИН Ян Семенович – канд. техн. наук, доц.; yan-roos@yandex.ru
КАРИМОВ Дастонбек Давронбой угли – аспирант; dostonkarimov325@gmail.com

The effect of air flow on an aerodynamic device for a pantograph

A. A. Vorob'ev, Ya. S. Vatulin, D. D. ugli Karimov

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

For citation: Vorob'ev A. A., Vatulin Ya. S., Karimov D. D. ugli. The effect of air flow on an aerodynamic device for a pantograph. *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2021, vol. 18, iss. 4, pp. 453–459. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2021-4-453-459

Summary

Objective: To evaluate the influence of the parameters of current collectors of high-speed and very high-speed trains on the value of aerodynamic resistance. To study the effect of airflow on a pantograph aerodynamic device using SolidWorks software. **Methods:** A comparison of the obtained values of aerodynamic air resistance with those that were produced earlier is carried out. **Results:** By means of aerodynamic device, it is possible to reduce the speed of the air flow effecting the pantograph, to reduce the values of aerodynamic resistance and energy consumption, to extend the service life of current collectors**. Practical importance:** The proposed design can improve the current collection, which will reduce the load on the overhead line and the pantograph slide, and reduce the energy consumption of electric rolling stock.

Keywords: Current collector, pantograph, aerodynamic resistance, frontal air flow, calculation of aerodynamic forces, aerodynamic device.

References

1. *Biznes-plan AO "UTY" na 2019 g.* [*Business plan of JSC "UTY" for 2019*]. Tashkent, AO "UTY" [JSC "Uzbekistan Railways"] Publ., 2019, 5 p. (In Russian)

2. *Biznes-plan AO "UTY" na 2020–2023 gg.* [*Business plan of JSC "UTY" for 2020–2023*]. Tashkent, AO "UTY" [JSC "Uzbekistan Railways"] Publ., 2020, 6 p. (In Russian)

3. *Gosudarstvennaya programma po realizatsii strategii deystviy po pyati prioritetnym napravleniyam razvitiya Respubliki Uzbekistan v 2017–2021 gg.* Ukaz Prezidenta Respubliki Uzbekistan UP-5953 ot 02 marta 2020 g. [*State program for the implementation of the strategy of actions in five priority areas of development of the Republic of Uzbekistan in 2017–2021.* Decree of the President of the Republic of Uzbekistan UP-5953 of March 02, 2020]. Available at: http://lex.uz/ru/docs/4751561 (accessed: October 04, 2021). (In Russian)

4. *Mery po uskorennomu reformirovaniyu predpriyatiy s uchastiyem gosudarstva i privatizatsii gosudarstvennykh aktivov.* Ukaz Prezidenta Respubliki Uzbekistan ot 27 oktyabrya 2020 g. [*Measures for the accelerated reform of enterprises with the participation of the state and the privatization of state assets.* Decree of the President of the Republic of Uzbekistan dated October 27, 2020]. Available at: http://lex.uz/ru/docs/5068824 (accessed: October 04, 2021). (In Russian)

5. *Programma lokalizatsii proizvodstva tovarov na vnutrennem i vneshnem rynke na 2020–2021 gg.* Postanovleniye kabineta ministrov Respubliki Uzbekistan no. 136 ot 10 marta 2020 g. [*The program for the localization of production of goods in the domestic and foreign markets for 2020–2021.* Resolution of the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan N 136 dated March 10, 2020]. Available at: http://lex.uz/ru/docs/4759735 (accessed: October 04, 2021). (In Russian)

6. *Mery po realizatsii investitsionnoy programmy Respubliki Uzbekistana na 2021–2023 gg.* Postanovleniye Prezidenta Respubliki Uzbekistan ot 28 dekabrya 2020 g. [*Measures to implement the investment program of the Republic of Uzbekistan for 2021–2023.* Resolution of the

President of the Republic of Uzbekistan dated December 28, 2020]. Available at: http://lex.uz/ru/docs/5189874 (дата обращения: 04.10.2021). (In Russian)

7. Maslov G. P. & Panzo E. N. Vliyaniye aerodinamicheskoy pod"yemnoy sily tokopriyemnika na kachestvo tokos"yema [The influence of the aerodynamic lifting force of the current cellector on the quality of current collection]. *Sovershenstvovaniye skhem ustroystv elektrosnabzheniya transporta i proyektirovaniye ikh konstruktsiy*. Sbornik nauchnykh trudov [*Improvement of the schemes of power supply devices for transport and the design of their structures*. Collection of scientific papers]. Yekaterinburg, Ural State Transport University Publ., 2006, iss. 48 (131), pp. 168–174. (In Russian)

8. Maslov G. P., Pozdnyakov O. I. & Panzo E. N. O vybore ratsional'nyy aerodinamicheskoy kharakteristiki tokopriyemnika [On the choice of rational aerodynamic characteristics of a current collector]. *Issledovaniya i razrabotka resursosberegayushchikh tekhnologiy na zheleznodorozhnom transporte*. Mezhvuzovskiy sbornik nauchnykh trudov s mezhdunarodnym uchastiyem [*Research and development of resource-saving technologies in railway transport*. Interuniversity collection of scientific papers with international participation]. Samara, Samarskiy institute inzhenerov zh.-d. transporta [Samara State Transport University] Publ., 2002, iss. 23, pp. 70–71. (In Russian)

9. Vorob'ev A. A., Budiukin A. M., Kondratenko V. G. & Karimov D. D. ugli. Evolutsia konstruksii podvizhnogo sostava legkorel'sovogo transporta v Sankt-Peterburge [Evolution of design of light-rail transport rolling stock in Saint Petersburg]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [*Proceedings of Petersburg Transport University*], 2020, vol. 17, iss. 1, pp. 62–70. (In Russian)

10. Maslov G. P., Pozdnyakov O. I., Shirokova A. V. & Starikov A. P. O metodakh opredeleniya aerodinamicheskikh pokazateley poloza tokopriyemnika [On the methods of determining the aerodynamic parameters of the pantograph slide]. *Povysheniye nadezhnosti raboty ustroystv elektrosnabzheniya zheleznykh dorog.* Sbornik nauchnykh trudov [*Improving the reliability of power supply devices for railways*. Collection of scientific papers]. Yekaterinburg, Ural. gos. akad. putey soobshcheniya [Ural State Transport Academy] Publ., 2000, iss. 13 (95), pp. 53–57. (In Russian)

Received: October 13, 2021
Accepted: November 24, 2021

Author's information:
Aleksandr A. VOROB'EV – D. Sci. in Engineering, Associate Professor; 79219751198@yandex.ru
Yan S. VATULIN – PhD in Engineering, Associate Professor; yan-roos@yandex.ru
Dastonbek D. ugli KARIMOV – Postgraduate Student; dostonkarimov325@gmail.com

УДК 629.423.31

Тепловая модель асинхронного тягового электродвигателя тепловоза

И. Г. Киселев, Д. Н. Курилкин, М. А. Шрайбер

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

Для цитирования: *Киселев И. Г., Курилкин Д. Н., Шрайбер М. А.* Тепловая модель асинхронного тягового электродвигателя тепловоза // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2021. – Т. 18. – Вып. 4. – С. 460–468.
DOI: 10.20295/1815-588X-2021-4-460-468

Аннотация

Цель: Оценка температурного режима обмоток асинхронного тягового электродвигателя с короткозамкнутым ротором (АТЭД) типа ДАТ-350 тепловоза 2ТЭ25А с использованием разработанной тепловой модели. **Методы:** Исследования проводились методом конечных элементов в приложении по расчету установившихся температурных полей SolidWorks. **Результаты:** Для обеспечения установленного срока службы АТЭД повышение температуры обмоток должно быть ограничено до безопасных значений, исходя из класса изоляции. Поэтому очень важно, чтобы проектировщики и эксплуатационники имели доступ к точным и вычислительно эффективным, основанным на физике происходящих процессов, инструментам моделирования теплового поведения АТЭД. **Практическая значимость:** С помощью предложенных методов можно точно и эффективно оценить тепловые характеристики АТЭД перспективных тепловозов. Кроме того, разработчики могут легко и быстро корректировать параметры и рабочие характеристики АТЭД таким образом, чтобы они благоприятствовали повышению общей производительности локомотива.

Ключевые слова: Тяговый электродвигатель, моделирование, нагревание.

Введение

Современные тенденции развития отечественного локомотивостроения предполагают расширение использования энергоемких технологий и внедрения прогрессивных технических решений. Решение поставленных задач для улучшения работы тягового подвижного состава не представляется возможным без внедрения тягового привода переменного тока с применением асинхронного тягового электродвигателя с короткозамкнутым ротором (АТЭД) [1, 2]. Одновременно с этим растет интерес к моделированию и оптимизации конструкции тяговых электрических машин для достижения лучшей производительности, снижения стоимости и увеличения их надежности [3].

Исследование работы АТЭД по своей сути требует изучения различных аспектов их функционирования, таких как электромагнитное, термическое, гидродинамическое, конструкционное, вибрационное и другие направления. Каждое направление играет важную роль в повышении производительности и надежности работы АТЭД и локомотива в целом [4].

В известных работах тепловые модели строились на основе как сосредоточенных параметров, так и конечных элементов. В первых геометрия электрической машины сосредоточена в отдельных компонентах схемы, таких как термический резистор, тепловой конденсатор и источники теплоты. Эти модели обычно относительно быстрые [5]. Однако сложные и большие модели сосредоточенных параметров требуются для

точного отражения распределенного характера потерь, распределения температуры в машине и сложности геометрии машины [6]. Однако иногда сложно определить соответствующую структуру и результирующие тепловые параметры данных моделей, а также их чувствительность к изменениям условий охлаждения [7].

Метод конечных элементов чаще всего используется для точного прогнозирования внутренних температур АТЭД со сложной геометрией электрической машины, разбитой на мелкие элементы. Такой подход может предоставить точную и распределенную информацию о температуре внутри АТЭД и позволяет легко моделировать сложные конструкции, импортируя геометрию непосредственно из программного обеспечения стандартных пакетов для автоматизированного проектирования [8].

В настоящей статье разработана тепловая модель АТЭД типа ДАТ-350 тепловоза 2ТЭ25А для изучения тепловых потоков внутри электрической машины. Моделирование теплового состояния производилось в приложении по расчету установившихся температурных полей SolidWorks. Данное приложение позволяет смоделировать 2D или 3D установившееся температурное поле АТЭД методом конечных элементов (рис. 1).

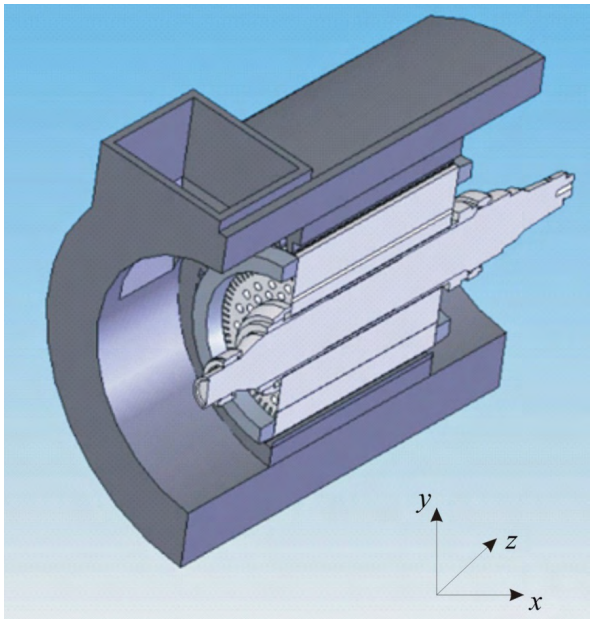


Рис. 1. Фрагмент твердотелой модели АТЭД тепловоза

Для решения поставленной задачи были приняты следующие допущения:

1) в АТЭД с аксиальной системой вентиляции охлаждающий воздух движется вдоль оси ротора по двум параллельным ветвям – в вентиляционных каналах ротора и воздушном зазоре;

2) статор и ротор АТЭД представляются в виде системы многослойных тел, связи между которыми определяются видом и условиями теплообмена;

3) отводом теплоты с поверхностей корпуса АТЭД и подшипниковых щитов из-за их незначительной величины можно пренебречь;

4) температура охлаждающего воздуха по длине ротора изменяется линейно;

5) теплоотводом через торцевые поверхности листов статора и ротора ввиду его малого значения можно пренебречь;

6) расчетные секторы статора и ротора разделяются на объемы, в пределах которых теплофизические свойства материалов одинаковы с сохранением тепловых связей;

7) потери мощности в обмотке статора представляются как распределенные источники тепловой энергии.

Теплопроводность

Явление теплопроводности – это процесс распространения теплоты при непосредственном соприкосновении отдельных частей электрической машины или отдельных ее участков, характеризующихся температурами.

Уравнение в частных производных, связанное с теплопроводностью, имеет вид [9]

$$c\frac{\partial T}{\partial t} - \propto \cdot T = Q, \qquad (1)$$

здесь T – температура, c – удельная теплоемкость материала, $\propto$ – теплопроводность материала, Q – внутреннее тепловыделение.

Учитывая граничные условия, модель тяговой электрической машины построена в форме

сетки, и приведенное дифференциальное уравнение (1) в матричном виде может быть дано таким образом:

$$C\dot{\mathbf{T}} + K\mathbf{T} = \mathbf{Q}. \quad (2)$$

В (2) **T** – вектор узловой температуры сетки конечных элементов, K – матрица конечных элементов, которая соответствует теплопроводности, C – матрица конечных элементов, соответствующая удельной теплоемкости, **Q** – вектор внутреннего тепловыделения.

Матрицы K и C являются симметричными матрицами размером $n \times n$, сгенерированными в процессе сборки модели, где n – количество узлов в трехмерной конечно-элементной сетке. Вектор **Q** может быть разделен на следующие составляющие:

$$\mathbf{Q} = \sum_k \mathbf{P}_k + \sum_m \boldsymbol{\alpha}_m, \quad (3)$$

где **Pk** – вектор потерь в электрической машине; $\boldsymbol{\alpha}_m$ – вектор теплопроводности.

Тензор теплопроводности области паза статора рассчитывается с помощью метода правила смесей [9]. Поскольку область паза представляет собой смесь медного проводника и изоляции, эквивалентный тензор теплопроводности можно определить так:

$$\left[\propto_{ij}\right] = \begin{bmatrix} \propto_x & 0 & 0 \\ 0 & \propto_y & 0 \\ 0 & 0 & \propto_z \end{bmatrix},$$

здесь

$$\propto_x = \propto_y = \frac{1}{\frac{f_s}{\propto_{\text{м}}} + \frac{1-f_s}{\propto_{\text{и}}}},$$

$$\propto_z = f_s \propto_{\text{м}} + (1-f_s) \propto_{\text{и}} -$$

составляющие коэффициента теплопроводности по осям координат, $\propto_{\text{м}}$ – теплопроводность меди, $\propto_{\text{и}}$ – теплопроводность изоляции, f_s – коэффициент заполнения паза.

Охлаждение тяговой электрической машины за счет теплопередачи в (3) может использоваться для моделирования воздушного охлаждения на любой границе (обычно на внешней границе статора и ротора с обеих сторон и на их поверхности).

Коэффициент теплопередачи $\propto$ для воздушного охлаждения АТЭД может быть определен благодаря эмпирическим измерениям или компьютерным моделированием динамики воздушного потока [10].

Теплообмен в воздушном зазоре

В воздушном зазоре происходит как теплопередача, так и конвективный теплообмен между движущейся средой и поверхностями ротора и статора. В предлагаемой тепловой модели эта задача решается путем моделирования воздушного зазора с эффективной теплопроводностью, учитывающей и теплопроводность, и конвекцию.

Чтобы получить эффективную теплопроводность, статор и ротор моделируются как концентрические вращающиеся цилиндры. Конвекционный теплообмен между двумя вращающимися цилиндрами можно рассчитать с помощью безразмерного числа Рейнольдса (Re), числа Тейлора (Te) и числа Нуссельта (Nu). Выражения для определения числа Рейнольдса и числа Тейлора приведены в [11]:

$$\mathrm{Re} = \frac{lnr_{\text{р}}}{\nu}, \ \mathrm{Te} = \mathrm{Re}\sqrt{\frac{l}{r_{\text{р}}}},$$

где l – длина воздушного зазора; n – частота вращения ротора; $r_{\text{р}}$ – радиус ротора; ν – кинематическая вязкость воздуха.

Число Нуссельта можно найти по соответствующему числу Тейлора [11]:

$$\mathrm{Nu} = \begin{cases} 2,2, & \mathrm{Te} < 41, \\ 0,23\,\mathrm{Te}^{0,63}\,\mathrm{Pr}^{0,27}, & 41 \le \mathrm{Te} \le 100, \\ 0,425\,\mathrm{Te}^{0,5}\,\mathrm{Pr}^{0,27}, & \mathrm{Te} > 100, \end{cases}$$

здесь $\mathrm{Pr} = \nu h$ – число Прандтля, h – коэффициент температуропроводности воздуха.

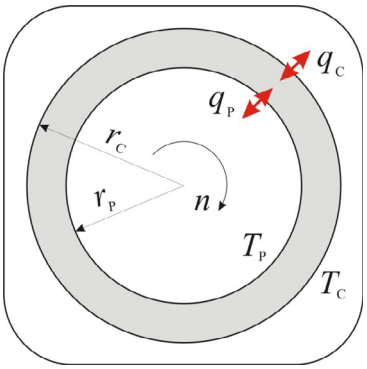


Рис. 2. Соотношения потоков для цилиндрического кольцевого пространства в виде воздушного зазора

Конвективный теплообмен, который определяется числом Нуссельта, может быть объединен с кондуктивным теплопереносом в уравнении теплопередачи, чтобы сформировать эффективную теплопроводность как для кондуктивной, так и для конвективной теплопередачи [12]:

$$\propto_э (n) = \frac{\mathrm{Nu} \propto_в}{2},$$

где $\propto_в$ – теплопроводность неподвижного воздуха.

После определения эквивалентной теплопроводности будем использовать тот факт, что воздушный зазор представляет собой цилиндрическое кольцевое пространство, как показано на рис. 2.

Решая уравнение Лапласа и принимая однородную нормальную плотность теплового потока q и температуру T на границах воздушного зазора статора и ротора, получаем следующие соотношения теплового потока и температуры между статором и ротором [13]:

$$q_c = \frac{\propto_э (n)}{r_c \ln\left(\frac{r_c}{r_p}\right)} (T_p - T_c),$$

$$q_p = \frac{\propto_э (n)}{r_p \ln\left(\frac{r_c}{r_p}\right)} (T_p - T_c),$$

в которых q_c, q_p – тепловой поток поверхностей статора и ротора соответственно; T_c, T_p – температура поверхностей статора и ротора соответственно; r_c, r_p – радиусы статора и ротора.

Блок-схему тепловой модели АТЭД иллюстрирует рис. 3.

Входными данными для разработанной модели являются температура охлаждающего воздуха, коэффициенты теплопередачи, частота вращения ротора и фазный ток обмотки статора. Частота вращения и фазный ток определяют исходные данные для расчета потерь. Потери и условия охлаждения применяются в тепловых моделях статора и ротора, которые впоследствии связываются вместе с использованием соотно-

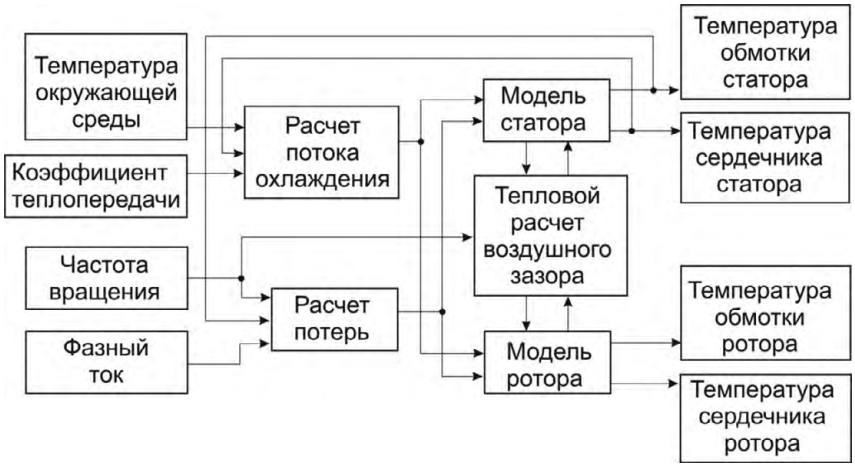


Рис. 3. Блок-схема тепловой модели АТЭД тепловоза

шения теплопередачи через воздушный зазор. Выходные данные модели – это температуры в различных местах обмотки и сердечника статора и ротора АТЭД.

Результаты расчета температуры

На рис. 4 представлено температурное поле участка ротора через 1 ч протекания по обмотке статора номинального фазного тока. Полученное поле распределения температуры по длине ротора неравномерно и зависит от эффективности ее охлаждения, которая, в свою очередь, определяется толщиной и состоянием изоляции. При расчете предполагалось, что изоляция имеет качественную однородную пропитку без посторонних включений воздуха и непропитанных слоев.

В данном случае отвод теплоты от обмотки ротора в основном производится в сердечник, что вызывает неравномерное распределение температуры по высоте. Температура нижних слоев обмотки на 12 °С меньше, чем в верхних, где отвод теплоты осуществляется через закрытие паза, имеющего большую толщину и меньшее значение коэффициента теплопередачи в охлаждающий воздух.

Картина изменения температуры расчетного участка по длине обмотки статора при максимальном токе фазы $I_{a\max} = 710$ А представлена на рис. 5. Как и в предыдущем случае, распределение температуры по длине обмотки статора неравномерное. Со стороны воздушного зазора температура на 8–10 °С выше, чем со стороны сердечника. Это также объясняется различием коэффициентов теплопередачи в охлаждающий воздух и сердечник статора.

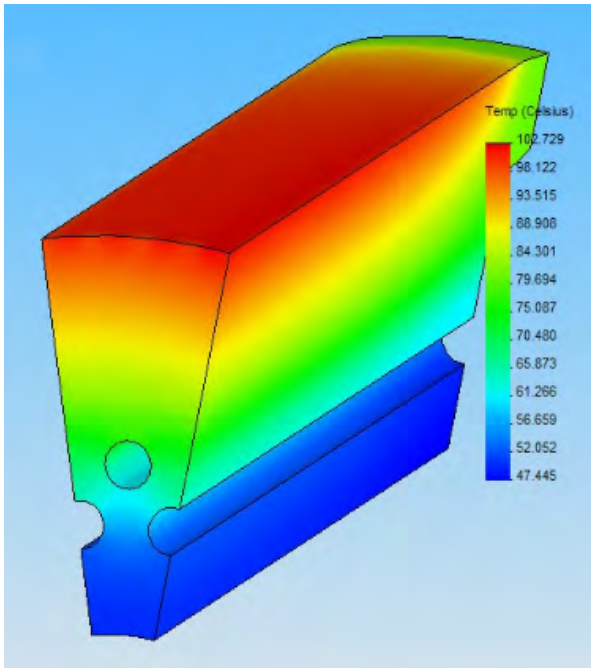


Рис. 4. Температурное поле расчетного участка ротора при $I_{an} = 470$ А

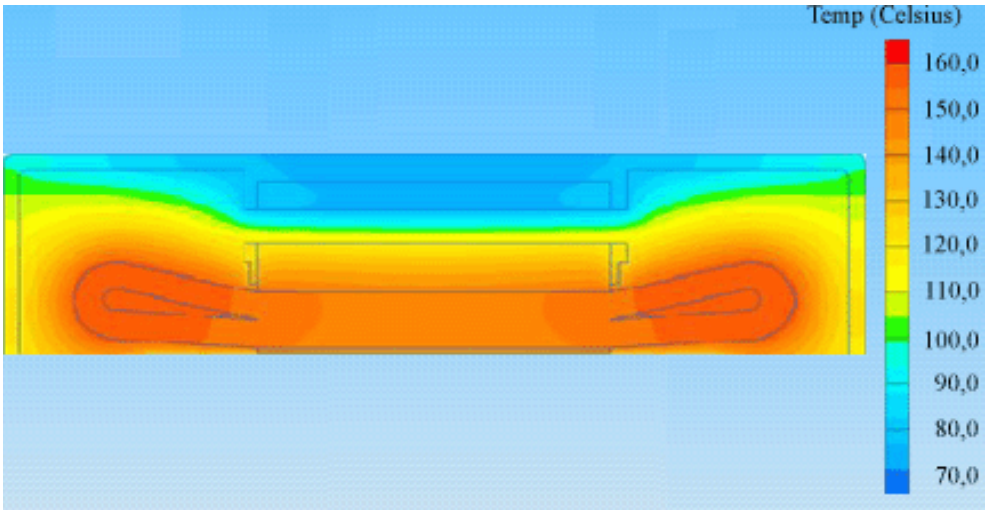


Рис. 5. Температурное поле расчетного участка обмотки статора при $I_{a\max} = 710$ А

Отдельно необходимо отметить нагревание лобовых частей обмотки статора, температура которых увеличивается на 12–15 °С по сравнению с основной частью, что происходит также из-за разности значений коэффициентов теплопередачи.

На рис. 6 приведены зависимости, полученные при моделировании температуры обмотки статора АТЭД ДАТ-350 по длине паза при номинальной (I_{an}) и максимальной ($I_{a\max}$) величинах фазного тока, и экспериментальные значения (отдельные точки) по данным автоматической системы контроля тепловоза 2ТЭ25А в условиях Байкало-Амурской магистрали. Представленные экспериментальные данные имеют существенный разброс значений, который объясняется тем, что соответствующие значения фазного тока получены при различных режимах работы тепловоза, температурах окружающей среды и расходах охлаждающего воздуха.

Температура по длине паза статорной обмотки увеличивается из-за того, что, во-первых, происходит повышение температуры охлаждающего воздуха, а во-вторых, это приводит к снижению коэффициента теплопередачи в окружающую среду.

Заключение

Представленная тепловая модель АТЭД для расчета распределения температуры статорной и роторной обмоток адекватно отражает физические процессы, происходящие в электродвигателе закрытого исполнения с принудительным охлаждением, и может быть использована для оперативного определения ее температуры.

Дальнейшее развитие предлагаемой тепловой модели может быть связано с учетом влияния нагрева ротора, анализом анизотропии распределения температуры по длине обмотки и на ее лобовых частях, оценкой превышения температуры в объеме пазовой части обмотки.

Библиографический список

1. Энергосбережение на железнодорожном транспорте: учебник для вузов / под ред. В. А. Гапановича. – М.: Изд. Дом МИСиС, 2012. – 620 с.

2. Burkov A. T. Increasing the performance of electric traction in the long term on the next-generation technological horizon / A. T. Burkov, A. N. Marikin, A. V. Mizintsev, V. V. Seronosov // Russian Electrical Engineering. – 2018. – Vol. 89 (10). – P. 588–591.

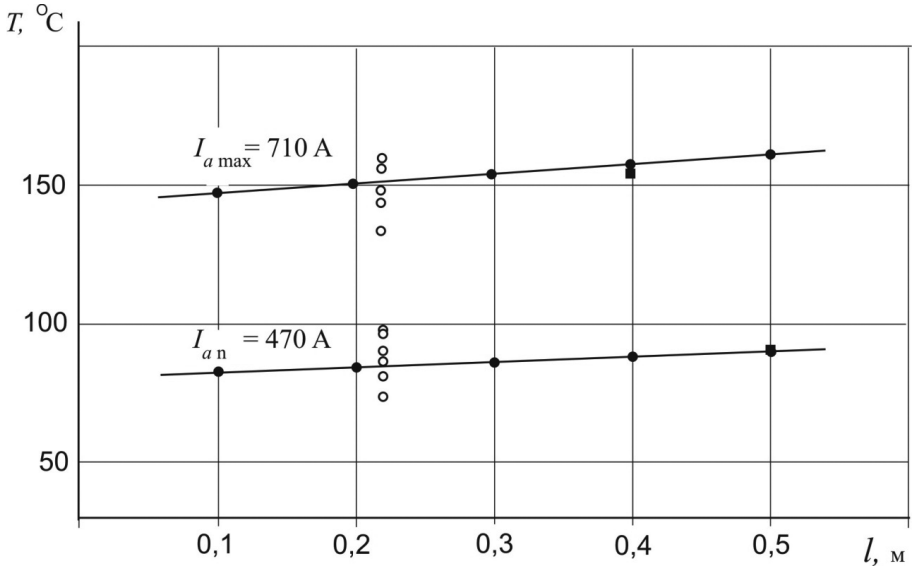


Рис. 6. Изменение температуры обмотки вдоль паза статора:
—— – по результатам моделирования в среде SolidWorks; ○ – по данным эксплуатации тепловоза 2ТЭ25А

3. Шрайбер М. А. Моделирование теплового состояния тяговых электродвигателей постоянного тока / М. А. Шрайбер // Бюллетень результатов научных исследований. – 2014. – Вып. 4 (13). – С. 36–38.

4. Космодамианский А. С. Исследование тепловых режимов тягового асинхронного двигателя на комплексной физической модели / А. С. Космодамианский, В. И. Воробьев, А. А. Пугачев // Вестник транспорта Поволжья. – 2016. – № 4 (58). – С. 53–57.

5. EL-Refaie A. Thermal analysis of multibarrier interior PM synchronous machine using lumped parameter model / A. EL-Refaie, N. Harris, T. Jahns, K. Rahman // IEEE Trans. Energy Convers. – 2004. – Vol. 19. – N 2. – P. 303–309.

6. Nategh S. Thermal modeling of directly cooled electric machines using lumped parameter and limited CFD analysis / S. Nategh, H. Zhe, A. Krings, O. Wallmark, M. Leksell // IEEE Trans. Energy Convers. – 2013. – Vol. 28. – N 4. – P. 979–990.

7. Zhang P. A survey of condition monitoring and protection methods for medium-voltage induction motors / P. Zhang, Y. Du, T. Habetler, B. Lu // IEEE Trans. Ind. Appl. – 2011. – Vol. 47. – N 1. – P. 34–46.

8. Hughes T. The finite element method: Linear static and dynamic finite element analysis / T. Hughes. – Mineola, New York, US: Dover Publications, 2000. – 320 p.

9. Филиппов И. Ф. Основы теплообмена в электрических машинах / И. Ф. Филиппов. – Л.: Энергия, 1974. – 384 с.

10. Шрайбер М. А. Определение коэффициента теплоотдачи коллектора тягового электродвигателя тепловоза / М. А. Шрайбер // Бюллетень результатов научных исследований. – 2020. – Вып. 2. – С. 90–99.

11. Staton D. Solving the more difficult aspects of electric motor thermal analysis in small and medium size industrial induction motors / D. Staton, A. Boglietti, A. Cavagnino // IEEE Trans. Energy Convers. – 2005. – Vol. 20. – N 3. – P. 620–628.

12. Funieru B. Thermal design of a permanent magnet motor used for gearless railway traction / B. Funieru, A. Binder // Proceedings of 2008 34th Annu. Conference IEEE Ind. Electron. (IECON). – November 2008. – P. 2061–2066.

13. Беспалов В. Я. Упрощенная математическая модель нестационарного нагрева и охлаждения обмотки статора асинхронного двигателя / В. Я. Беспалов, Ю. А. Мощинский, В. И. Цуканов // Электричество. – 2003. – № 4. – С. 20–26.

Дата поступления: 05.10.2021
Решение о публикации: 07.10.2021

Контактная информация:
КИСЕЛЕВ Игорь Георгиевич – д-р техн. наук, проф.; tatiana_kiss@yandex.ru
КУРИЛКИН Дмитрий Николаевич – канд. техн. наук, доц.; kurilkin_d@mail.ru
ШРАЙБЕР Марина Александровна – канд. техн. наук, доц.; goshapti4ka@yandex.ru

Thermal model of an asynchronous traction motor of a diesel locomotive

I. G. Kiselev, D. N. Kurilkin, M. A. Shreiber

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

For citation: Kiselev I. G., Kurilkin D. N., Shreiber M. A. Thermal model of an asynchronous traction motor of a diesel locomotive. *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2021, vol. 18, iss. 4, pp. 460–468. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2021-4-460-468

Summary

Objective: Evaluation of the temperature regime of the windings of an asynchronous traction electric motor with a squirrel-cage rotor (ATED) of the DAT-350 type of a 2TE25A diesel locomotive using the de-

veloped thermal model. **Methods:** The research was carried out by the finite element method in the application for calculating steady-state temperature fields SolidWorks. **Resuls:** To ensure the specified service life of the ATED, the temperature rise of the windings must be limited to safe values, based on the insulation class. Therefore, it is crucial that designers and operators have access to accurate and computationally efficient, physics-based ATED thermal behavior modeling tools. **Practical results:** Using the proposed methods, it is possible to accurately and effectively evaluate the thermal characteristics of ATED of promising diesel locomotives. In addition, designers can easily and quickly adjust the parameters and performance characteristics of the ATED in such a way that they are conducive to improving the overall performance of the locomotive.

Keywords: Traction motor, simulation, heating.

References

1. *Energosberezheniye na zheleznodorozhnom transporte*. Uchebnik dlya vuzov [*Energy saving in railway transport*. Textbook for universities]. Ed. by V.A. Gapanovich. Moscow, Publishing House MISIS, 2012, 620 p. (In Russian)

2. Burkov A.T., Marikin A.N., Mizintsev A.V. & Seronosov V.V. Increasing the performance of electric traction in the long term on the next-generation technological horizon. *Russian Electrical Engineering*, 2018, vol. 89 (10), pp. 588–591.

3. Shreiber M.A. Modelirovaniye teplovogo sostoyaniya tyagovogo elektrodvigatelya postoyannogo toka [Simulation of thermal state of a direct current traction motor]. *Byulleten rezultatov nauchnykh issledovaniy* [*Bulletin of research results*], 2014, iss. 4 (13), pp. 36–38. (In Russian)

4. Kosmodamiansky A.S., Vorobiev V.I. & Pugachev A.A. Issledovaniye teplovykh rezhimov tyagovogo asinkhronnogo dvigatelya na kompleksnoy fizicheskoy modeli [Investigation of thermal modes of a traction induction motor on a complex physical model]. *Vestnik transporta Povolzh'ya* [*Transport Bulletin of the Volga region*], 2016, no. 4 (58), pp. 53–57. (In Russian)

5. EL-Refaie A., Harris N., Jahns T. & Rahman K. Thermal analysis of multibarrier interior PM synchronous machine using lumped parameter model. *IEEE Trans. Energy Convers*., 2004, vol. 19, no. 2, pp. 303–309.

6. Nategh S., Zhe H., Krings A., Wallmark O. & Leksell M. Thermal modeling of directly cooled electric machines using lumped parameter and limited CFD analysis. *IEEE Trans*. *Energy Convers*., 2013, vol. 28, no. 4, pp. 979–990.

7. Zhang P., Du Y., Habetler T. & Lu B. A survey of condition monitoring and protection methods for medium-voltage induction motors. *IEEE Trans. Ind. Appl*., 2011, vol. 47, no. 1, pp. 34–46.

8. Hughes T. *The finite element method: Linear static and dynamic finite element analysis*. Mineola, New York, US, Dover Publications, 2000, 320 p.

9. Filippov I.F. *Osnovy teploobmena v elektricheskikh mashinakh* [*Fundamentals of heat transfer in electrical machines*]. Leningrad, Energiya Publ., 1974, 384 p. (In Russian)

10. Shreiber M.A. Opredeleniye koeffitsiyenta teplootdachi kollektora tyagovogo elektrodvigatelya teplovoza [Determination of the heat transfer coefficient of the locomotive traction motor collector]. *Byulleten rezultatov nauchnykh issledovaniy* [*Bulletin of research results*], 2020, iss. 2, pp. 90–99. (In Russian)

11. Staton D., Boglietti A. & Cavagnino A. Solving the more difficult aspects of electric motor thermal analysis in small and medium size industrial induction motors. *IEEE Trans. Energy Convers*, 2005, vol. 20, no. 3, pp. 620–628.

12. Funieru B. & Binder A. Thermal design of a permanent magnet motor used for gearless railway traction. *Proceedings of 34th Annu. Conference IEEE Ind. Electron. (IECON)*, November 2008, pp. 2061–2066.

13. Bespalov V. Ya., Moshchinskiy Yu.A. & Tsukanov V.I. Uproshchennaya matematicheskaya model' nestatsionarnogo nagreva i okhlazhdeniya obmotki statora asinkhronnogo dvigatelya [Simplified mathe-

matical model of non-stationary heating and cooling of the stator winding of an induction motor]. *Elektrichestvo* [*Electricity*], 2003, no. 4, pp. 20–26. (In Russian)

Received: October 05, 2021
Accepted: October 07, 2021

Author's information:
Igor G. KISELEV – D. Sci. in Engineering, Professor; tatiana_kiss@yandex.ru
Dmitry N. KURILKIN – PhD in Engineering, Associate Professor; kurilkin_d@mail.ru
Marina A. SCHREIBER – PhD in Engineering, Associate Professor; goshapti4ka@yandex.ru

УДК 625.033.34

Упругие характеристики подрельсового основания безбалластного железнодорожного пути

А. Ф. Колос, К. И. Иванова

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

Для цитирования: *Колос А. Ф., Иванова К. И.* Упругие характеристики подрельсового основания безбалластного железнодорожного пути // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2021. – Т. 18. – Вып. 4. – С. 469–479.
DOI: 10.20295/1815-588X-2021-4-469-479

Аннотация

Цель: Экспериментальное определение модуля упругости подрельсового основания и коэффициента соотносительной жесткости подрельсового основания и рельса, которые являются основными упругими характеристиками, определяющими напряжения в элементах конструкции верхнего строения пути под динамической нагрузкой от поезда. Значения этих параметров для пути с балластным слоем хорошо изучены, в отличие от безбалластного пути. Сравнение упругих характеристик безбалластного железнодорожного пути с аналогами пути на балласте, а также оценка их влияния на напряженно-деформированное состояние элементов верхнего строения безбалластного пути. **Методы:** При проведении натурных испытаний применялись тензометрические методы измерений напряжений в элементах верхнего строения пути. Полученные значения обрабатывались методами математической статистики. В один статистический ряд включались величины напряжений, соответствующие одному типу подвижного состава, фиксированной нагрузки на ось и скорости движения поезда, изменяющейся не более чем на 10 км/ч. Уровень вероятности при обработке результатов принимался во всех случаях равным 0,994. **Результаты:** Были получены значения модуля упругости подрельсового основания и коэффициента соотносительной жесткости подрельсового основания и рельса для безбалластной конструкции типа RHEDA 2000. **Практическая значимость:** Результаты позволяют рассматривать рельс как балку, лежащую на сплошном упругом основании, применительно к безбалластному пути и использовать существующие методы расчета для проектирования конструкций безбалластного пути в зависимости от условий эксплуатации.

Ключевые слова: Безбалластный путь, тензометрия, кромочные напряжения, модуль упругости подрельсового основания, коэффициент соотносительной жесткости подрельсового основания.

Введение

Развитие железнодорожного транспорта в Российской Федерации невозможно без расширения сети скоростных и высокоскоростных железных дорог, увеличения пропускной и провозной способностей железных дорог из-за роста объемов грузовых и пассажирских перевозок. В настоящее время происходят стремительное ускорение движения поездов и усиление нагрузок на конструкции железнодорожного пути. В мировой практике на участках со скоростями движения свыше 160 км/ч (участки скоростного и высокоскоростного движения) существует тенденция перехода на безбалластные конструкции верхнего строения пути, которые считаются более малообслуживаемыми и отличаются значительным сроком службы (до 50–60 лет) [1].

Несмотря на значительные капитальные вложения, применение безбалластных конструкций имеет ряд существенных преимуществ по сравнению с балластными конструкциями верхнего строения пути. Они заключаются в существенном уменьшении затрат на техническое обслуживание пути, повышении плавности хода поезда, снижении влияния шума на окружающую среду, вибрационного воздействия на грунты земляного полотна и окружающую застройку, экономии топливно-энергетических ресурсов, затрачиваемых на тягу поезда, и др. [2].

Эксплуатационный опыт России и в особенности зарубежных стран свидетельствует о технико-экономической эффективности конструкций безбалластного пути для определенных условий эксплуатации [3]. Сегодня известно более 15 типов конструкций безбалластного пути, однако задача выбора типа конструкции для конкретных условий эксплуатации в настоящее время до конца не решена [4]. Основной причиной этого является отсутствие простых и в то же время приемлемых для инженерной практики методов расчета напряженно-деформированного состояния безбалластного пути, учитывающих особенности самой конструкции, инженерно-геологических условий строительства, условий эксплуатации и др. Существующие методы расчета трудоемкие и требуют значительного объема исходных данных. Также они малодоступны инженерному персоналу проектных организаций в силу своей математической сложности, что ведет к затруднению процесса проектирования. При сравнении условий работы рельса при балластном и безбалластном верхнем строении пути резонно утверждать, что и в том, и в другом случае рельс можно рассматривать как балку, лежащую на сплошном упругом основании [5]. В связи с этим возможно проводить оценку напряженно-деформированного состояния верхнего строения пути, полагаясь на хорошо известные и достаточно простые теории и модели расчета.

Правила расчета пути на прочность позволяют определить напряженно-деформированное состояние составляющих верхнего строения пути (рельсов, шпал, скреплений, балластного слоя) для балластного пути. В их основе лежит использование модели балки, лежащей на упругом основании [6]. В этом случае исходят из теоремы Швердлера–Журавского для изогнутой оси рельса:

$$EI\frac{d^2y}{dx^2} = M \text{ или } -EI\frac{d^4y}{dx^4} = \frac{d^2y}{dx^2} = q, \quad (1)$$

где M – изгибающий момент; q – реакция подрельсового основания; E – модуль упругости рельсовой стали; I – момент инерции поперечного сечения рельса относительно его центральной горизонтальной оси, проходящей через центр тяжести сечения; y – упругий прогиб рельса под нагрузкой.

Для решения уравнения (1) принимается линейная зависимость между упругим прогибом рельса и реакцией подрельсового основания, которая выражается через постоянную U, называемую модулем упругости подрельсового основания:

$$q = -U \cdot y. \quad (2)$$

Интегрирование уравнения (1) с учетом зависимости (2) приводит к известным решениям, определяющим упругий прогиб рельса, изгибающий момент и давление рельса на шпалу [7]:

$$y = \frac{Pk}{2U}e^{-kx}(\cos kx + \sin kx),$$

$$M = \frac{P}{4k}e^{-kx}(\cos kx - \sin kx), \quad (3)$$

$$Q = Uyl = \frac{Pkl}{2}e^{-kx}(\cos kx + \sin kx),$$

здесь l – расстояние между осями шпал, k – коэффициент соотносительной жесткости подрельсового основания и рельса, рассчитываемый следующим образом:

$$k = \sqrt[4]{\frac{U}{4EI}}. \quad (4)$$

Исходя из формул (3), изгибающий момент пропорционален так называемым ординатам линии влияния μ_{kx}, определяемых соотношением

$$\mu_{kx} = e^{-kx}(\cos kx - \sin kx). \qquad (5)$$

Графически функция μ_{kx} представлена на рис. 1, на котором также показано положение динамических сил *1–3* от колес подвижного состава (тележка подвижного состава), действующих на рельс.

Анализируя рис. 1, видно, что линия влияния изгибающего момента пересекает горизонтальную ось в точках, ординаты которых $x = \pi/4k$, далее $x = 5\pi/4k$ и т. д. Поэтому, зная расстояния x, возможно экспериментальным путем найти сначала коэффициент соотносительной жесткости подрельсового основания и рельса k и далее, используя формулу (4) и выражая U через k, определить модуль упругости подрельсового основания:

$$U = 4E \cdot Ik^4. \qquad (6)$$

Расчетными упругими характеристиками железнодорожного пути являются значения U и k, которые для верхнего строения пути на балласте хорошо изучены [8]. Для балластного пути с железобетонными шпалами модуль упругости U изменяется от 50 до 120 МПа и от 20 до 30 МПа для пути с деревянными шпалами в зависимости от упругих свойств применяемых подрельсовых прокладок, эпюры шпал, упругих свойств балластного слоя и земляного полотна. Подобный вывод можно сделать и по отношению к показателю соотносительной жесткости подрельсового основания и рельса, зависимого также от упругих свойств рельсовой стали и фактической геометрии поперечного профиля рельса (от 1,10 до 1,6 м$^{-1}$ для пути с железобетонными шпалами и от 0,90 до 1,1 м$^{-1}$ для пути с деревянными шпалами).

Для безбалластного пути исследуемые упругие характеристики остаются неизвестными, что затрудняет применение модели балки на сплошном упругом основании для оценки напряженно-деформированного состояния элементов верхнего строения пути. В связи с этим изучение упругих характеристик железнодорожного пути безбалластной конструкции является актуальной инженерной задачей.

Методы исследований

Натурные испытания по определению модуля упругости и коэффициента соотносительной жесткости подрельсового основания и рельса производились на 46 км линии Санкт-Петербург–Москва на перегоне Саблино–Тосно (II главный путь, пикет ПК 45+65,00). На экспериментальном участке уложена конструкция безбалластного пути RHEDA 2000, особенности

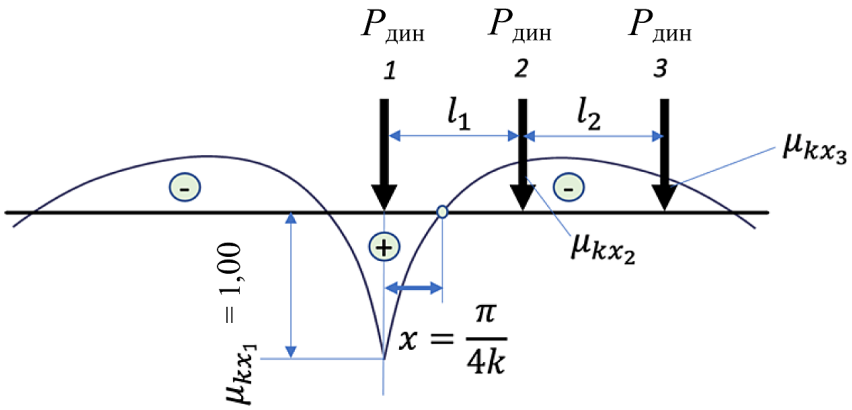


Рис. 1. Эпюра изгибающего момента в рельсе

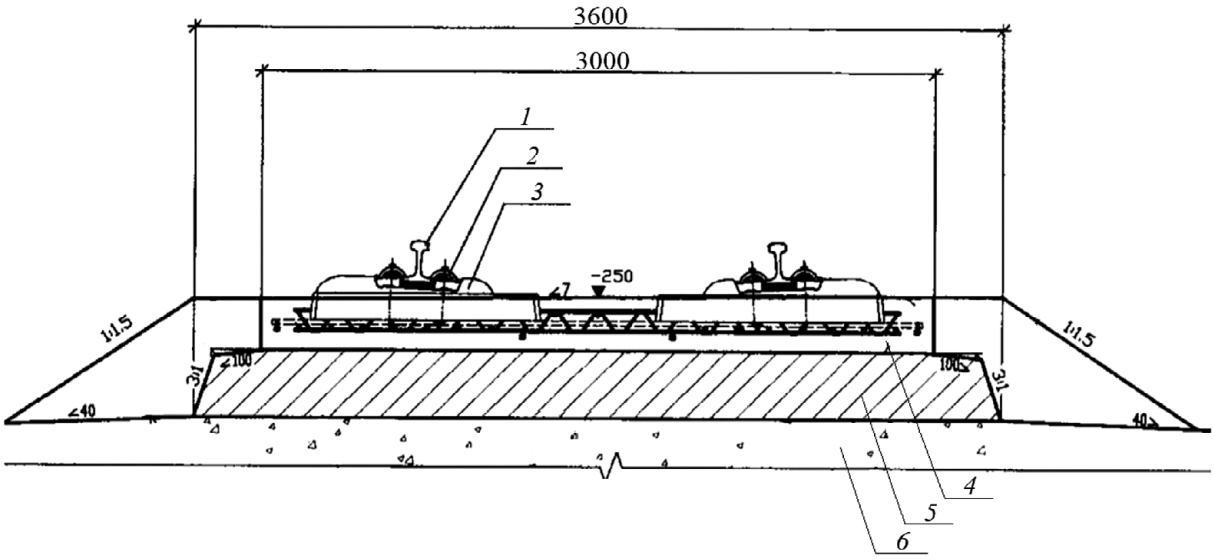


Рис. 2. Конструкция безбалластного верхнего строения пути RHEDA 2000:
1 – рельс типа Р65; *2* – скрепление VOSSLOH 301-НН; *3* – двухблочная полушпала B355.4U65-20M, эпюра укладки 1840 шт./км; *4* – армированная несущая бетонная плита из бетона класса В40 толщиной 240 мм; *5* – фундаментная плита (гидравлически связанный несущий слой) из бетона класса В15 толщиной 300 мм; *6* – защитный слой из щебеночно-песчано-гравийной смеси специально подобранного гранулометрического состава толщиной 40 см

которой приведены на рис. 2. Данный участок размещался на насыпи, сложенной песком средней крупности, в основании под насыпью залегают суглинки легкие пылеватые от твердых до пластичных.

На экспериментальном участке обращались порожние грузовые поезда с локомотивом ВЛ-10, пассажирские поезда дальнего следования с локомотивом ЭП2 К, пригородные электропоезда ЭР, а также региональные скоростные электропоезда ЭС1 «Ласточка». Скорость грузовых поездов в процессе испытаний изменялась от 40 до 80 км/ч, у пассажирских (дальнего следования, региональных и пригородных) – от 40 до 110 км/ч.

Для определения расстояния $x = \pi/4k$ (см. рис. 1) на кромке подошвы наружной рельсовой нити наклеивались тензометрические датчики (тензорезисторы), удовлетворяющие требованиям [9]. Применялись тензорезисторы с номинальным сопротивлением 100 Ом и базой 20 мм. Тензодатчики крепились специальным клеем, место наклейки зачищалось от краски, ржавчины, окалины с помощью абразивных средств и обезжиривалось.

Тензорезисторы были наклеены на подошву рельса (снизу) на расстоянии 3 мм от наружной кромки, как показано на рис. 3. Крепление происходило в продольном направлении с наружной кромки рельса через каждые 10–50 см. Число измерительных сечений на рельсе составило 8, общая длина измерительного участка была равна 2,175 м. Схема размещения тензодатчиков на экспериментальном участке приведена на рис. 4.

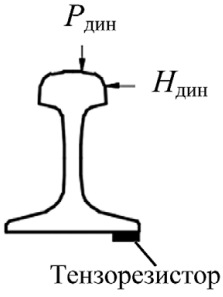


Рис. 3. Схема наклейки тензодатчика на подошву рельса

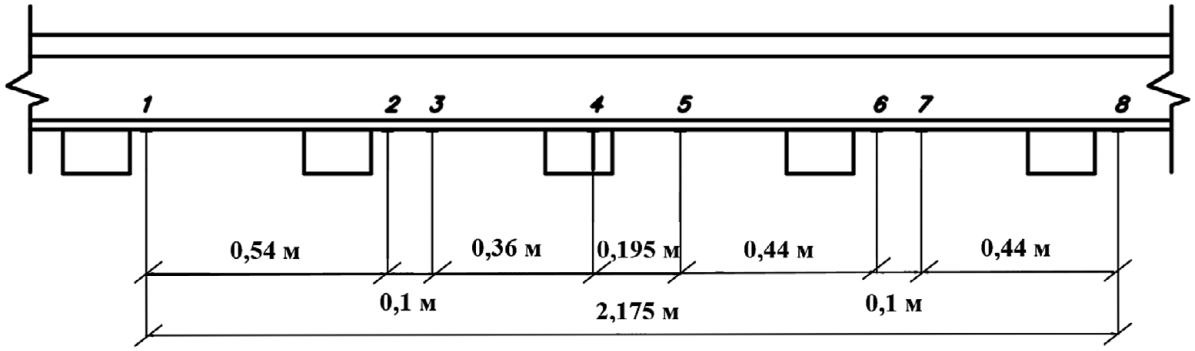


Рис. 4. Схема наклейки тензодатчиков *1–8* на подошве рельсов в продольном направлении

При проведении испытаний использовалась мостовая схема подключения тензорезисторов, в этом случае рабочий тензорезистор омическим сопротивлением R_1 включался в схему неравновесного моста (рис. 5).

Градуировка регистрирующих приборов осуществлялась с помощью консольной балки равного сопротивления (рис. 6), на которую наклеивали датчики из той же партии, что и используемые в экспериментальных исследованиях [10].

Последовательность градуировки измерительной схемы была следующей: рабочий датчик R_1 наклеивался на кромку подошвы рельса, монтировалась мостовая схема, в одно из плеч которой включался также градуировочный датчик R_2, а в два других плеча – резисторы с постоянным электрическим сопротивлением R_3 и R_4. Мостовая схема приводилась в равновесное положение за счет регулировки сопротивления датчика R_2, добиваясь, чтобы сила тока в диагонали моста была равна нулю. Затем к балке равного сопротивления поочередно подвешивались грузы разной массы, вызывающие действие сил P (рис. 6) и соответственно образующие изгибающие моменты M. При применении балки равного сопротивления, в которой напряжения от изгиба σ_{T-i} в любом сечении одинаковы при приложении силы P, последние рассчитывали по формуле

$$\sigma_{T\text{-}i} = \frac{M}{W},$$

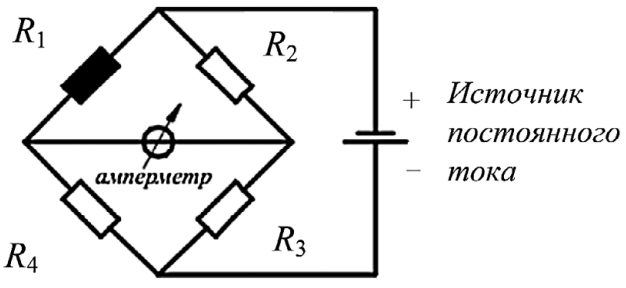


Рис. 5. Мостовая схема включения тензрезисторов:
R_1 – рабочий датчик, установленный на кромке подошвы рельса;
R_2 – градуировочный датчик;
R_3 и R_4 – резисторы с постоянным электрическим сопротивлением

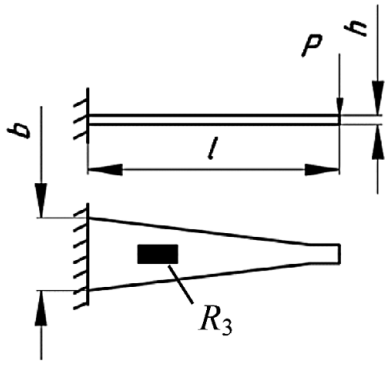


Рис. 6. Консольная балка равного сопротивления для градуировки измерительной схемы:
h – толщина балки, равная 0,5 см;
l – длина балки, равная 20 см;
b – ширина балки, равная 8 см;
P – место приложения силы

в которой M – величина изгибающего момента, W – момент сопротивления балки равного сопротивления.

Величину изгибающего момента вычисляли по известной формуле

$$M = P \cdot l.$$

В момент приложения нагрузки P к балке наблюдалось разбалансирование мостовой схемы, и в плече моста фиксировалась сила тока I_T. Зная абсолютную величину изгибающих напряжений в балке и зафиксировав силу тока I_{T-i}, протекающего в диагонали моста в измерительной системе, определяли коэффициент тарировки K_{T-i}:

$$K_{T\text{-}i} = \frac{\sigma_{T-i}}{I_{T\text{-}i}}.$$

По результатам параллельных испытаний при разных величинах приложенных сил P методами математической статистики находили среднее значение коэффициента тарировки $\overline{K_T}$.

Таким образом, дальнейшие исследования базировались на определении изгибных напряжений в рельсе σ_p путем преобразования величины силы тока в диагонали моста $I_{изм}$, возникающей за счет его разбалансирования при приложении нагрузки от колеса к рельсу и вызывающего изменение омического сопротивления тензодатчика R_1:

$$\sigma_p = \overline{K}_T \cdot I_{изм}.$$

В момент испытаний проводилась одновременная запись показаний всех тензодатчиков, что позволяло при обработке результатов экспериментов определять в один и тот же момент времени изгибные напряжения в кромках подошвы рельсов при различном положении осей подвижного состава относительно наклеенных тензодатчиков.

Полученные в ходе натурных замеров данные обрабатывались методами математической статистики. В один статистический ряд включались полученные напряжения, соответствующие одному типу подвижного состава, фиксированной нагрузки на ось и скорости движения поезда, изменяющейся не более чем на 10 км/ч. Уровень вероятности при обработке результатов принимался во всех случаях равным 0,994. В конечном итоге были получены средние значения напряжений в кромках подошвы рельса, их максимально вероятные величины и коэффициенты вариаций.

Результаты исследований

Как известно [11], напряжения, возникающие в кромках подошвы рельса, можно определить по следующей зависимости:

$$\sigma_p = \frac{M}{W} \cdot f, \qquad (7)$$

где M – изгибающий момент в рельсе, возникающий при проходе подвижного состава; W – момент сопротивления рельса относительно наиболее удаленного волокна на подошве; f – коэффициент перехода от осевых напряжений к кромочным, который может быть принят по данным [12].

Подставив в (7) формулу (3) и учитывая выражение (5), получим

$$\sigma_p = \frac{P \cdot f}{4kW} \cdot \mu_{kx}. \qquad (8)$$

Анализ выражения (8) приводит к заключению, что наблюдается прямо пропорциональная зависимость между кромочными напряжениями в подошве рельса и ординатой линии влияния. Следовательно, эпюра кромочных напряжений в рельсе по его длине будет повторять эпюру изгибающего момента, при этом кромочные напряжения, равные нулю, будут фиксироваться в точке, удаленной от первой оси тележки подвижного состава на расстоянии $x = \pi/4k$ [12]. В этом случае, фиксируя момент прохождения первой оси тележки подвижного состава над первым датчиком (см. рис. 4) и принимая во внимание

направление движения поезда справа на лево, можно построить по результатам испытаний эпюру кромочных напряжений в рельсе, действующих в этот же момент времени, тем самым определив методом интерполяции расстояние x, соответствующее горизонтальной координате $\pi/4k$ (см. рис. 1). Зная значение $x = \pi/4k$, нетрудно обратным ходом рассчитать коэффициент соотносительной жесткости подрельсового основания и рельса, после чего воспользоваться формулой (6) для вычисления модуля упругости подрельсового основания.

С помощью этого подхода были найдены средние значения модуля упругости подрельсового основания U для различных типов подвижного состава, движущегося с разными скоростями движения. Результаты экспериментов и выполненных расчетов представлены в таблице.

Анализ результатов

На основе полученных данных на рис. 7 приведены зависимости изменения модуля упругости подрельсового основания от скорости движения и типа подвижного состава.

Анализ проведенных экспериментов и результатов статистической обработки показывает, что модуль упругости подрельсового основания изменяется в достаточно узком диапазоне – от 58,9 до 61,0 МПа при различных скоростях движения и любых типах подвижного состава. Расхождение результатов отдельных экспериментов не превышает, как правило, 3–5 %. При этом установить четко выраженную зависимость от исследуемых параметров по результатам экспериментов не удалось, хотя и наблюдается незначительное влияние конструкции ходовых частей подвижного состава на модуль упругости подрельсового основания. В то же время диапазон его изменения настолько незначителен, что такой факт можно отнести к погрешности проводимых испытаний.

Таким образом, для практических целей модуль упругости подрельсового основания безбалластной конструкции верхнего строения пути RHEDA 2000 в летний период может быть принят равным 60 МПа.

Модуль упругости подрельсового основания безбалластной конструкции верхнего строения пути RHEDA 2000

Тип подвижного состава	Модуль упругости подрельсового основания безбалластной конструкции RHEDA 2000, U, МПа, при скорости движения поездов, км/ч						
	от 40 (вкл.) до 50 (искл.)	от 50 (вкл.) до 60 (искл.)	от 60 (вкл.) до 70 (искл.)	от 70 (вкл.) до 80 (искл.)	от 80 (вкл.) до 90 (искл.)	от 90 (вкл.) до 100 (искл.)	от 100 (вкл.) до 110 (искл.)
Электропоезд ЭР	60,0	60,0	59,8	60,0	59,9	59,8	59,5
Электропоезд «Ласточка» ЭС1	–	–	59,0	58,7	58,9	58,9	58,9
Локомотив ЭП2К	61,0	60,9	60,8	60,8	60,8	60,7	60,6
Локомотив ВЛ10	61,0	61,0	61,0	61,0	–	–	–
Пассажирский вагон	59,9	59,9	59,8	59,8	59,8	59,8	59,7
Среднее	**60,7**	**60,6**	**60,5**	**60,5**	**60,3**	**60,3**	**60,2**
Общее среднее	60,4						

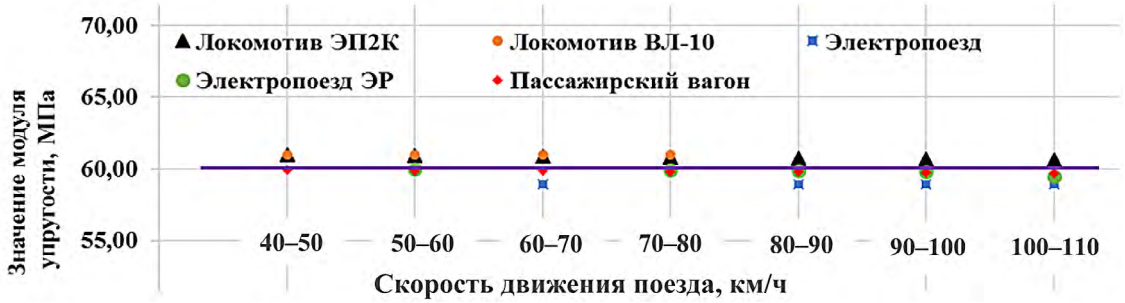


Рис. 7. Влияние скорости движения и типа подвижного состава на модуль упругости подрельсового основания безбалластной конструкции верхнего строения пути RHEDA 2000

В ряде источников [13 и др.] отмечается, что одним из основных недостатков безбалластной конструкции пути принято считать ее высокую жесткость. Жесткость пути $Ж_п$, как известно, численно равна силе, приложенной к рельсу, вызывающей упругий прогиб последнего, равный единице, т. е. жесткость пути напрямую связана с модулем упругости подрельсового основания [14]:

$$Ж_п = \frac{2U}{k}.$$

Однако результатами натурных экспериментов не выявлено значительного повышения жесткости пути безбалластной конструкции верхнего строения пути RHEDA 2000 по сравнению с железнодорожным балластным путем с железобетонными шпалами. Так, в среднем для типовой балластной конструкции пути модуль упругости подрельсового основания изменяется от 50 до 120 МПа [15], в то время как для безбалластной конструкции RHEDA 2000 он составил всего 60 МПа. Поскольку жесткость пути в целом зависит от жесткости отдельных элементов, то полученные результаты можно объяснить применением скреплений типа VOSSLOH W-301-HH с подрельсовыми прокладками повышенной упругости.

Заключение

По данным экспериментального определения модуля упругости подрельсового основания безбалластной конструкции верхнего строения пути RHEDA 2000, приведенным в настоящей статье, можно сделать следующие основные выводы:

1) модуль упругости подрельсового основания безбалластного пути не зависит существенным образом от типа подвижного состава при скоростях движения поездов от 40 до 110 км/ч. Полученные в ходе испытаний значения отличаются друг от друга не более чем на 3–5 %;

2) среднее значение модуля упругости подрельсового основания конструкции RHEDA 2000 составило 60 МПа в летний период, что свидетельствует об отсутствии повышения жесткости безбалластного пути по сравнению с верхним строением балластного пути. Это можно объяснить применением скреплений типа VOSSLOH W-301-HH с подрельсовыми прокладками повышенной упругости;

3) упругие характеристики подрельсового основания конструкции RHEDA 2000 позволяют использовать расчетную модель балки, лежащей на сплошном упругом основании, для оценки напряженно-деформированного состояния всех элементов верхнего строения безбалластного пути.

Библиографический список

1. Савин А. В. Выбор конструкции пути для высокоскоростного движения / А. В. Савин // Вестник ВНИИЖТ. – 2014. – № 1. – С. 18–21.

2. Kazanskaya L. Influence of mixture composition on fresh concrete workability for ballastless track

slabs / L. Kazanskaya, O. Smirnova // E3S Web of Conferences. – 2020. – N 06022.

3. Разуваев А. Д. Оценка экономической эффективности применения безбалластной конструкции верхнего строения пути при строительстве железных дорог: дис. канд. экон. наук, специальность: 08.00.05 / А. Д. Разуваев. – М.: Моск. гос. ун-т путей сообщения, 2017. – 223 с.

4. Kolos A. F. Full-scale study of stress-strain state of ballastless upper structure construction of rail way in terms of train dynamic load / A. F. Kolos, T. M. Petrova, A. O. Makhonina // Procedia Engineering. – 2017. – Vol. 189. – P. 429–433.

5. Шаповалов С. Н. Действие подвижной нагрузки на балку, лежащую на упругом основании с переменными параметрами: автореф. дис. на соискание учен. степени канд. техн. наук, специальность: 05.23.17 / С. Н. Шаповалов. – М.: Моск. гос. ун-т путей сообщения, 2004. – 22 с.

6. Говоров В. В. Универсальный метод оценки прочности элементов верхнего строения железнодорожного пути на основе расчетной модели балки на упругом основании / В. В. Говоров, Н. Н. Султанов, М. С. Чусовитин // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2017. – Т. 14. – Вып. 2. – С. 223–229.

7. Яковлева Т. Г. Железнодорожный путь: учеб. пособие / Т. Г. Яковлева, Н. И. Карпущенко, С. И. Клинов, Н. Н. Путря, М. П. Смирнов. – М.: Транспорт, 1999. – 213 с.

8. Chernyaev E. Analysis of residual deformations accumulation intensity factors of the railway track located in the polar zone / E. Chernyaev, V. Cherniaeva, L. Blazhko, V. Ganchits // Lecture Notes in Civil Engineering. – 2020. – Vol. 49. – P. 381–388.

9. ГОСТ 21616–91. Тензорезисторы. Общие технические условия. – М.: Министерство общего машиностроения СССР, 1991. – 49 с.

10. ГОСТ Р 55050–2012. Железнодорожный подвижной состав. Нормы допустимого воздействия на железнодорожный путь и методы испытаний. – М.: ОАО «ВНИИЖТ», 2013. – 23 с.

11. Boronenko Yu. P. Continuous monitoring of the wheel-rail contact vertical forces by using a variable measurement scale / Yu. P. Boronenko, R. V. Rahimov, W. M. Lafta, S. V. Dmitriev, A. V. Belyankin, D. A. Sergeev // Joint Rail Conference JRC–2020. – 2020. – V001T13A006.ASME.

12. Методика оценки воздействия подвижного состава на путь по условиям обеспечения его надежности. – Утв. Распоряжением ОАО «РЖД» № 2706/р от 22 декабря 2017 г. – М.: ОАО «РЖД», 2017. – 97 с.

13. Замуховский А. В. Перспективы полигона безбалластного пути / А. В. Замуховский // Мир транспорта. – 2013. – Т. 3. – С. 168–172.

14. Schilder R. Installation quality of slab track – A decisive factor for maintenance text / R. Schilder, D. Diederich // RTR Special, Austria. – 2007. – P. 76–78.

15. Wang P. Analysis on the effect of cracks of CRTS II slab track on subgrade text / P. Wang, R. Chan // Journal of Southwest Jaiotong University, China. – 2012. – N 47 (6). – P. 929–934.

Дата поступления: 20.10.2021
Решение о публикации: 15.11.2021

Контактная информация:
КОЛОС Алексей Федорович – канд. техн. наук, доц.; kolos2004@inbox.ru
ИВАНОВА Ксения Игоревна – аспирант; kivanova@pgups.ru

Elastic characteristics of the underrail base of a ballastless railway track

A. F. Kolos, K. I. Ivanova

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

For citation: Kolos A. F., Ivanova K. I. Elastic characteristics of the underrail base of a ballastless railway track. *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2021, vol. 18, iss. 4, pp. 469–479. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2021-4-469-479

Summary

Objective: Experimental determination track modulus and the coefficient of relative stiffness of underrail base and the rail, which are the main elastic characteristics that determine the stresses in the structural elements of track superstructure under the impact force from the train. The values of these parameters for a track with a ballast layer are well studied, in contrast to a ballastless track. Comparison of the elastic characteristics of a ballastless railway track with analogs of a track on ballast, as well as an assessment of their effect on the stress-strain state of the superstructure elements of a ballastless track. **Methods:** When carrying out full-scale tests, strain-gauge methods for measuring stresses in the elements of the track superstructure were used. The obtained values were processed by the methods of mathematical statistics. One statistical series included the values of stresses corresponding to one type of rolling stock, fixed axle load and train speed, changing by no more than 10 km/h. The probability level in processing the results was taken in all cases equal to 0,994. **Results:** The values of track modulus and the coefficient of the relative stiffness of the underrail base and the rail were obtained for a ballastless structure of the RHEDA 2000 type. **Practical importance:** The results allow us to consider the rail as a beam lying on a solid elastic foundation in relation to the ballastless track and use the existing calculation methods for the design of ballastless track structures depending on the operating conditions.

Keywords: Ballastless track, strain-gauge measurements, edge stresses, modulus of elasticity of the under-rail base, coefficient of relative underrail base stiffness.

References

1. Savin A. V. Vybor konstruktsii puty dlya vysokoskorostnogo dvyzheniya [The selection of track design for high-speed running]. *Vestnik VNIIZHT* [*Proceedings of VNIIZhT (All-Russian Research and Development Institute of Railway Transport)*], 2014, no. 1, pp. 18–21. (In Russian)

2. Kazanskaya L. & Smirnova O. Influence of mixture composition on fresh concrete workability for ballastless track slabs. *E3S Web of Conferences*, 2020, no. 06022.

3. Razuvayev A. D. *Otsenka ekonomicheskoy effektivnosti primeneniya bezballastnoy konstruktsii verkhnego stroyeniya puti pri stroitel'stve zheleznykh dorog* [*Evaluation of the economic efficiency of the use of ballastless construction of the upper structure of the track in the construction of railways*]. Cand. Econ. Sci. dissertation, speciality: 08.00.05. Moscow, Moscow State Transport University Publ., 2017, 223 p. (In Russian)

4. Kolos A. F., Petrova T. M. & Makhonina A. O. Full-scale study of stress-strain state of ballastless upper structure construction of rail way in terms of train dynamic load. *Procedia Engineering*, 2017, vol. 189, pp. 429–433.

5. Shapovalov S. N. *Deystviye podvizhnoy nagruzki na balku, lezhashchuyu na uprugom osnovanii s peremennymi parametrami* [*Impact of a rolling load on a beam lying on an elastic foundation with variable parameters*]. Extended abstract of Cand. Eng. Sci. dissertation,

speciality: 05.23.17. Moscow, Moscow State Transport University Publ., 2004, 22 p. (In Russian)

6. Govorov V. V., Sultanov N. N. & Chusovityn M. S. Universalniy metod otsenky prochnosty elementov verkhnego stroyeniya zheleznodorozhnogo puty na osnove raschetnoy modely balky na uprugom osnovanii [Universal method of track structure elements' bearing capacity assessment on the basis of beam on elastic foundation simulation model]. *Izvestiya Peterburgskogo Universiteta putey soobshcheniya* [*Proceedings of Petersburg State Transport University*], 2017, vol. 14, iss. 2, pp. 223–229. (In Russian)

7. Yakovleva T. G., Karpushchenko N. I., Klinov S. I., Putrya N. N. & Smirnov M. P. *Zheleznodorozhniy put'.* Uchebnoye posobiye [*Railway track.* Tutorial]. Moscow, Transport Publ., 1999, 213 p. (In Russian)

8. Chernyaev E., Cherniaeva V., Blazhko L. & Ganchits V. Analysis of residual deformations accumulation intensity factors of the railway track located in the polar zone. *Lecture Notes in Civil Engineering*, 2020, vol. 49, pp. 381–388.

9. *GOST 21616–91. Tensorezistory. Obchie texnicheskie uslovia* [*GOST 21616–91. Tensoresistores. General technical conditions*]. Moscow, Ministry of General Machine-building Publ., 1991, 49 p. (In Russian)

10. *GOST R 55050–2012. Zheleznodorozhnyy podvizhnoy sostav. Normy dopustimogo vozdeystviya na zheleznodorozhnyy put' i metody ispytaniy* [*GOST R 55050–2012. Railway rolling stock. Standards of permissible impact on the railway track and test methods*]. Moscow, OAO "VNIIZHT" [JSC "All-Russian Research Institute of Railway Transport"] Publ., 2013, 23 p. (In Russian)

11. Boronenko Yu. P., Rahimov R. V., Lafta W. M., Dmitriev S. V., Belyankin A. V. & Sergeev D. A. Continuous monitoring of the wheel-rail contact vertical forces by using a variable measurement scale. *Joint Rail Conference JRC–2020*, 2020, V001T13A006. ASME.

12. *Metodika otsenki vozdeystviya podvizhnogo sostava na put' po usloviyam obespecheniya yego nadezhnosti*. Utv. rasporyazheniyem OAO "RZHD" no. 2706/r ot 22 dekabrya 2017 g. [*Methodology for assessing the impact of rolling stock on the track in terms of ensuring its reliability*. Appr. by order of JSC "Russian Railways" N 2706/r dated December 22, 2017]. Moscow, OAO "RZHD" [JSC "Russian Railways"] Publ., 2017, 97 p. (In Russian)

13. Zamukhovsky A. V. Perspektiva poligona bezballastnogo puty [The prospect of a ballastless track polygon]. *Mir transporta* [*The World of Transport*], 2013, vol. 3, pp. 168–172. (In Russian)

14. Schilder R. & Diederich D. Installation quality of slab track – A decisive factor for maintenance text. *RTR Special*, Austria, 2007, pp. 76–78.

15. Wang P. & Chan R. Analysis on the effect of cracks of CRTS II slab track on subgrade text. *Journal of Southwest Jaiotong University*, China, 2012, no. 47 (6), pp. 929–934.

Received: October 20, 2021
Accepted: November 15, 2021

Author's information:
Alexey F. KOLOS – PhD in Engineering, Associated Professor; kolos2004@inbox.ru
Ksenia I. IVANOVA – Postgraduate Student; kivanova@pgups.ru

УДК 629.4.015

Энергооптимизация режимов движения поезда на языке программы C#

А. Т. угли Лесов, В. О. Иващенко

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

Для цитирования: *Лесов А. Т. угли, Иващенко В. О.* Энергооптимизация режимов движения поезда на языке программы C# // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2021. – Т. 18. – Вып. 4. – С. 480–490. DOI: 10.20295/1815-588X-2021-4-480-490

Аннотация

Цель: Анализ существующих методов тяговых расчетов, включающих комплекс способов и приемов определения массы состава, скорости движения и времени хода по перегону, расхода топлива и электроэнергии на тягу, решение тормозных задач, для поиска оптимальных режимов ведения поездов на полигоне узбекских железных дорог для оптимизации использования электрической энергии в рамках графика движения поездов и его оптимизации с точки зрения минимизации расхода электроэнергии. Тяговые расчеты – важная составная часть науки о тяге поездов, одно из основных мероприятий, проводимых для организации поездной работы и проектирования железнодорожных линий. **Методы:** Методика выбора траектории движения поезда предусматривает расчет в виде блоков с исходными данными параметров состава и учитывает две задачи решения уравнения движения поезда. **Результаты:** На основании разработанной компьютерной оболочки для выполнения тяговых расчетов построена графическая зависимость скорости электровоза от пройденного пути (энергооптимальные кривые движения поезда) на перегоне станция Алтыарык – станция Маргелан. **Практическая значимость:** Описанная методика расчетов с применением блоков компьютерной оболочки позволяет значительно упростить и ускорить проведение тяговых расчетов, обеспечить высокую точность результатов и представить их в удобной и наглядной форме.

Ключевые слова: Тяговый расчет, график движения поезда, сопротивления движению поезда, торможения, результирующая сила, сила тяги.

Проведение тяговых расчетов позволяет определить количество необходимых тяговых мощностей для организации движения определенного количества грузов [1]. От точности проведения тяговых расчетов напрямую зависит экономический эффект предприятий железнодорожного транспорта, эффективность использования локомотивного и вагонного парка. На основе анализа последних исследований установлено, что моделирование движения поезда (тяговые расчеты) производится на ЭВМ с применением численных методов решения уравнения движения [2–5]. Интегрирование уравнения движения поезда может проводиться по пути, по времени, по скорости, в зависимости от поставленной задачи, в которой используются тяговые расчеты [6]. Решения уравнения движения поезда являются общими для всех видов тяги и составляют две группы [7, 8].

К первой группе относятся задачи, при решении которых предполагается, что поезд движется с установившейся скоростью. Это дает возможность определить массу поезда и скорость, которую он может развить при движении по конкретному профилю пути. Вторая группа задач решается для неустановившегося режима

движения. Это позволяет рассчитать режимы разгона и торможения поезда, скорости и время движения по различным элементам профиля пути, возможность использования кинетической энергии для преодоления «инерционных» подъемов, крутизной больше расчетных [7]. Структура созданного специализированного программного комплекса для решения таких задач представлена на рис. 1.

Для автоматизации решения перечисленных задач применительно к условиям узбекских железных дорог «Ўзбекистон темир йўллари» («ЎТЙ») создана компьютерная оболочка. Исходными данными для расчетов являются:

– профиль пути;

– максимально допустимая скорость движения на перегоне ($V_{доп}$, км/ч);

– тип вагона;

– масса тары вагона ($Q_{тв}$, т);

– учетная длина вагона ($l_{в}$, м);

– количество осей вагона ($N_{ов}$, шт.);

– грузоподъемность вагона ($Q_{гв}$, т);

– коэффициент загрузки вагона (α);

– длина приемо-отправочных путей ($l_{пп}$, м);

– тип электровоза;

– расчетная сила тяги электровоза ($F_{кр}$, кН);

– расчетная скорость движения электровоза ($V_{р}$, км/ч);

– расчетная масса электровоза (P, т);

– учетная длина электровоза ($l_{л}$, м).

Согласно Правилам тяговых расчетов для поездной работы [9], после определения массы состава ее необходимо проверить по условиям трогания с места после остановки на расчетном подъеме и условию размещения поезда в границах приемо-отправочных путей станций. За выполнение этих расчетов отвечает следующий блок программной оболочки:

```
//Расчет постоянных для данного состава и
пути (для данного варианта)
     sc[0] = scc[0];
     for (int i = 1; i < count; i++) sc[i] =
sc[i - 1] + scc[i];
```

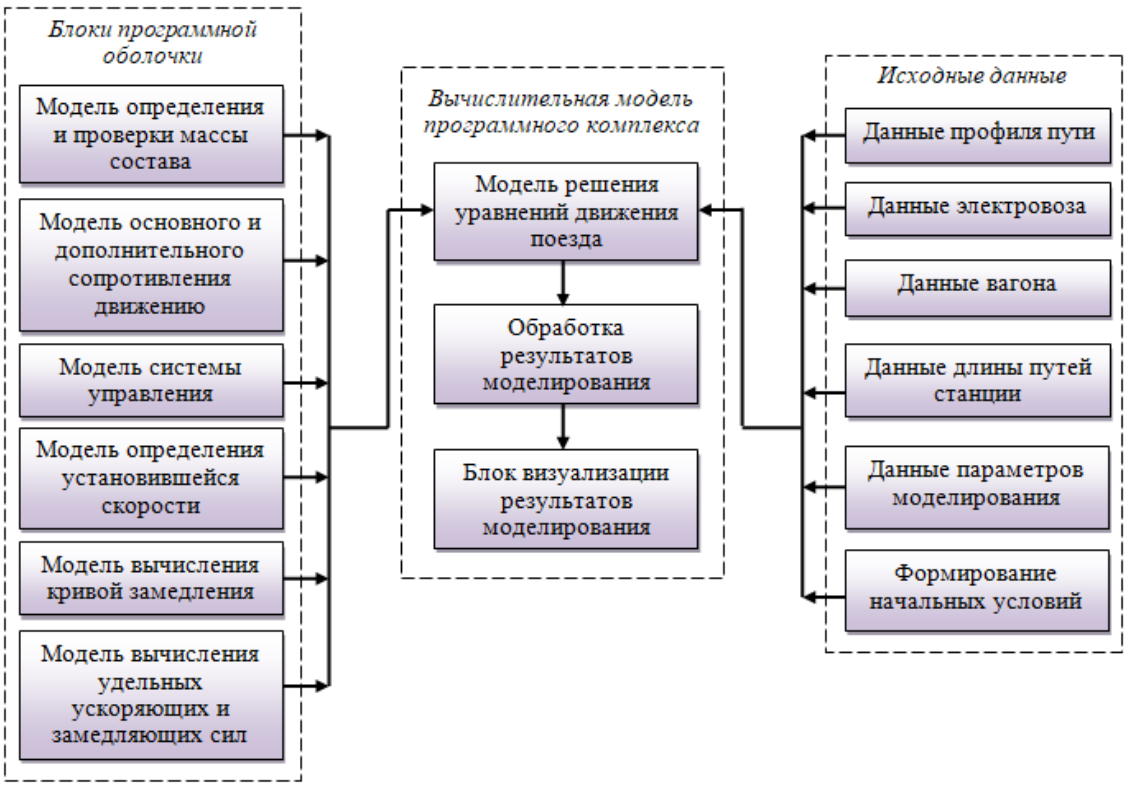


Рис. 1. Структура созданного программного комплекса

```
    double vv = ic[0] * scc[0]; //
Нахождение максимального произведения ic*scc
(прогиба/выгиба на длину перегона), и выдача
ic от него
    for (int i = 0; i < count; i++) { if
(vv < ic[i] * scc[i]) { vv = ic[i] * scc[i];
imax = i; } }
    ir = ic[imax];
    q0 = (Qtv[k] + Qgv[k] * alfa[k]) /
Nov[k]; //Расчет q0
    Qr = (1000 * Fkr - P * g * (wo1(Vr) +
ir)) / ((wo11(Vr) + ir) * g); //Расчет Qr
    wtr = 28 / (q0 + 7); //Расчет wtr
    Qtr = (1000 * Fkr) / ((wtr + ir) * g) -
P; //Расчет Qtr
    if (Qtr >= Qr) Q1 = Qr; else Q1 = Qtr;
//Выбор минимума из Qtr и Qr для Q1
    Nv1 = (int)(Q1 / (q0 * Nov[k])); //
Расчет Nv1
    lp = ll + lv[k] * Nv1; //Расчёт lp
    if (lp + 10 > lpp) Nv = (int)((lpp - ll
- 10) / lv[k]); else Nv = Nv1; //Расчет Nv
    Q = q0 * Nov[k] * Nv; // Расчет Q
    double f090 = f0(90.0); //f0 от 90,
минимальная точка Fk от v
//Конец расчета постоянных для данного
состава и пути
```

Расчетный подъем выбирается из условия

$$i_{элi} \cdot S_{элi} = \max \cdot i_{р} = i_{элi},$$

где $i_{элi}$ – величина уклона i-го элемента профиля, ‰; $S_{элi}$ – длина i-го элемента профиля, м.

При необходимости осуществляются корректировка числа вагонов и расчет скорректированной массы состава.

Затем необходимо определить удельные равнодействующие ускоряющие и замедляющие силы. Основные удельные сопротивления локомотива $w_{о}'$ и вагонов $w_{о}''$ вычисляются для скоростей, приведенных в исходных данных. Коэффициент трения колодок о бандаж колеса $\varphi_{кр}$ рассчитывается в зависимости от скорости движения и материала, из которого изготовлены колодки, тормозной коэффициент состава $\upsilon_{р}$ – в зависимости от материала колодок. Удельные ускоряющие и замедляющие силы находятся с помощью следующего блока программной оболочки:

```
       public double wo1(double vs)
       { return(1.9 + 0.01 * vs + 0.0003 *
vs * vs); }
       public double wo11(double vs)
       {
         if (j == 1) { return(0.53 + (3.49 +
0.075 * vs + 0.0022 * vs * vs) / q0); }
         else if (j == 2) { return(0.64 +
(2.84 + 0.044 * vs + 0.0022 * vs * vs) /
q0); }
         else if (j == 3) { return(0.7 + (6
+ 0.027 * vs + 0.0017 * vs * vs) / q0); }
         return(0);
}
public double wo(double v)
{ return (Wo_(v) + Wo__(v)) / ((P + Q) * g); }
public double Wo_(double v)
{ return (wo1(v) * g * P); }
public double Wo__(double v)
{ return wo11(v) * Q * g; }
public double wox(double v)
{ return (Wx(v) + Wo__(v)) / ((P + Q) * g);
}
public double Wx(double v)
{ return(wx(v) * P * g); }
public double wx(double vs)
{ return (2.4 + 0.011 * vs + 0.00035 * vs *
vs); }
public double b0(double v)
{ return 0.5 * bk(v) + wox(v); }
public double bk(double v)
{ return 1000 * fikr(v) * nyur; }
public double fikr(double v) //Расчет φкр
{ return 0.36 * (v + 150) / (2 * v + 150); }
if (q0 > 15) Kr = 83.4; else Kr = 68.7; //
Расчет Kr от q0
nyur = (Kr * Nv * Nov[k]) / ((P + Q) * g);
//Расчет Uр
```

Задачи второй группы решаются путем интегрирования дифференциального уравнения

движения. Для точного решения этого уравнения необходимо иметь формулы, связывающие между собой равнодействующие ускоряющие и замедляющие силы, скорость движения, длину пройденного пути и время движения.

Уравнение движения поезда можно записать в виде системы [6]

$$\frac{ds}{dt} = v, \qquad (1)$$

$$\frac{dv}{dt} = \xi \cdot \left[\frac{F}{P+Q} - \frac{B}{P+Q} - w_{\text{о}} - w_{\text{д}} \right], \qquad (2)$$

в которой P – масса локомотива или вагонов электропоезда, Q – масса состава или масса пассажиров электропоезда, $w_{\text{о}}$ – удельное основное сопротивление движению, $w_{\text{д}}$ – удельное дополнительное сопротивление движению, $\xi = \dfrac{\varepsilon}{1+\gamma}$, $(1 + \gamma)$ – коэффициент инерции вращающихся частей поезда, ε – коэффициент, учитывающий размерность переменных, заданных в не соответствующих СИ единицах.

Дифференциальное уравнение движения поезда в координатах пути и скорости получим из (1) и (2) следующим образом:

$$\frac{dv}{ds} = \frac{\xi}{v} \cdot \left[\frac{F}{P+Q} - \frac{B}{P+Q} - w_{\text{о}} - w_{\text{д}} \right]. \qquad (3)$$

В режиме тяги $F > 0$, $B = 0$; в режиме выбега, когда отключены тяговые двигатели, $F = 0$, $B = 0$; в режиме торможения $F = 0$, $B > 0$.

Решая дифференциальное уравнение (3), можно найти зависимость скорости от времени $v(t)$ и пути от времени $s(t)$. Решением уравнения (2) являются зависимости функции скорости от времени. В теории тяги [10] их называют кривыми движения поезда, в теории оптимального управления движением поезда [7] – траекториями движения поезда.

Наибольшее распространение при моделировании движения получил метод Эйлера [7]. Он прост в использовании и при малых шагах интегрирования позволяет получить достаточную точность расчетов.

Запишем уравнения (3) в виде

$$\frac{dv}{ds} = \frac{\xi(f - w - b)}{v}, \qquad (4)$$

где

$$\xi = \frac{\varepsilon}{1+\gamma}; \quad f = \frac{F}{P+Q}; \quad b = \frac{B}{P+Q}.$$

Используя метод Эйлера для решения уравнения (4), получим расчетные формулы для определения скорости, времени и пути.

Приближенное решение для времени движения

$$dt = \frac{dv}{\xi(f - w - b)}.$$

На произвольном шаге расчета время, пройденный путь и скорость находим по формулам

$$t_j = t_{j-1} + \frac{\Delta V}{\xi(f - w - b)},$$

$$S_j = S_{j-1} + 0{,}5(V_j + V_{j-1}) \frac{\Delta V}{\xi(f - w - b)},$$

$$V_j = V_{j-1} + \Delta V,$$

в которых V_j, V_{j-1} – скорости поезда соответственно в конце j-го и j–1-го шагов интегрирования; t_j, t_{j-1} – время хода поезда соответственно к концу j-го и j–1-го шагов интегрирования; S_j, S_{j-1} – путь, пройденный поездом соответственно к концу j-го и j–1-го шагов интегрирования; ΔV – шаг интегрирования по скорости.

Интегрирование проводится по элементам профиля с шагом интегрирования ΔV. Чем меньше шаг интегрирования, тем точнее выполняемый расчет. На точность решений влияет и способ определения равнодействующих ускоряющих и замедляющих сил в зависимости от скорости.

Режим движения поезда на изучаемом элементе профиля находятся с помощью следующего блока программной оболочки:

```
public int rejim(double v0, int m) //0 – тяга, 1 – выбег, 2 – торможение
            { int a = 0;
            if (ic[m] >= -5 && v0 < Vr) { a = 0; }
            else if (ic[m] >= -2 && v0 >= Vr) { a = 0; }
            else if (ic[m] < -5 && v0 < 40) { a = 0; }
            else if (ic[m] >= -5 && ic[m] <= -2 && v0 >= Vr) { a = 1; }
            else if (ic[m] < -5 && v0 >= 40) { a = 1; }
            if ((v0 > 60) && (m == (count - 2)) && (ic[m] <= 2.0)) { a = 1; vib = true; }
            if (vib) a=1;
            if (torm) a = 2;
            return a; }
```

Для определения знака приращения скорости необходимо рассчитать установившуюся скорость на данном элементе профиля. За это отвечает такой блок программной оболочки:

```
double D = 0.0, v1 = 0.0, v2 = 0.0, a = 0.0, b = 0.0, c = 0.0, d1 = 0.0, p3 = 0.0, q3 = 0.0; //Переменные для решения квадратных и кубических уравнений
       //Расчет установившихся скоростей для элементов
       for (int iu = 0; iu < count; iu++)
       {
         if (f090 <= ic[iu])
          {
           vustf[iu] = 0.0;
           if ((j == 1) || (j == 2)) a = (-0.0003 * P - 0.0022 * Nov[k] * Nv) / (P + Q);
           else if (j == 3) a = (-0.0003 * P - 0.0017 * Nov[k] * Nv) / (P + Q);
           if (j == 1) b = (-0.01 * P - 0.075 * Nov[k] * Nv) / (P + Q);
           else if (j == 2) b = (-0.01 * P - 0.044 * Nov[k] * Nv) / (P + Q);
           else if (j == 3) b = (-0.01 * P - 0.027 * Nov[k] * Nv) / (P + Q);
           if (j == 1) c = (-1.9 * P - 0.53 * Q - 3.49 * Nov[k] * Nv) / (P + Q) - ic[iu];
           else if (j == 2) c = (-1.9 * P - 0.64 * Q - 2.84 * Nov[k] * Nv) / (P + Q) - ic[iu];
           else if (j == 3) c = (-1.9 * P - 0.7 * Q - 6 * Nov[k] * Nv) / (P + Q) - ic[iu];
           d1 = 1000 * Fkr * Vr / ((P + Q) * g);
           p3 = (3 * a * c - b * b) / (3 * a * a);
           q3 = (2 * b * b * b - 9 * a * b * c + 27 * a * a * d1) / (27 * a * a * a);
          D = q3 * q3 / 4 + p3 * p3 * p3 / 27;
           D = Math.Sqrt(D);
           if (D > 0) vustf[iu] = Math.Sign((-q3 / 2 + D)) * Math.Pow(Math.Abs((-q3 / 2 + D)), 1.0 / 3.0) + Math.Sign((-q3 / 2 - D)) * Math.Pow(Math.Abs((-q3 / 2 - D)), 1.0 / 3.0) - b / (3 * a);
           if (D == 0)
              {
                 v1 = 2 * Math.Pow(-q3 / 2, 1.0 / 3.0) - b / (3 * a);
                 v2 = -Math.Pow(-q3 / 2, 1.0 / 3.0) - b / (3 * a);
                 if (v1 > 0) vustf[iu] = v1;
                 if (v2 > 0) vustf[iu] = v2;
              }
```

Определяем приращение скорости из следующих условий:

$$\text{если } V_{н} < V_{уст} < \Delta V > 0,$$

$$\text{если } V_{н} > V_{уст} > \Delta V < 0.$$

Здесь $V_{н}$ – скорость движения на начало шага расчета.

Приращение скорости движения на произвольном шаге расчета выбирается таким, чтобы приращение пути не превышало длину рассчитываемого элемента профиля.

Задаваясь значениями равнодействующих ускоряющих и замедляющих сил в зависимости от скорости движения и применяя все вышеизложенные операции, находим время движения поезда и приращение пути в зависимости от скорости:

```
public double f(int rejim, double v, int m)
        {
            double a = 0;
            if (rejim == 0)
            { a = f0(v) - ic[m]; }
            else if (rejim == 1)
            { a = wox(v) + ic[m]; }
            else if (rejim == 2)
            { a = b0(v) + ic[m]; }
            return a;
        }
        public double f0(double v)
        { return fk(v) - wo(v); }
        public double fk(double v)
        {
            if (v <= 55) Fk = 392.0; else Fk
= Fkr * Vr / v;
            return (1000 * Fk) / ((P + Q) *
g);
        public double dlV(int mode, double
v0, int m)
        {
            double dv = 0;
            if (mode == 0)
            {
                if (v0 <= Vr) { dv = 10; }
                else { dv = 5; };
                if ((v0 < vustf[m]) && ((v0
+ dv) >= vustf[m])) dv = vustf[m] - v0;
                if (v0 == vustf[m]) dv = 0;
                if (v0 > vustf[m]) dv = -5;
                if ((v0 > vustf[m]) && ((v0
+ dv) <= vustf[m])) dv = vustf[m] - v0;
            }
            else if (mode == 1)
            {
                if (ic[m] >= 0) dv = -5;
else dv = 5;
                if ((v0 < vustw[m]) && ((v0
+ dv) >= vustw[m])) dv = vustw[m] - v0;
                if (v0 == vustw[m]) dv = 0;
                if (v0 > vustw[m]) dv = -5;
                if ((v0 > vustw[m]) && ((v0
+ dv) <= vustw[m])) dv = vustw[m] - v0;
            }
            else
            {
                if (v0 > 10) dv = -10;
                else dv = -v0;
            }
            return dv;
        }
        public double delt(int mode, double
v0, int m, double dv)
        {
            v0r = v0 + dv / 2;
            double ff = f(mode, v0r, m);
            double dt = Math.Abs(dv / (2 *
ff));
            return dt;
        }
```

От тормозных средств поезда, создающих тормозные силы, зависит уровень безопасности движения. Для прицельной остановки поезда на станции строится кривая замедления методом «обратного счета» из координаты, соответствующей точке остановки поезда. При расчете кривой движения поезда на каждом шаге расчета проводится сравнение текущей координаты с координатой кривой замедления, соответствующей скорости движения в конце текущего шага расчета. В случае превышения текущей координаты над координатой кривой замедления происходит переход в режим торможения. За решение этой задачи отвечает следующий блок программной оболочки:

```
      if ((s > (sc[m] - 500)) && (m ==
(count - 1)) && (!torm))
                    {
```

```
                    double dv2 = 10.0, dv3 =
0.0;
                    double vrr = 0.0, dss22
= 0.0, dt3 = 0.0;
                    int vrr2 = 0;
                    bool dv2p = false, dv2m
= false, torm2 = false;
                    s = s - ds;
                    t = t - dt;
                dv22:
                    if (dv2 >= Math.Abs(dv))
{ dv2 = dv2 / 2; goto dv22; }
                    s2 = 0.0;
                    dv2 = Math.Sign(dv) *
Math.Abs(dv2);
                    dt2 = delt(mode, v0, m,
dv2);
                    ds22 = (16.7 * (v0 + dv2
/ 2) * dt2);
                    if ((s + ds22) >= sc[m])
{ dv2 = dv2 / 2; goto dv22; }
                    if (!torm2) { dv3 = dv2
/ 2; torm2 = true; }
                    vrr = v0 + dv2;
                    vrr2 = (int)(vrr /
10.0);
                    for (int ii = 0; ii <
vrr2; ii++)
                    {
                        dt3 = delt(2, (vrr -
ii * 10.0), m, -10.0);
                        dss22 = 16.7 * (vrr
- ii * 10 - 5) * dt3;
                        s2 += dss22;
                    }
                    dt3 = delt(2, (vrr -
vrr2 * 10.0), m, -(vrr - vrr2 * 10.0));
                    dss22 = 16.7 * ((vrr -
vrr2 * 10.0) / 2) * dt3;
                    s2 += dss22;
                    if ((s2 > (sc[m]
- s - ds22)) && (Math.Abs(dv3) >
0.000000000000001))
                    {
                        if (!dv2m) dv3 = dv3
/ 2;
                        dv2 = dv2 - dv3;
                        dv2m = true; dv2p =
false;
                        goto dv22;
                    }
                    if ((s2 < (sc[m]
- s - ds22)) && (Math.Abs(dv3) >
0.000000000000001))
                    {
                        if (!dv2p) dv3 = dv3
/ 2;
                        dv2 = dv2 + dv3;
                        dv2p = true; dv2m =
false;
                        goto dv22;
                    }
                    if ((Math.Abs(dv2) >
Math.Abs(dv)) && ((s + ds) < sc[m]))
                    {
                        s = s + ds;
                        t = t + dt;
                    }
                    else
                    {
                        s = s + ds22;
                        t = t + dt2;
                    }
```

Для ввода необходимых исходных данных и команды для выполнения программы будут применены графические интерфейсы (рис. 2, 3).

Результаты тяговых расчетов (рис. 4) могут быть представлены в виде таблиц (например, скорости и времени движения), отдельных зна-

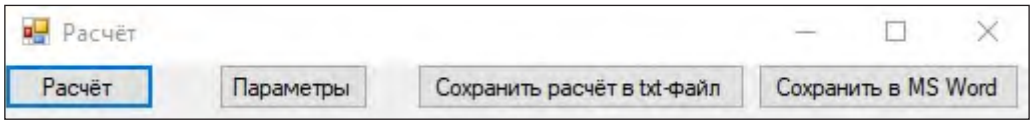


Рис. 2. Графический интерфейс для выполнения команд

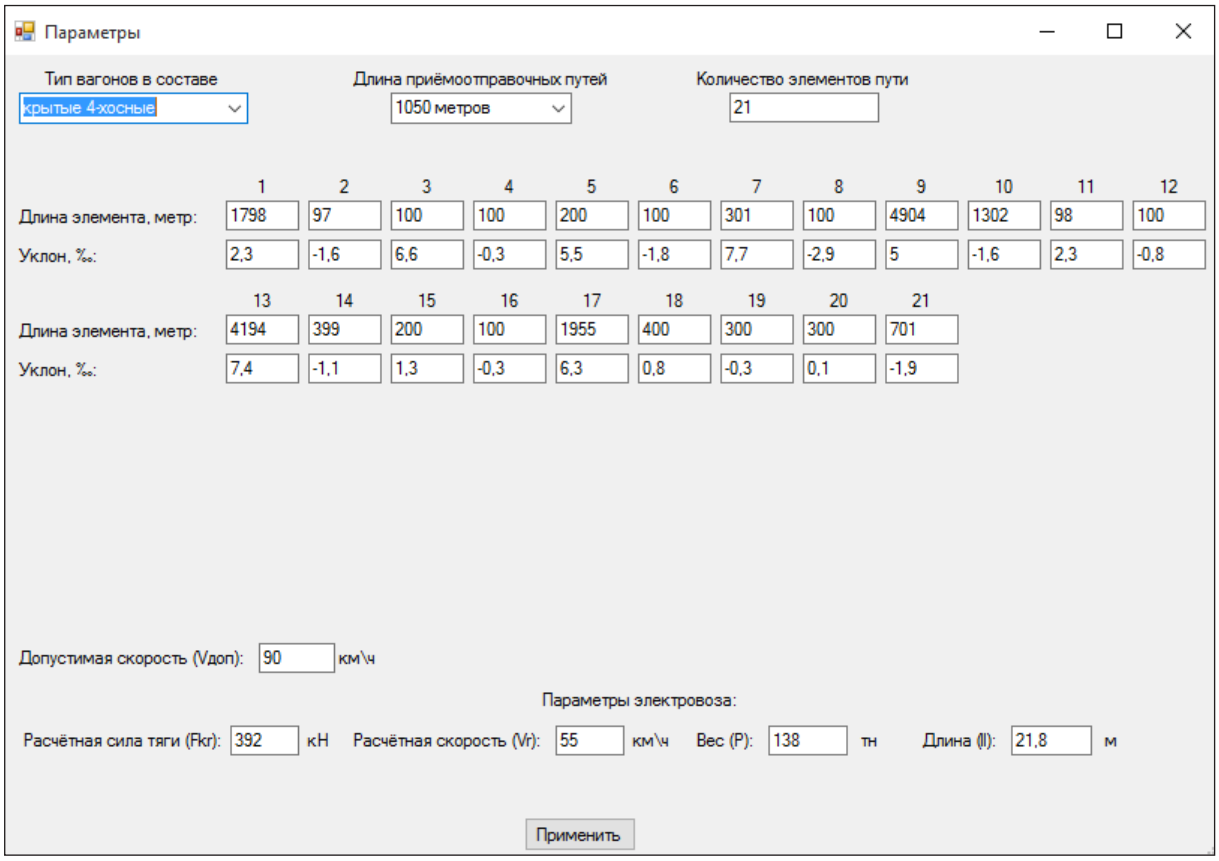


Рис. 3. Диалоговое окно для ввода исходных данных

чений (масса поезда, ускоряющие силы) или же графических зависимостей (значения скорости, времени движения в функции пути и т. д.). Расчеты были проведены для электровоза «O'zbekiston» на участке станция Алтыарык – станция Маргелан с грузовым поездом массой 3800 т.

Таким образом, установлено, что предложенный метод выполнения тяговых расчетов в отличие от существующих позволяет автоматизировать решение задач для условий выбора режимов движения на полигоне узбекских железных дорог, определения ускоряющих и замедляющих сил, а также режимов разгона и торможения поезда.

Библиографический список

1. Осипов С. И. Основы тяги поездов: учебник для студентов техникумов и колледжей ж.-д. транспорта / С. И. Осипов, С. С. Осипов. – М.: УМК МПС России, 2000. – 592 с.

2. Баранов Л. А. Микропроцессорные системы автоведения электроподвижного состава / Л. А. Баранов, Я. М. Головичер, Е. В. Ерофеев, В. М. Максимов; под ред. Л. А. Баранова. –М.: Транспорт, 1990. – 272 с.

3. Донской А. Л. Автоматизированные системы управления для тягового подвижного состава / А. Л. Донской // Наука и транспорт. – 2008. – № 3. – С. 20–21.

4. Ерофеев Е. В. Оптимизация программ движения поездов / Е. В. Ерофеев, И. С. Мостов // Труды МИИТ. –1977. – Вып. 550. – С. 121–125.

5. Бабичков А. М. Тяга поездов и применение специализированных электронных вычислительных машин для тяговых расчетов / А. М. Бабичков, В. Ф. Егорченко. – М.: Трансжелдориздат, 1962. – 263 с.

6. Баранов Л. А. Оптимизация управления движением поездов: учеб. пособие / Л. А. Баранов, Е. В. Ерофеев, И. С. Мелешин, Л. М. Чинь; под ред. Л. А. Баранова. – М.: МИИТ, 2011. – 164 с.

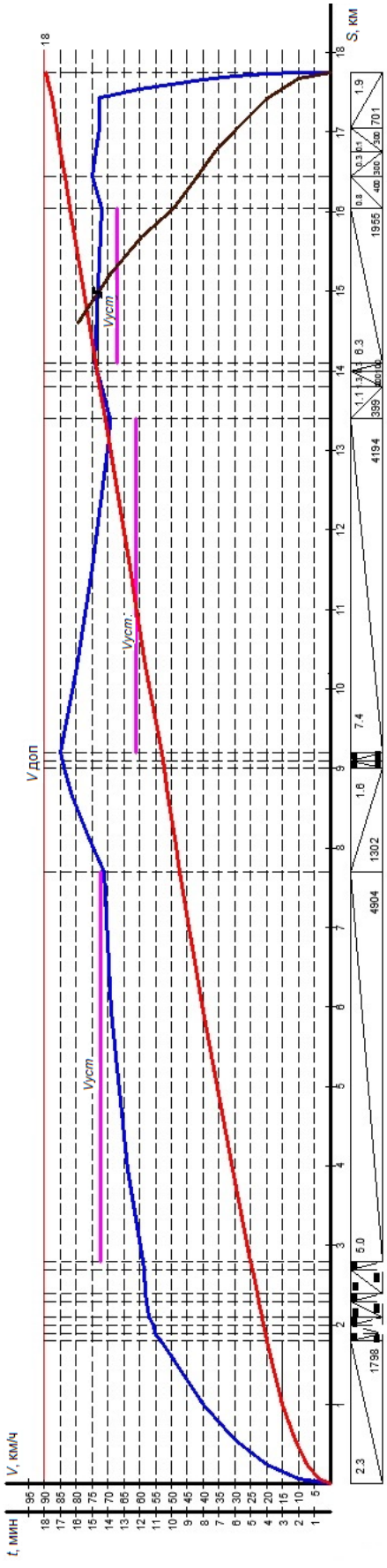


Рис. 4. Результаты тяговых расчетов

7. Бабичков А. М. Тяга поездов и тяговые расчеты / А. М. Бабичков, И. А. Турский, А. П. Новиков. – М.: Транспорт, 1971. – 280 с.

8. Деев В. В. Тяга поездов: учеб. пособие / В. В. Деев, Г. А. Ильин, Г. С. Афонин; под ред. В. В. Деева. – М.: Транспорт, 1987. – 264 с.

9. Правила тяговых расчетов для поездной работы. – М.: Транспорт, 1985. – 287 с.

10. Бегагоин Э. И. Теория тяги поездов: курс лекций / Э. И. Бегагоин, В. А. Тихонов. – Екатеринбург: Изд-во Урал. гос. ун-та путей сообщения, 2014. – 97 с.

Дата поступления: 28.09.2021
Решение о публикации: 28.10.2021

Контактная информация:
ЛЕСОВ Алтынбек Талгат угли – аспирант; altin_goal91@mail.ru
ИВАЩЕНКО Валерий Олегович – канд. техн. наук, доц.; vio1313@mail.ru

Energy optimization of train movement modes in the language of C # program

A. T. ugli Lesov, V. O. Ivaschenko

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

For citation: Lesov A. T. ugli, Ivaschenko V. O. Energy optimization of train movement modes in the language of C # program. *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2021, vol. 18, iss. 4, pp. 480–490. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2021-4-480-490

Summary

Objective: Analysis of existing methods for finding optimal modes of handling trains on the training ground of Uzbek railways to optimize the use of electrical energy within the train schedule and its optimization in terms of minimizing electricity consumption. Traction calculations are an important part of the science of train traction, one of the main activities carried out for the organization of train operation and the design of railway lines. The methods of traction calculations include a set of methods and techniques for determining the mass of the train, the speed of movement and section time taken, the fuel and electricity consumption for traction, and the solution of braking problems. **Methods:** The method of choosing the trajectory of the train movement provides for the calculation in the form of blocks with the initial data of the train parameters and takes into account two problems of solving the train motion equation. **Results:** Based on the developed computer shell for performing traction calculations, a graphical dependence of the speed of an electric locomotive on the distance covered (energy-optimal curves of train movement) on the section Altyaryk station – Margelan station was built. **Practical importance:** The described calculation methodology with the use of computer shell blocks makes it possible to significantly simplify and speed up the traction calculations, ensure high accuracy of the results and present them in a convenient and graphic form.

Keywords: Traction calculation, train movement schedule, resistance to train movement, braking, resulting force, traction effort.

References

1. Osipov S. I. & Osipov S. S. *Osnovy tyagi poyezdov*. Uchebnik dlya studentov tekhnikumov i kolledzhey zh.-d. transporta [*Fundamentals of hauling operations*. Textbook for students of technical schools and colleges of railway transport]. Moscow, UMK MPS Rossii Publ., 2000, 592 p. (In Russian)

2. Baranov L. A., Golovicher Ya. M., Erofeev E. V. & Maksimov V. M. *Mikroprotsessornyye sistemy avtovedeniya elektropodvizhnogo sostava* [*Microprocessor systems for automatic handling of electric rolling stock*]. Ed. by L. A. Baranov. Moscow, Transport Publ., 1990, 272 p. (In Russian)

3. Donskoy A. L. Avtomatizirovannyye sistemy upravleniya dlya tyagovogo podvizhnogo sostava [Automated control systems for traction rolling stock]. *Nauka i transport* [*Science and transport*], 2008, no. 3, pp. 20–21. (In Russian)

4. Erofeev E. V. & Mostov I. S. Optimizatsiya programm dvizheniya poyezdov [Optimization of train traffic programs]. *Trudy MIIT* [*Proceedings of Russian University of Transport*], 1977, iss. 550, pp. 121–125. (In Russian)

5. Babichkov A. M. & Egorchenko V. F. *Tyaga poyezdov i primeneniye spetsializirovannykh elektronnykh vychislitel'nykh mashin dlya tyagovykh raschetov* [*Hauling operations and the use of specialized electronic computers for grade computations*]. Moscow, Transzheldorizdat Publ., 1962, 263 p. (In Russian)

6. Baranov L. A., Erofeev E. V., Meleshin I. S. & Chin' L. M. *Optimizatsiya upravleniya dvizheniyem poyezdov*. Uchebnoye posobiye [*Optimization of train traffic*

control. Tutorial]. Ed. by L.A. Baranov. Moscow, MIIT [Russian University of Transport] Publ., 2011, 164 p. (In Russian)

7. Babichkov A.M., Tursky I.A. & Novikov A.P. *Tyaga poyezdov i tyagovyye raschety* [*Hauling operations and grade computations*]. Moscow, Transport Publ., 1971, 280 p. (In Russian)

8. Deev V.V., Ilyin G.A. & Afonin G.S. *Tyaga poyezdov*. Uchebnoye posobiye [*Hauling operations*. Tutorial]. Moscow, Transport Publ., 1987, 264 p. (In Russian)

9. *Pravila tyagovykh raschetov dlya poyezdnoy raboty* [*Grade computations rules for train operation*]. Moscow, Transport Publ., 1985, 287 p. (In Russian)

10. Begagoin E.I. & Tikhonov V.A. *Teoriya tyagi poyezdov*. Kurs lektsiy [*Theory of hauling operations*. Lecture course]. Yekaterinburg, UrGUPS [Ural State University of Railway Transport) Publ., 2014, 97 p. (In Russian)

Received: September 28, 2021
Accepted: October 28, 2021

Author's information:
Altynbek T. ugli LESOV – Graduate Student; altin_goal91@mail.ru
Valery O. IVASHCHENKO – PhD in Engineering, Associate Professor; vio1313@mail.ru

УДК 625.033.34

Исследование логистической цепи доставки груза в условиях выбора транспортно-экспедиторской компании

Г. И. Никифорова

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

Для цитирования: *Никифорова Г. И.* Исследование логистической цепи доставки груза в условиях выбора транспортно-экспедиторской компании // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2021. – Т. 18. – Вып. 4. – С. 491–498.
DOI: 10.20295/1815-588X-2021-4-491-498

Аннотация

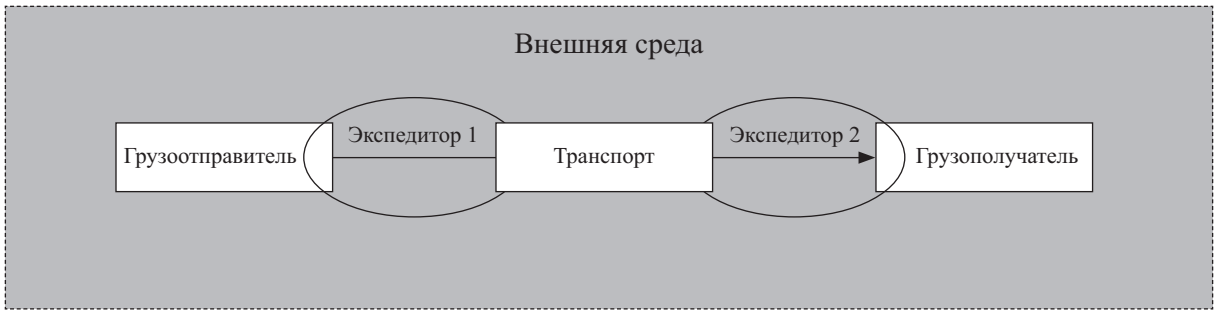
Цель: Выбор логистической и транспортно-экспедиторской компании грузовладельцем на начальном этапе планирования логистической цепи доставки груза. **Методы:** Применяются анализ логистической цепи доставки груза, методы развертывания функций качества при выборе транспортной компании и экспертного оценивания. **Результаты:** Представлены система традиционной и логистической моделей экспедирования, схема дифференциации требований грузовладельца, построена матрица развертывания функций качества, разработан пример экспертного оценивания параметра работы транспортно-логистической компании. **Практическая значимость:** Использование метода развертывания функций качества позволяет перевести запросы грузовладельца в технические условия и требования. Оценена конкурентоспособность исследуемой транспортно-логистической компании.

Ключевые слова: Логистическая цепь, транспортно-логистическая компания, транспортно-экспедиционное обслуживание, модель экспедирования, метод развертывания функций качества, дом качества, экспертное оценивание.

В настоящее время работа транспортных экспедиторских и логистических предприятий предполагает координацию всех участников логистического процесса доставки груза и повышение качества предоставляемых услуг [1, 2]. В связи с этим целесообразно исследовать работу транспортной компании с позиции теории управления качеством и интегрировать данный компонент в логистическую цепь доставки груза [3–5]. Требования грузовладельца при выборе транспортно-логистического оператора на первом этапе можно дифференцировать на требования к информационному и материальному потокам в соответствии с принципами логистики [6, 7]. Проблема заключается в том, что часто грузовладелец не может в силу объективных причин перевести свои запросы к качеству предлагаемых услуг в технические условия и требования, это препятствует объективной оценке и выбору транспортно-логистической компании [8–10]. Применение методов развертывания функций качества и экспертного оценивания позволяет устранить такие препятствия, повысить уровень согласованности действий участников перевозочного процесса, перейти на следующий уровень качества услуг.

Понятие транспортной услуги подразумевает выполнение операций по договору перевозки и договору транспортной экспедиции. Дифференциация транспортной услуги по выполнению операций непосредственно при перевозке и в экспедиторском секторе не исключает комплексности услуги в целом, а именно соответствии качества предоставления общеуста-

а



б

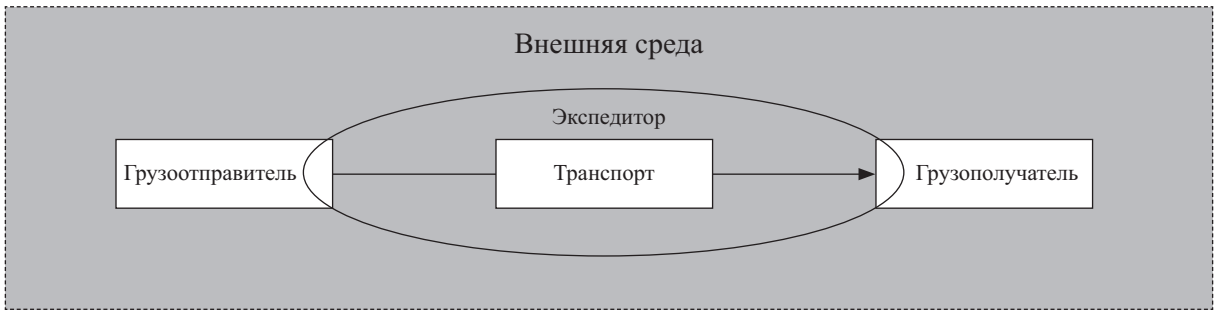


Рис. 1. Традиционная (*а*) и логистическая (*б*) модели экспедирования

новленным стандартам. Логистическая модель экспедирования отвечает требованиям современного грузовладельца, которому необходимо минимизировать денежные, временные и информационные затраты при организации перевозки своего груза (рис. 1).

Данной цели соответствуют общеизвестные логистические принципы организации перевозки грузов «точно в срок», «от двери до двери» и т. д. Поэтому и выбор транспортно-экспедиторской или транспортно-логистической компании для перевозки груза является важной задачей для эффективной организации перевозочного процесса. Конечно, такой выбор будет обусловлен конкретными условиями и требованиями грузовладельца к перевозке: регулярности поставок, географии перевозки, участию одного или нескольких видов транспорта, требованиям к подвижному составу, таре и упаковке груза и др. Однако целесообразно разделить такие требования на укрупненные группы, которые были бы универсальны для каждого грузовладельца. Из теории логистики известно, что существуют материальная и информационная подсистемы логистического процесса. Следовательно, и требования к транспортно-экспедиторскому обслуживанию можно разделить на две большие группы: требования к передаче материального грузопотока и требования к передаче информации (рис. 2).

Осуществить выбор транспортно-экспедиторской компании на основании определенного ряда характеристик можно разными способами: принятием решения менеджмента компании-грузовладельца, использованием метода экспертных оценок, применением закона Парето, с помощью факторного анализа и т. д. Согласно теории управления качеством, выбор со стороны грузовладельца транспортно-экспедиторской компании обусловлен следующим:

– ритмичность и своевременность перевозок;

– экономически обоснованная и приемлемая стоимость транспортно-экспедиторских услуг;

– затраты на возможные потери груза при перевозке, складировании, перегрузке, обслуживании не должны отражаться на экономиче-

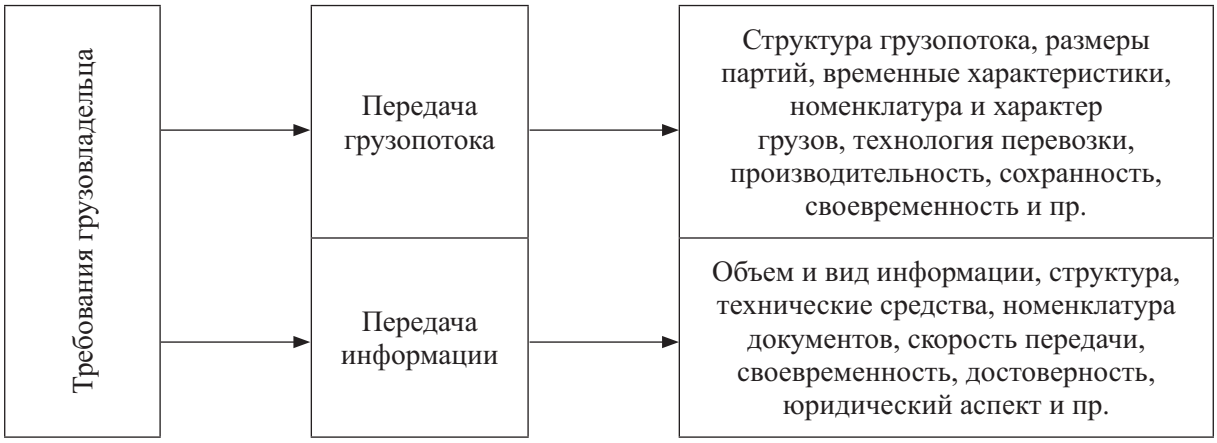


Рис. 2. Требования грузовладельцев при организации перевозки грузов

ском и конкурентоспособном состояниях грузовладельца;

– транспортно-экспедиторское обслуживание должно соответствовать договорным и техническим условиям;

– возможность гибкого подхода к выстраиваемой логистической цепи и т. д.

Выбор транспортно-экспедиторской компании, форм и методов взаимодействия зависят от результатов деятельности этой компании, ее базовых ресурсов (терминалов, грузового оборудования, парка транспортных средств, информационного обеспечения, численности и квалификации персонала и пр.), позиции компании на рынке и в конкурентной среде.

Остановимся подробнее на методике выбора транспортно-экспедиторской компании методом развертывания функции качества и с использованием экспертного метода измерения показателей качества. Метод развертывания функции качества (Quality Function Deployment – QFD) интересен в рамках данного исследования (см. рис. 1), так как подразумевает возможность преобразования пожеланий или запросов потребителя (грузовладельца) в технические требования к услугам, продукции и параметрам процессов их производства. Он служит своеобразным «переводчиком» запросов заказчика к исполнителю. Базовая матрица QFD соотносит пожелания грузовладельца с соответствующими техническими и эксплуатационными возможностями транспортно-экспедиторского предприятия. Пример базовой матрицы представлен на рис. 3.

В условиях конкурентной среды на транспортном рынке при выборе транспортно-экспедиционной компании можно добавить оценку значимости конкурентоспособности, а для технических требований выстроить дополнительно матрицу корреляции. Построение итоговой матрицы происходит поэтапно:

– выявление запросов и пожеланий потребителей транспортно-экспедиционных услуг;

– определение технических характеристик;

– перевод пожеланий потребителей услуг в конкретные технические условия и характеристики;

– оценка аналогичных услуг конкурентных транспортно-экспедиционных компаний;

– оценка технических условий и характеристик и развитие целей;

– установление технических характеристик, подлежащих совершенствованию.

На первом этапе грузовладелец/потребитель транспортно-экспедиционных услуг представляет пожелания и запросы. На втором этапе составляется перечень технических характеристик и параметров, которые должны удовлетворять запросы потребителя транспортно-экспедиционных услуг. При этом важно, чтобы эти параметры были измеряемыми, что необходимо для оценки результатов предоставления

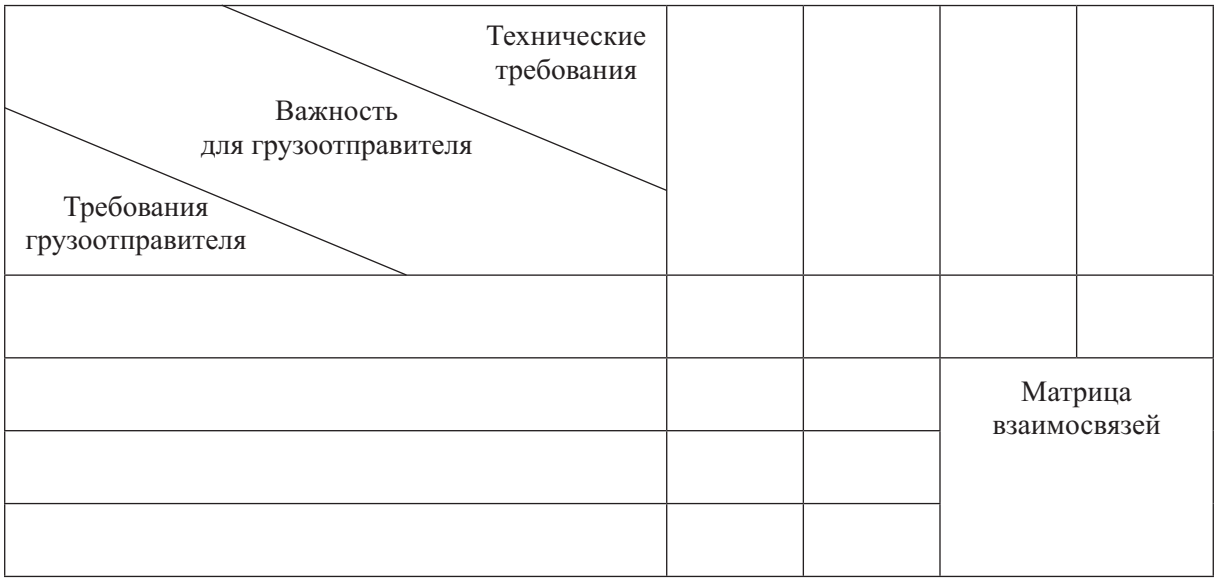


Рис. 3. Базовая матрица QFD для грузоотправителя

услуги поставленным целям. Для конкретных условий это могут быть сохранность перевозки, скорость доставки, периодичность отправлений грузов, стоимость перевозки и т. д. Итоговая матрица внешне похожа на дом, вследствие чего часто в литературе упоминается название «дом качества». Крыша «дома качества» показывает связи между каждой парой запросов заказчика и техническими параметрами. Как правило, для обозначения степени корреляции между запросом и требованием используются символы. Следующий этап построения итоговой матрицы подразумевает перевод запросов потребителей услуг в технические параметры и определение, какие параметры могут удовлетворить запросы. Ранжирование запросов потребителей услуг и оценка услуг базовой (*X*) и конкурентных (*Y*, *Z*) компаний производится на этапе построения «дома качества». Оценка уровня предоставления услуг конкурентов позволяет перейти к развитию целей, установить направления совершенствования. Пример построения «дома качества» представлен на рис. 4.

Остановимся подробнее на оценке уровня качества предоставляемых транспортно-логистических услуг в конкурентных компаниях. Для объективной оценки целесообразно привлечение экспертов. При этом при работе команды экспертов можно определить уровень согласованности их мнений, что повысит объективность результатов. Процедура получения экспертных оценок проходит в несколько этапов:

– организация и проведение опроса;

– обработка результатов опроса и получение оценок весомости;

– анализ результатов;

– выбор транспортно-экспедиторской компании.

При использовании экспертного метода для оценки качества часто применяется шкала порядка или ранжированный ряд. При построении шкалы порядка эксперты используют метод попарного сопоставления: это результат работы одного эксперта, оценивающего объекты определенным образом. Предпочтение одного объекта перед другим обозначается 1, обратная ситуация – 0.

Предположим, что перед экспертом стоит задача выбора транспортно-логистической компании из возможных *X*, *Y* и *Z* (рис. 4). Эксперт попарно сравнивает компании. Если, например, при сравнении *X* и *Y* компании выигрывает компания под номером *X*, то в строке напротив нее в столбце сравнения с компанией *Y* ставится циф-

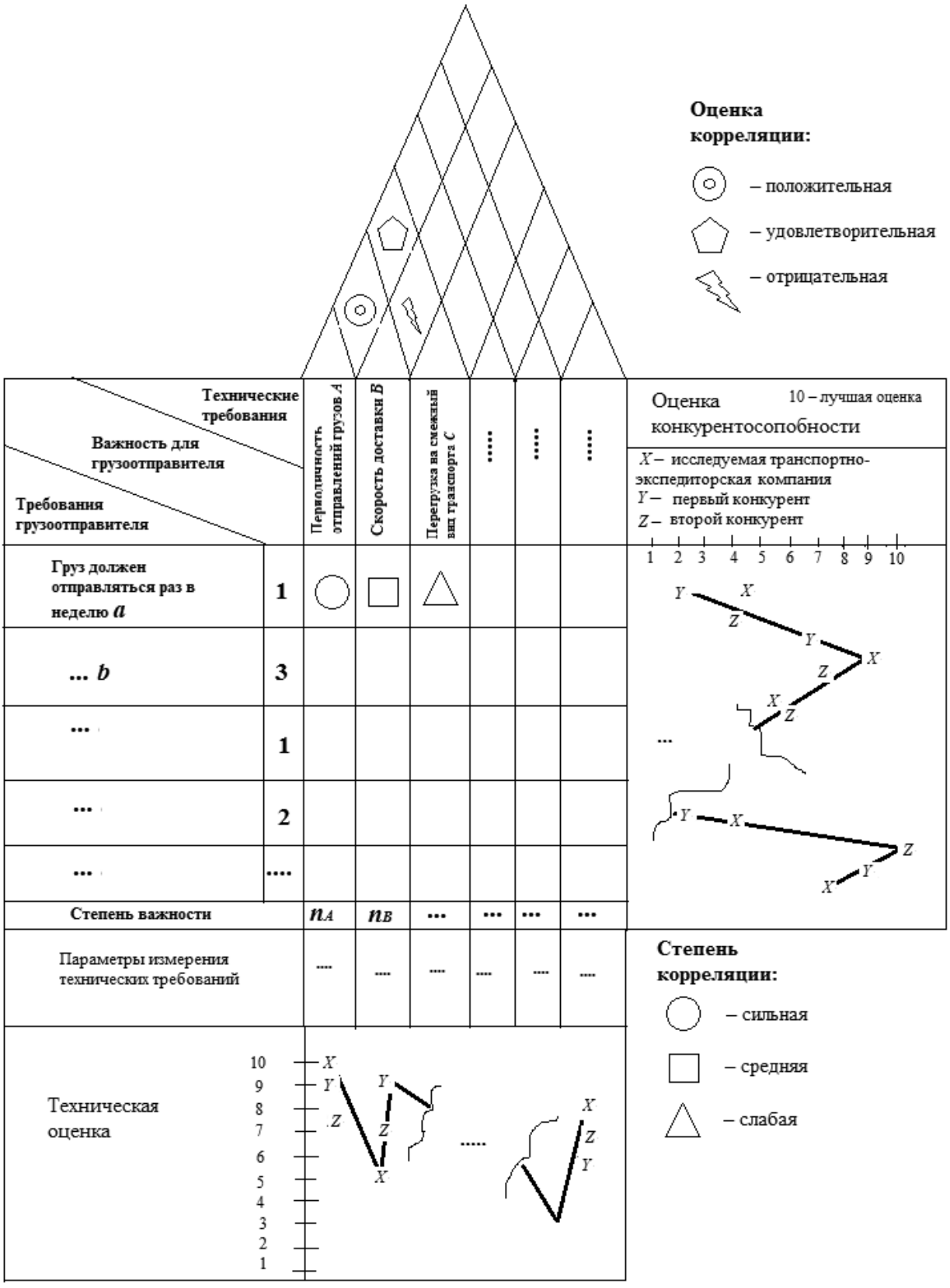


Рис. 4. Дом качества

Пример экспертного оценивания транспортно-логистической компании

Транспортно-логистическая компания	*X*	*Y*	*Z*	Оценка
X	–	1	1	2
Y	0	–	0	0
Z	0	1	–	1

ра 1, в обратном случае – 0 (таблица). В рассматриваемом примере, очевидно, что компания *X* имеет преимущество в 2 балла перед конкурентами *Z* (1 балл) и *Y* (2 балла). Таким образом, по конкретному исследуемому параметру можно сделать вывод о предпочтении той или иной компании.

Применение методов из теории управления качеством позволяет не только повысить уровень конкурентоспособности, но и проанализировать «слабые» места в работе предприятия, наметить и организовать пути совершенствования, что в конечном итоге положительно повлияет на доходность компании.

Библиографический список

1. Покровская О. Д. Международная логистика Транссибирской магистрали: использование транзитного потенциала России / О. Д. Покровская, В. М. Самуйлов // Инновационный транспорт. – 2016. – № 3 (21). – С. 3–7.

2. Титова Т. С. Междисциплинарное положение теории терминалистики / Т. С. Титова, О. Д. Покровская // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2018. – Т. 15. – Вып. 2. – С. 248–260.

3. Никифорова Г. И. Построение дескриптивной модели логистической цепи доставки грузов при взаимодействии железнодорожного и морского транспорта / Г. И. Никифорова // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2020. – Т. 17. – Вып. 4. – С. 545–551.

4. Салимова Т. А. Управление качеством: учебник по специальности «Менеджмент организации» / Т. А. Салимова. – М.: Омега-Л, 2013. – 376 с.

5. Стерлигова А. Н. Управление запасами в цепях поставок: учебник / А. Н. Стерлигова. – М.: ИНФРА-М, 2013. – 430 с.

6. Кизляк О. П. Исследование информационной и материальной подсистем логистической цепи доставки внешнеторговых грузов / О. П. Кизляк, Г. И. Никифорова, Т. Г. Сергеева // Вестник транспорта Поволжья. – 2019. – № 6 (78). – С. 55–61.

7. Маликов О. Б. Классификация, иерархия и идентификация объектов терминальноскладской инфраструктуры / О. Б. Маликов, О. Д. Покровская // Транспорт: наука, техника, управление. – 2017. – № 8. – С. 13–21.

8. Маликов О. Б. Деловая логистика / О. Б. Маликов. – СПб.: Политехника, 2003. – 223 с.

9. Сергеева Т. Г. Повышение конкурентоспособности транспортно-логистических компаний в условиях цифровизации / Т. Г. Сергеева, Г. И. Никифорова // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2020. – Т. 17. – Вып. 4. – С. 428–436.

10. Сергеева Т. Г. Совершенствование управления парком приватных вагонов / Т. Г. Сергеева // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2019. – Т. 16. – Вып. 3. – С. 449–454.

Дата поступления: 30.09.2021
Решение о публикации: 17.10.2021

Контактная информация:
НИКИФОРОВА Гузель Ислямовна – канд. техн. наук, доц.; guzel.spb@mail.ru

Investigation of the logistics chain of cargo delivery in the context of choosing a freight forwarding company

G.I. Nikiforova

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

For citation: Nikiforova G.I. Investigation of the logistics chain of cargo delivery in the context of choosing a freight forwarding company. *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2021, vol. 18, iss. 4, pp. 491–498. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2021-4-491-498

Summary

Objective: The choice of a logistics and freight-forwarding company by the cargo owner at the initial stage of planning the logistics chain of cargo delivery. **Methods:** The analysis of the logistics chain of cargo delivery, methods of deploying quality functions when choosing a transport company and expert assessment are applied. **Results:** A system of traditional and logistic models of forwarding, a scheme for differentiating the requirements of a cargo owner is presented, a matrix for the deployment of quality functions is built, an example of expert assessment of the parameter of a transport and logistics company is developed. **Practical importance:** Using the quality function deployment method makes it possible to translate the cargo owner's requests into specifications and requirements. The competitiveness of the given transport and logistics company is assessed.

Keywords: Logistic chain, transport and logistics company, transport and forwarding services, forwarding model, method of deployment of quality functions, quality house, expert assessment.

References

1. Pokrovskaya O.D. & Samuylov V.M. Mezhdunarodnaya logistika Transsibirskoy magistrali: ispol'zovaniye tranzitnogo potentsiala Rossii [International logistics of the Trans-Siberian Railway: the use of the transit potential of Russia]. *Innovatsionnyy transport* [*Innovative transport*], 2016, no. 3 (21), pp. 3–7. (In Russian)

2. Titova T.S. & Pokrovskaya O.D. Mezhdistsiplinarnoye polozheniye teorii terminalistiki [Interdisciplinary position of the theory of terminology]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [*Proceedings of Petersburg State Transport University*], 2018, vol. 15, iss. 2, pp. 248–260. (In Russian)

3. Nikiforova G.I. Postroyeniye deskriptivnoy modeli logisticheskoy tsepi dostavki gruzov pri vzaimodeystvii zheleznodorozhnogo i morskogo transporta [Construction of a descriptive model of the logistics chain for the delivery of goods in the interaction of rail and sea transport]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [*Proceedings of Petersburg State Transport University*], 2020, vol. 17, iss. 4, pp. 545–551. (In Russian)

4. Salimova T.A. *Upravleniye kachestvom*. Uchebnik po spetsial'nosti "Menedzhment organizatsii" [*Quality Management*. Textbook for "Management of the organization" specialty]. Moscow, Omega-L Publ., 2013, 376 p. (In Russian)

5. Sterligova A.N. *Upravleniye zapasami v tsepyakh postavok*. Uchebnik [*Inventory management in supply chains*. Textbook]. Moscow, INFRA-M Publ., 2013, 430 p. (In Russian)

6. Kizlyak O.P., Nikiforova G.I. & Sergeeva T.G. Issledovaniye informatsionnoy i material'noy podsistem logisticheskoy tsepi dostavki vneshnetorgovykh gruzov [Research into information and material subsystems of the logistics chain of delivery of foreign trade cargo]. *Vestnik transporta Povolzh'ya* [*Transport Bulletin of the Volga region*], 2019, no. 6 (78), pp. 55–61. (In Russian)

7. Malikov O.B. & Pokrovskaya O.D. Klassifikatsiia, ierarkhiia i identifikatsiia ob'ektov terminal'no-skladskoi infrastruktury [Classification, hierarchy and identi-

fication of terminal and warehousing infrastructure objects]. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie* [*Transport: science, engineering, management*], 2017, no. 8, pp. 13–21. (In Russian)

8. Malikov O. B. *Delovaya logistika* [*Business logistics*]. Saint Petersburg, Politekhnika Publ., 2003, 223 p. (In Russian)

9. Sergeeva T. G. & Nikiforova G. I. Povysheniye konkurentosposobnosti transportno-logisticheskikh kompaniy v usloviyakh tsifrovizatsii [Competitive recovery of transport and logistics companies in the era of digitization]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [*Proceedings of Petersburg State Transport University*], 2020, vol. 17, iss. 4, pp. 428–436. (In Russian)

10. Sergeeva T. G. Sovershenstvovaniye upravleniya parkom privatnykh vagonov [Improvement of private wagon fleet management]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [*Proceedings of Petersburg State Transport University*], 2019, vol. 16, iss. 3, pp. 449–454. (In Russian)

Received: September 30, 2021
Accepted: October 17, 2021

Author's information:
Guzel I. NIKIFOROVA – PhD in Engineering, Associate Professor; guzel.spb@mail.ru

УДК 629.4.077

Оптимизация систем управления пригородных электропоездов

А. И. Чудаков, В. О. Иващенко, А. П. Зеленченко, Н. В. Лысов

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

Для цитирования: *Чудаков А. И., Иващенко В. О., Зеленченко А. П., Лысов Н. В.* Оптимизация систем управления пригородных электропоездов // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2021. – Т. 18. – Вып. 4. – С. 499–506.
DOI: 10.20295/1815-588X-2021-4-499-506

Аннотация

Цель: Рассматривается использование импульсного преобразования электроэнергии на тяговом подвижном составе постоянного тока. **Методы:** Описан вариант системы регулирования режимов работы тяговых электродвигателей пригородных электропоездов с помощью импульсного преобразователя на базе биполярных транзисторов с изолированным затвором (IGBT). **Результаты:** Предлагаемая система импульсного регулирования представлена как возможный вариант модернизации применяемых систем управления, позволяющей улучшение тягово-энергетических показателей пригородных электропоездов. Показаны преимущества импульсных преобразователей на базе IGBT в сравнении с преобразователями на одно- и двухоперационных тиристорах. Приведена упрощенная электрическая схема силовой цепи моторного вагона с импульсным преобразователем, дано описание работы силовой цепи в режиме тяги и в режимах реостатного и рекуперативного торможения. **Практическая значимость:** Представленные результаты технико-экономического сравнения систем управления электропоезда ЭД4М с контакторно-реостатной системой регулирования и электропоезда с регулированием режимов работы тяговых электродвигателей импульсным преобразователем на базе IGBT доказывают лучшую энергоэффективность электропоезда, оборудованного системой импульсного регулирования.

Ключевые слова: Импульсное регулирование напряжения на тяговых электродвигателях, IGBT-транзисторы, электроподвижной состав, плавное регулирование силы тяги, расширение диапазона рекуперативного торможения.

В настоящее время в пригородном движении эксплуатируется значительное число электропоездов с контакторно-реостатной системой управления. Однако эта система имеет ряд недостатков, среди которых основными являются:

– значительные потери энергии в пусковых резисторах при пуске;

– ступенчатое регулирование тока тяговых электродвигателей (ТЭД) предопределяет недоиспользование тягово-тормозных возможностей подвижного состава;

– ограниченный 50 км/ч нижний предел окончания рекуперативного торможения;

– применение нескольких группировок ТЭД усложняет силовую схему и снижает ее надежность.

Перечисленные недостатки устраняются импульсным управлением, которое обеспечивает плавную регулировку напряжения, приложенного к ТЭД, и магнитного потока ТЭД, что делает более совершенным и простым управление скоростью электроподвижного состава (ЭПС),

упрощает автоматизацию ведения поездов, расширяет диапазон использования рекуперативного торможения.

Кроме устранения недостатков контакторно-реостатной системы управления ЭПС, импульсное управление обладает некоторыми преимуществами [1–4]:

– разгрузка контактной сети и снижение потерь в системе тягового энергоснабжения за счет уменьшения тока, потребляемого из контактной сети при пуске;

– повышение тяговых и тормозных свойств ЭПС благодаря приближению силы тяги и тормозной силы электродинамического торможения к ограничению по сцеплению колес с рельсами;

– понижение затрат на обслуживание электрооборудования в результате меньшего количества контакторного оборудования;

– повышение надежности ТЭД из-за наличия входного индуктивно-емкостного фильтра;

– снижение скорости окончания рекуперативного торможения при использовании импульсной рекуперации;

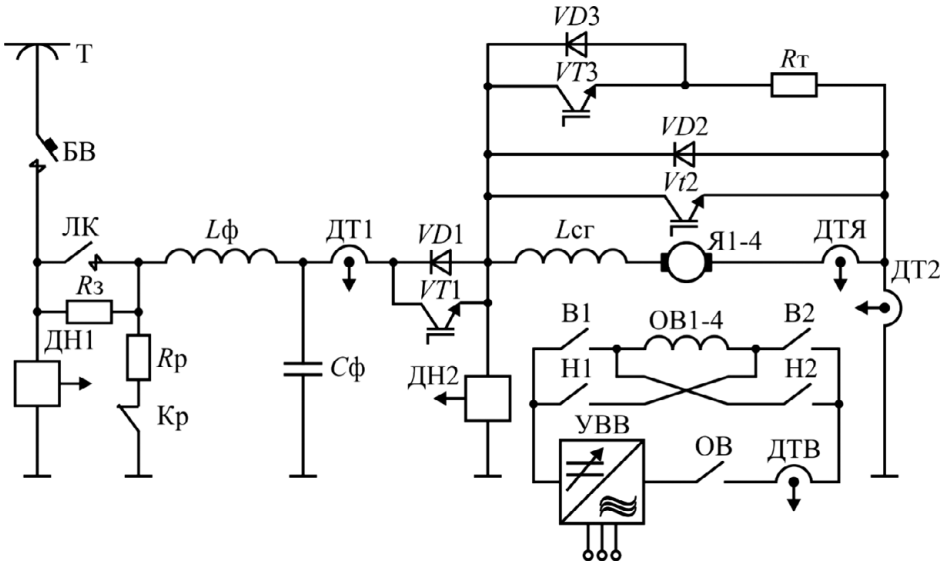
– совершенствование автоматизации управления ЭПС за счет наличия быстродействующего полупроводникового регулятора;

– совершенствование системы защиты ТЭД от перегрузок и коротких замыканий с помощью быстродействующего импульсного преобразователя.

Импульсное регулирование применялось на пригородных электропоездах ЭР2 И, ЭР12, в системах управления которых использовались импульсные преобразователи на однооперационных тиристорах. Запирание последних происходит благодаря устройствам коммутации, что усложняло конструкцию преобразователей.

В начале 1990-х годов началось бурное развитие преобразовательной техники на основе биполярных транзистороов с изолированным затвором (IGBT) в системах управления подвижного состава [5–10]. В Европе IGBT-преобразователи были впервые разработаны и изготовлены компанией Siemens в 1992 г. для трамвайных вагонов во Франкфурте-на-Майне.

Такие преобразователи выгодно отличаются двумя особенностями, которые важны как для железных дорог, так и для производителей. Первая особенность заключалась в том, что эти устройства создают потенциальные возможности для снижения затрат, в основном из-за более высокой эффективности систем управления. Вторая особенность, которая способствовала быстрому внедрению данного оборудования, – это повышенная надежность систем [11–15] управления тяговым подвижным составом.



Упрощенная принципиальная электрическая схема силовой цепи моторного вагона

На кафедре «Электрическая тяга» Петербургского государственного университета путей сообщения выполнено эскизное проектирование системы импульсного регулирования напряжения на ТЭД пригородного электропоезда постоянного тока.

Упрощенная принципиальная электрическая схема силовой цепи моторного вагона представлена на рисунке. Тяговый преобразователь включает следующие модули, обеспечивающие:

• модуль 1 (*VT*1-*VD*1) – импульсное регулирование напряжения на ТЭД в режиме тяги. Кроме этого, диод *VD*1 выполняет функцию диода рекуперации;

• модуль 2 (*VT*2-*VD*2) – импульсную рекуперацию. Кроме этого, диод *VD*2 выполняет функцию обратного диода в режиме тяги;

• модуль 3 (*VT*3-*VD*3) – сброс излишней энергии при электродинамическом торможении на тормозной резистор *R*т.

Электрическая схема силовой цепи моторного вагона

Для сглаживания пульсаций тока контактной сети, неизбежно возникающих при импульсном регулировании, предусмотрен входной фильтр. Он состоит из дросселя *L*ф и конденсатора *C*ф. Предварительный заряд конденсатора *C*ф с ограничением величины тока обеспечивает резистор *R*з, который затем шунтируется линейным контактором ЛК. Реактор *L*сг обеспечивает сглаживание пульсаций тока ТЭД, резистор *R*р – разряд конденсатора фильтра после окончания работы схемы (размыкания контактора ЛК).

Электрооборудование моторного вагона от аварийных процессов защищает штатный быстродействующий выключатель БВ, дифференциальная защита обеспечивается с помощью сигналов датчиков тока ДТ1 и ДТ2.

Возбуждение ТЭД в режиме тяги и электродинамического торможения независимое с питанием обмоток возбуждения ТЭД ОВ1-4 от управляемого выпрямителя возбуждения УВВ. Его применение в режиме тяги позволит увеличить устойчивость схемы к разносному боксованию.

Реверсирование ТЭД осуществляется штатным реверсором, контакты которого обозначены на схеме В1-В2 и Н1-Н2.

Схема работает следующим образом. После поднятия токоприемника и возврата защиты силовых цепей заряжается конденсатор фильтра. После замыкания контактора ЛК схема готова к работе. В зависимости от направления движения или режима работы схемы (тяга/тормоз) реверсивный переключатель разворачивается в соответствующее положение. Подается питание на УВВ и замыкается контактор ОВ.

Режим тяги. Ток возбуждения растет до максимально возможного, определяемого типом ТЭД. Его значение контролируется системой управления по сигналу датчика тока возбуждения ДТВ. Включается в работу модуль 1 тягового преобразователя. Напряжение на ТЭД повышается посредством увеличения времени проводящего состояния транзистора *VT*1 с поддержанием тока якорей ТЭД на уровне, заданном машинистом. Его величина контролируется системой управления по сигналу датчика тока якоря ДТЯ. При достижении максимального значения коэффициента заполнения начинает снижаться ток возбуждения до минимально возможного, определяемого типом ТЭД. Ток якоря при этом остается на заданном уровне. После достижения током возбуждения минимального значения начинается понижение тока якоря. Причем соотношение тока возбуждения ТЭД и тока их якорей поддерживается на постоянном уровне посредством УВВ. Транзистор *VT*1 работает с максимальным коэффициентом заполнения, что позволяет защитить ТЭД от набросов напряжения контактной сети.

Режим рекуперации. После замыкания контактора ОВ увеличивается ток возбуждения. Транзистор *VT*1 закрыт, ток якорей протекает в контактную сеть через диод *VD*1. Ток якорей поддерживается на постоянном уровне, заданном машинистом, посредством регулирования тока возбуждения. При достижении током возбуждения максимально возможного значения

включается в работу модуль 2 тягового преобразователя. Транзистор *VT*2 периодически кратковременно закорачивает якоря ТЭД, а при его запирании происходит сброс накопленной энергии в контактную сеть. Реализуется режим импульсной рекуперации. Время проводящего состояния транзистора *VT*2 растет до максимально возможного. После этого система управления включает замещающий механический тормоз.

Режим рекуперативно-реостатного тормоза. Если в режиме рекуперации напряжение на якорях ТЭД достигает 3950 В, то по сигналу датчика напряжения ДН2 включается в работу модуль 3 тягового преобразователя. Транзистор *VT*3 осуществляет сброс излишней энергии на тормозной резистор *R*т. Система управления выбирает коэффициент заполнения этого модуля таким образом, чтобы поддерживать напряжение на якорях ТЭД на уровне 3950 В.

Таким образом, в дополнение к вышеперечисленным достоинствам импульсного регулирования напряжения на ТЭД можно добавить преимущества, характерные для предлагаемой схемы:

– бóльшая устойчивость к разносному боксованию в режиме тяги;

– защита ТЭД от бросков напряжения в контактной сети в режимах тяги и электродинамического торможения;

– возможность рекуперативного торможения практически до полной остановки.

Импульсное управление ЭПС может быть применено либо только для безреостатного пуска и электрического торможения, либо для регулирования всего процесса движения электропоезда. Наиболее полно тягово-эксплуатационные достоинства импульсного управления проявляются при втором варианте. Несмотря на все отмеченные выше преимущества импульсного управления, вопрос об экономической эффективности его применения для электропоездов может быть решен только на основании детального экономического исследования, так как стоимость таких электропоездов выше, чем с использованием контакторно-реостатной системы управления. Степень экономической эффективности импульсного управления ЭПС определяется соотношением между увеличением его стоимости и уменьшением затрат, обусловленным повышением скорости и понижением расхода энергии, благодаря устранению потерь в пусковых реостатах и сокращению тормозных потерь.

Было выполнено технико-экономическое сравнение систем управления электропоезда ЭД4М с контакторно-реостатной системой управления, состоящего из трех мотор-вагонных секций, и разработанного трехсекционного электропоезда с импульсной системой регулирования режимов работы ТЭД. Проведено сравнение следующих слагаемых общих расходов в расчете на 1 поездо-км:

– стоимости электропоезда;

– оплаты локомотивных бригад;

– стоимости электрической энергии;

– стоимости времени пассажиров.

Рассматриваемые расходы на 1 поездо-км определялись по формуле

$$C_{п\text{км}} = \left[\frac{C_п \cdot (P_{\text{эф}} + P_{\text{ам}}) \cdot k_{\text{v}}}{T_{\text{год}}} + \right. \\ \left. + c_{\text{бр}} + c_{\text{пас}} \cdot N_{\text{пас}} + P_{\text{сн}} \cdot c_{\text{э}} \right] \times \\ \times \frac{1}{v_{\text{уч}}} + A \cdot c_{\text{э}},$$

где $C_{п\text{км}}$ – зависящие от системы управления расходы на 1 поездо-км, руб./поездо-км; $P_{\text{эф}}$ – нормативный коэффициент эффективности капиталовложений; $P_{\text{ам}}$ – ежегодная доля амортизационных отчислений со стоимости электропоездов; $T_{\text{год}}$ – среднее годовое время работы электропоезда, ч; k_{v} – отношение участковой скорости к эксплуатационной; $c_{\text{бр}}$ – стоимость 1 ч работы поездной бригады, руб.; $c_{\text{пас}}$ – стоимость 1 ч пассажира во время поездки, руб.; $N_{\text{пас}}$ – среднее число пассажиров электропоезда; $P_{\text{сн}}$ – средняя мощность собственных нужд электропоезда, кВт; A – удельный расход электрической энергии на движение электропоезда, кВт·ч/поездо-км; $c_{\text{э}}$ – стоимость электрической энергии, подводимой к электропоезду, руб./кВт·ч; $v_{\text{уч}}$ – участковая скорость; $C_п$ – стоимость электропоезда, руб.

В процессе расчетов получены следующие значения составляющих расходов:

– при контакторно-реостатном управлении $C_{п\text{км}}$ = 838,4 руб./поездо-км;

– при импульсном преобразователе, включенном в течение всего времени работы тяговых двигателей, $C_{п\text{км}}$ = 834,8 руб./поездо-км.

Расходы, приходящиеся на 1 поездо-км пригородного сообщения, снижаются за счет:

• отсутствия потерь электроэнергии в пусковых резисторах;

• уменьшения потерь электроэнергии в контактной сети;

• расширения диапазона рекуперативного торможения.

Кроме того, с внедрением системы импульсного управления необходима автоматизация системы диагностики электрооборудования электропоезда, что, в свою очередь, позволит в будущем перейти к системе ремонта электропоездов по фактическому состоянию.

В результате проведенной работы было установлено, что:

1) улучшение тягово-энергетических показателей и повышение надежности пригородных электропоездов, оборудованных ТЭД постоянного тока, возможно за счет применения системы импульсного управления в режиме тяги и электрического торможения;

2) анализ опыта использования полупроводниковых преобразователей на электрическом подвижном составе показывает целесообразность внедрения в качестве элементов системы импульсного управления IGBT-транзисторов;

3) при модернизации электропоездов системой импульсного управления необходимо максимально использовать принцип конструктивной преемственности, в частности, следует рассмотреть возможность применения штатного возбудителя;

4) предлагаемый вариант модернизации силовых цепей электропоездов системой импульсного управления приведет к существенному снижению эксплуатационных расходов. Например, уменьшение расхода электроэнергии может достигать 10 %, а применение независимого возбуждения в режиме тяги позволит повысить реализуемые значения силы тяги на 8 –10 %.

Библиографический список

1. Evstaf'ev A. M. Energy converters for hybrid traction power systems used in electric transport / A. M. Evstaf'ev, V. V. Nikitin, S. A. Telichenko // Russ. Electr. Engin. – 2020. – Vol. 94. – P. 77–81.

2. Burkov A. T. Modern locomotive traction drive control systems / A. T. Burkov, O. S. Valinsky, A. M. Evstaf'ev et al. // Russ. Electr. Engin. – 2019. – Vol. 90. – P. 692–695.

3. Титова Т. С. Перспективы развития тягового подвижного состава. Ч. 1 / Т. С. Титова, А. М. Евстафьев, М. Ю. Изварин, А. Н. Сычугов // Транспорт Российской Федерации. – 2018. – № 6 (79). – С. 40–44.

4. Титова Т. С. Инновационные системы управления электрического подвижного состава / Т. С. Титова, А. М. Евстафьев // Железнодорожный транспорт. – 2017. – № 11. – С. 54–59.

5. Valinsky O. S. Modeling onboard energy storage systems for hybrid traction drives / O. S. Valinsky, T. S. Titova, V. V. Nikitin et al. // Russ. Electr. Engin. – 2020. – Vol. 91. – P. 604–608.

6. Valinsky O. S. The effectiveness of energy exchange processes in traction electric drives with onboard capacitive energy storages / O. S. Valinsky, A. M. Evstaf'ev, V. V. Nikitin // Russ. Electr. Engin. – 2018. – Vol. 89. – P. 566–570.

7. Titova T. S. The use of energy storages to increase the energy effectiveness of traction rolling stock / T. S. Titova, A. M. Evstaf'ev, V. V. Nikitin // Russ. Electr. Engin. – 2018. – Vol. 89. – P. 576–580.

8. Титова Т. С. Повышение энергетической эффективности локомотивов с накопителями энергии / Т. С. Титова, А. М. Евстафьев // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2017. – Т. 14. – Вып. 2. – С. 200–210.

9. Евстафьев А. М. Совершенствование системы электрического торможения электропоездов постоянного тока / А. М. Евстафьев, А. П. Зеленченко, В. М. Мищенко // Вестник транспорта Поволжья. – 2014. – № 4 (46). – С. 16–21.

10. Евстафьев А. М. Повышение энергетической эффективности рекуперативного торможения пригородных электропоездов постоянного тока / А. М. Евстафьев, А. П. Зеленченко, В. М. Мищенко // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2014. – Вып. 3 (40). – С. 63–69.

11. Zaitsev A. A. Intelligent technologies applied to increase the energy efficiency of electrified direct-current rolling stock / A. A. Zaitsev, A. M. Evstaf'ev, D. V. Pegov et al. // Russ. Electr. Engin. – 2017. – Vol. 88. – P. 676–680.

12. Евстафьев А. М. Выбор топологии схем тягового привода электрического подвижного состава / А. М. Евстафьев // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2010. – Вып. 3 (24). – С. 89–98.

13. Мазнев А. С. Полупроводниковые системы регулирования возбуждения тяговых электродвигателей электропоездов / А. С. Мазнев, А. М. Евстафьев, О. И. Шатнев // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2004. – Вып. 2. – С. 55–60.

14. Мазнев А. С. Особенности построения электронных систем управления тяговым приводом электрического подвижного состава постоянного тока / А. С. Мазнев, А. М. Евстафьев // Транспорт Урала. – 2008. – № 1 (16). – С. 53–56.

15. Мазнев А. С. Снижение расхода электроэнергии при пуске электропоезда постоянного тока / А. С. Мазнев, А. М. Евстафьев // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2008. – № 2. – С. 2–5.

Дата поступления: 18.10.2021
Решение о публикации: 28.10.2021

Контактная информация:
ЧУДАКОВ Александр Иванович – канд. техн. наук, доц.; 79213106222@yandex.ru
ИВАЩЕНКО Валерий Олегович – канд. техн. наук, доц.; vio1313@mail.ru
ЗЕЛЕНЧЕНКО Алексей Петрович – канд. техн. наук, доц.; v-zelenchenko46@mail.ru
ЛЫСОВ Николай Владимирович – канд. техн. наук, доц.; nikolay.lysov@siemens.com

Optimization of control systems for suburban trains

A. I. Chudakov, V. O. Ivashchenko, A. P. Zelenchenko, N. V. Lysov

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

For citation: Chudakov A. I., Ivashchenko V. O., Zelenchenko A. P., Lysov N. V. Optimization of control systems for suburban trains. *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2021, vol. 18, iss. 4, pp. 499–506. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2021-4-499-506

Summary

Objective: The use of pulse conversion of electricity on direct-current traction rolling stock is discussed. **Methods:** A variant of the system for regulating the operating modes of traction motors of suburban electric trains using a pulse converter based on insulated gate bipolar transistors is described. (IGBT). **Results:** The proposed impulse control system is presented as a possible option for the modernization of the applied control systems, which makes it possible to improve the traction and energy indicators of suburban electric trains. The advantages of pulse converters based on IGBTs are shown in comparison with converters based on one- and two-operation thyristors. A simplified electrical diagram of the power circuit of a motor car with a pulse converter is presented, a description of the operation of the power circuit in the traction mode and in the modes of rheostatic and regenerative braking is given. **Practical importance:** The presented results of the technical and economic comparison of the control systems of the ED4M electric train with a

contactor-rheostat control system and an electric train with regulation of the operating modes of traction electric motors by a pulse converter based on IGBT prove the best energy efficiency of an electric train equipped with a pulse control system.

Keywords: Pulse voltage regulation on traction motors, IGBT-transistors, electric rolling stock, smooth traction control, expansion of the regenerative braking range.

References

1. Evstaf'ev A. M., Nikitin V. V. & Telichenko S. A. Energy converters for hybrid traction power systems used in electric transport. *Russ. Electr. Engin.*, 2020, vol. 94, pp. 77–81.

2. Burkov A. T., Valinsky O. S., Evstaf'ev A. M. et al. Modern locomotive traction drive control systems. *Russ. Electr. Engin.*, 2019, vol. 90, pp. 692–695.

3. Titova T. S., Evstaf'yev A. M., Izvarin M. Yu. & Sychugov A. N. Perspektivy razvitiya tyagovogo podvizhnogo sostava. Ch. 1 [Prospects for the development of traction rolling stock. Pt 1]. *Transport Rossiyskoy Federatsii* [*Transport of the Russian Federation*], 2018, no. 6 (79), pp. 40–44. (In Russian)

4. Titova T. S. & Evstaf'ev A. M. Innovatsionnyye sistemy upravleniya elektricheskogo podvizhnogo sostava [Innovative control systems for electric rolling stock]. *Zheleznodorozhnyy transport* [*Railway transport*], 2017, no. 11, pp. 54–59. (In Russian)

5. Valinsky O. S., Titova T. S., Nikitin V. V. et al. Modeling onboard energy storage systems for hybrid traction drives. *Russ. Electr. Engin.*, 2020, vol. 91, pp. 604–608.

6. Valinsky O. S., Evstaf'ev A. M. & Nikitin V. V. The effectiveness of energy exchange processes in traction electric drives with onboard capacitive energy storages. *Russ. Electr. Engin.*, 2018, vol. 89, pp. 566–570.

7. Titova T. S., Evstaf'ev A. M. & Nikitin V. V. The use of energy storages to increase the energy effectiveness of traction rolling stock. *Russ. Electr. Engin.*, 2018, vol. 89, pp. 576–580.

8. Titova T. S. & Evstaf'ev A. M. Povysheniye energeticheskoy effektivnosti lokomotivov s nakopitelyami energii [Improving the energy efficiency of locomotives with energy storage systems]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [*Proceedings of Petersburg State Transport University*], 2017, vol. 14, iss. 2, pp. 200–210. (In Russian)

9. Evstaf'ev A. M., Zelenchenko A. P. & Mishchenko V. M. Sovershenstvovaniye sistemy elektricheskogo tormozheniya elektropoyezdov postoyannogo toka [Improvement of the electric braking system for DC electric trains]. *Vestnik transporta Povolzh'ya* [*Transport Bulletin of the Volga region*], 2014, no. 4 (46), pp. 16–21. (In Russian)

10. Evstaf'ev A. M., Zelenchenko A. P. & Mishchenko V. M. Povysheniye energeticheskoy effektivnosti rekuperativnogo tormozheniya prigorodnykh elektropoyezdov postoyannogo toka [Increasing the energy efficiency of regenerative braking of DC suburban trains]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [*Proceedings of Petersburg State Transport University*], 2014, iss. 3 (40), pp. 63–69. (In Russian)

11. Zaitsev A. A., Evstaf'ev A. M., Pegov D. V. et al. Intelligent technologies applied to increase the energy efficiency of electrified direct-current rolling stock. *Russ. Electr. Engin.*, 2017, vol. 88, pp. 676–680.

12. Evstaf'ev A. M. Choice of topology of traction drive circuits of the electric rolling stock. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [*Proceedings of Petersburg State Transport University*], 2010, iss. 3 (24), pp. 89–98. (In Russian)

13. Maznev A. S., Eevstaf'yev A. M. & Shatnev O. I. Poluprovodnikovyye sistemy regulirovaniya vozbuzhdeniya tyagovykh elektrodvigateley elektropoyezdov [Semiconductor systems for excitation control of traction electric motors of electric trains]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [*Proceedings of Petersburg State Transport University*], 2004, iss. 2, pp. 55–60. (In Russian)

14. Maznev A. S. & Eevstaf'yev A. M. Osobennosti postroyeniya elektronnykh sistem upravleniya tyagovym privodom elektricheskogo podvizhnogo sostava postoyannogo toka [Features of the construction of electronic control systems for traction drive of electric DC rolling stock]. *Transport Urala* [*Transport of the Urals*], 2008, no. 1 (16), pp. 53–56. (In Russian)

15. Maznev A. S. & Eevstaf'yev A. M. Snizheniye raskhoda elektroenergii pri puske elektropoyezda postoyannogo toka [Reducing electricity consumption when starting a DC electric train]. *Elektronika i elektrooborudovaniye transporta* [*Electronics and electrical equipment of transport*], 2008, no. 2, pp. 2–5. (In Russian)

Received: October 18, 2021
Accepted: October 28, 2021

Author's information:
Alexander I. CHUDAKOV – PhD in Engineering, Associate Professor; 79213106222@yandex.ru
Valery O. IVASHCHENKO – PhD in Engineering, Associate Professor; vio1313@mail.ru
Alexey P. ZELENCHENKO – PhD in Engineering, Associate Professor; v-zelenchenko46@mail.ru
Nikolay V. LYSOV – PhD in Engineering, Associate Professor; nikolay.lysov@siemens.com

УДК 629.488.2

Влияние погрешностей и ошибок измерения на частоту отцепок вагонов во внеплановый ремонт на железных дорогах Республики Узбекистан

А. Б. Гайипов

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

Для цитирования: *Гайипов А. Б.* Влияние погрешностей и ошибок измерения на частоту отцепок вагонов во внеплановый ремонт на железных дорогах Республики Узбекистан // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2021. – Т. 18. – Вып. 4. – С. 507–514. DOI: 10.20295/1815-588X-2021-4-507-514

Аннотация

Цель: Рассмотреть вопрос о влиянии погрешностей и ошибок измерения толщины гребня колесных пар на частоту отцепок во внеплановый ремонт на железных дорогах Республики Узбекистан. Провести анализ воздействия отцепок грузовых вагонов во внеплановый ремонт по неисправностям колесных пар. **Методы:** Использованы методы комбинаторного и статистического анализов исходных данных. **Результаты:** Выполнен детальный анализ отцепок вагонов во внеплановый ремонт на железных дорогах Узбекистана. Определены вероятности безотцепочной работы вагона в ТР-2 (текущий ремонт) по неисправности «тонкий гребень». Оценено влияние погрешностей и ошибок измерения на частоту отцепок вагонов в такой ремонт. **Практическая значимость:** Полученные результаты способствуют углублению знаний о возможности влияния погрешностей и ошибок измерения толщины гребня колесных пар на работоспособность вагонов.

Ключевые слова: Колесные пары, гребень, износ, тонкий гребень, поверхность катания, профиль, шаблон.

Введение

В последние годы на железных дорогах Узбекистана поступление вагонов в текущий отцепочный ремонт (ТОР) непрерывно возрастает. Это вызывает увеличение расходов железнодорожной компании на содержание вагонного парка и ущербов при задержке поездов из-за отцепок неисправных вагонов из формированных составов. Таким образом, вопросы снижения частоты отцепок грузовых вагонов во внеплановый ремонт и обеспечения надежности узлов конструкции этих вагонов непрерывно связаны, а проблема влияния надежности колесных пар на организацию системы технического обслуживания и ремонта грузовых вагонов остается актуальной [1].

Уменьшение износа колес подвижного состава и рельсов – важная задача железнодорожного транспорта. Ее решение приводит не только к

удлинению срока службы колес и рельсов, но в большинстве случаев и к положительному эффекту понижения расходов топлива на тягу поездов, ремонт колесных пар и простой вагонов, а также шума при движении поезда. Начиная с 90-х годов XX в. на железных дорогах Республики Узбекистан начал интенсивно изнашиваться гребень колес, в результате чего возрастают расходы на ремонт и уменьшается срок службы колес [2].

В последние десятилетия в стране проводятся различные экспериментальные исследования колесных пар, связанных с износом колес, но, к сожалению, причины данного явления окончательно не установлены. В настоящей работе рассмотрено влияние ошибок измерения и погрешностей на частоту отцепок вагонов в ТОР по неисправности тонкого гребня.

Колесные пары относятся к важнейшим узлам вагонов, которые предназначены для передачи динамических и статических нагрузок на путь и направления движения вагона по рельсовому пути. От технического состояния колесных пар существенно зависит надежность работы подвижного состава в целом. По статистическим данным наибольшему износу и неисправностям на железнодорожном транспорте подвергаются колесные пары.

Дефекты колесных пар подвижного состава критически влияют на безопасность движения поездов и эксплуатации объектов железнодорожного транспорта. Их развитие способствует разрушению ходовых частей и рельсов, а также сходу или крушению подвижного состава. На железных дорогах России и за рубежом активно проводится работа по созданию аппаратуры и совершенствованию методик контроля ходовых частей вагонов [3]. К сожалению, напольные средства диагностики для обнаружения дефектов колесных пар пока не нашли массового применение на железных дорогах Узбекистана [4, 5].

Одной из основных частей колеса является гребень, обеспечивающий устойчивое положение колесной пары на рельсовой колее и определяющий направление движения подвижного состава. Гребень должен находиться в безупречном техническом состоянии. Выполнение этого требования – неотъемлемый элемент организации безопасного движения железнодорожного транспорта. Из-за больших динамических и статических нагрузок, возникающих в процессе эксплуатации грузовых вагонов, изнашивается гребень колеса.

«Тонкий гребень» относится к эксплуатационным неисправностям, причины их возникновения вызваны естественным износом при долговременном взаимодействии колеса с рельсом. В табл. 1 приведены статистические данные по отцепкам грузовых вагонов в ТОР по неисправностям колесных пар на железных дорогах Узбекистана за 2016–2020 гг. Их анализ за последние 5 лет показывает, что в настоящее время частота отцепок увеличилась на 37% по сравнению с 2016 г. (рис. 1). Это связано с введением новых ремонтных профилей с исходной толщиной гребня 30 и 27 мм, которые уменьшают пробег между обточками в 1,5 и 2 раза [6].

Толщину гребня измеряют абсолютным шаблоном на расстоянии 18 мм от его вершины с помощью горизонтального движка (рис. 2, *а*), перемещая его до соприкосновения с гребнем или наложением браковочного выреза шириной 25 мм (рис. 2, *б*) [7]. Допустимое значение изнашивания гребня составляет 25 мм, согласно нормативным документам по железным дорогам Узбекистана. Если изнашивание будет меньше допустимого значения, тогда работники вагонного хозяйства в целях недопущения разрушения колесной пары и головки рельса, отцепляют неисправный вагон на ТОР [8].

В настоящее время на железных дорогах Узбекистана основным методом выявления дефектов колесных пар является измерительный контроль, осуществляемый осмотрщиками вагонов на пунктах технического обслуживания при осмотре или обработке поездов. На достоверность результатов контроля существенное влияние оказывают психологическое и физиологическое состояния осмотрщика вагонов, его квалификация и опыт, а также внешние условия [6].

ТАБЛИЦА 1. Причины отцепок в ТОР грузовых вагонов по неисправностям колесных пар в 2016–2020 гг.

Неисправности колесных пар	2016 г.	2017 г.	2018 г.	2019 г.	2020 г.
Тонкий гребень	3260	3500	3850	4520	4994
Выщербина	2010	2200	2560	2458	2270
Ползун	540	780	650	690	817
Неравномерный прокат	490	577	790	720	636
Прочие	470	520	580	350	363
В с е г о	6770	7577	8430	8738	9080

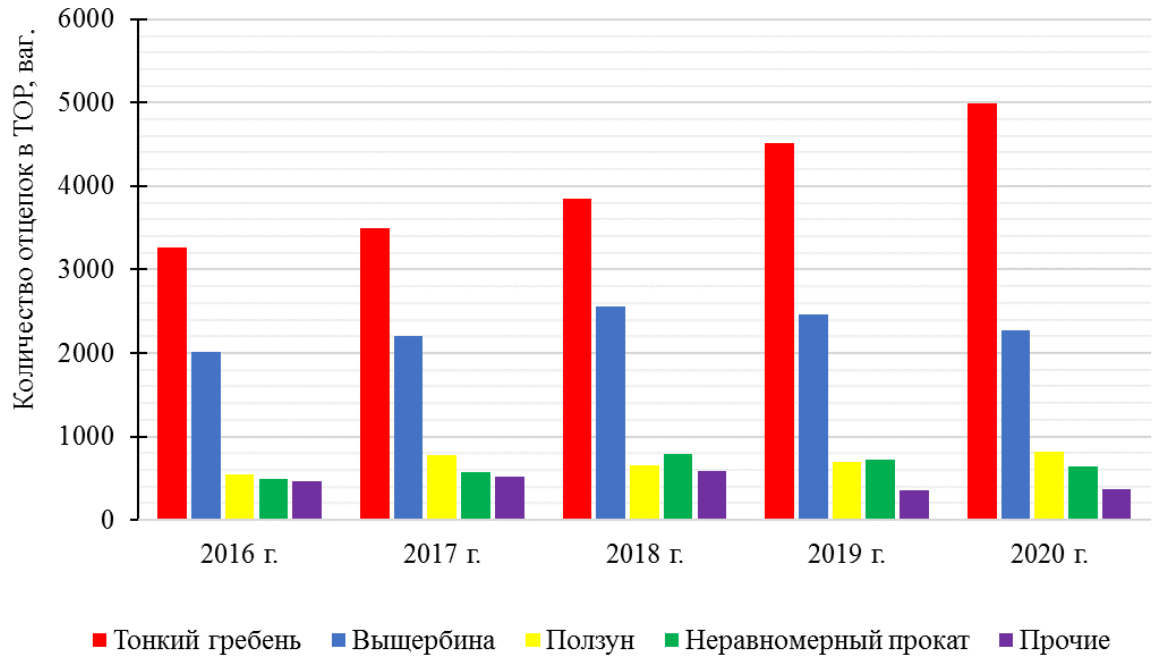


Рис. 1. Отцепки в ТОР по неисправностям колесных пар в 2016–2020 гг.

В эксплуатации вагонов бывают случаи, когда вагон подается под погрузку с толщиной гребня более 26 мм и после полного рейса (примерно 3300 км) гребень оказывается тоньше 25 мм, поскольку средний темп износа гребня приблизительно равен 1 мм на 10 000 км для тележек модели 18-100 [9]. Отсюда можно сделать вывод, что вагоны отправляются под погрузку с толщиной гребня менее 26 мм. В таких случаях вагон сначала должен завершить свой рейс, затем он в плановом порядке поступает в ТОР и обтачивается (восстанавливается) гребень колеса.

Отправление вагонов под погрузку с толщиной гребня менее 26 мм может быть связано с измерением разными техникой и инструментом (шаблоном). При измерении толщины гребня горизонтальным движком абсолютного шаблона погрешность $\sigma_{пог} \approx 0{,}5$ мм, ошибка измерения осмотрщиком $\sigma_{оо}$ приблизительно равна 0,5 мм и толщина гребня по кругу катания разная: $\sigma_{откл} = \pm 0{,}3$ мм. Таким образом, среднюю ошибку

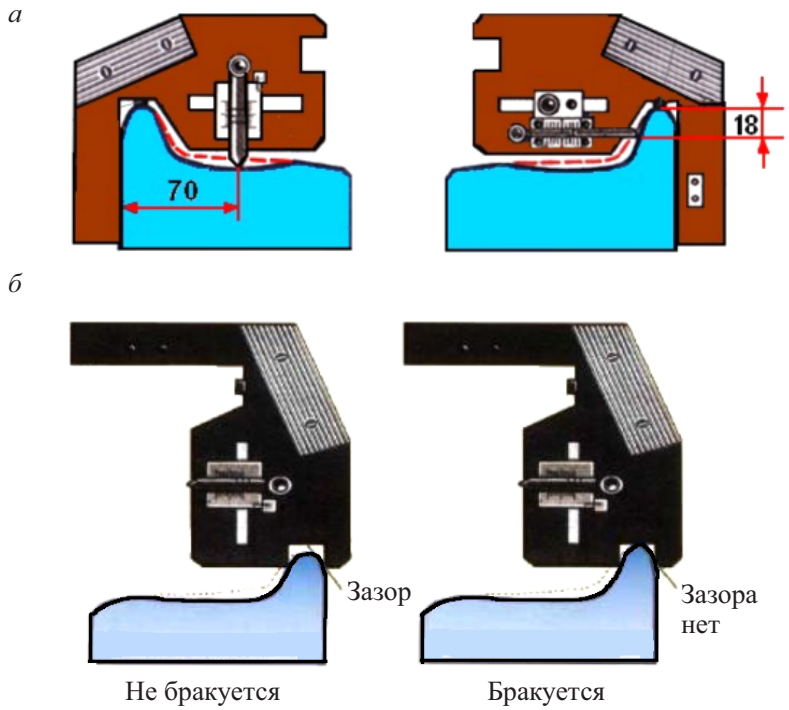


Рис. 2. Измерение толщины гребня (в мм) абсолютным шаблоном с помощью горизонтального движка (*а*) и браковочного выреза (*б*)

измерения можно рассчитать следующим образом:

$$\sigma_{\Sigma} = \sqrt{\sigma_{\text{пог}}^2 + \sigma_{\text{оо}}^2 + \sigma_{\text{откл}}^2} = \sqrt{0,5^2 + 0,5^2 + 0,3^2} = 0,77 \text{ мм}.$$

Следовательно, при подаче под погрузку средняя толщина гребня при декларируемой толщине гребня 26 мм оказывается равной 25,23 мм, т. е. запас толщины гребня составляет всего 0,23 мм. Этой толщины не хватает на средний полный рейс вагона (3300 км) [10, 11].

Определим вероятность безотцепочной эксплуатации вагона с толщинами гребней $m = 24$, 25 и 26 мм, считая, что случайность связана с ошибками измерения и неравномерностью величины, которые распределены по нормальному закону.

Вероятность безотцепочной эксплуатации колеса $P(\alpha < X < \beta) = F(\beta) - F(\alpha)$, где $F(X) = F\left(\frac{x-m}{\sigma}\right)$ – функция распределения, и функция Гаусса

$$P(\alpha < X < \beta) = F\left(\frac{\beta - m}{\sigma}\right) - F\left(\frac{\alpha - m}{\sigma}\right).$$

В табл. 2 представлено определение вероятности безотцепочной работы вагона в ТР-2 по неисправности «тонкий гребень» для колесных пар.

Как видно на рис. 3, при контроле толщины гребня 25 мм браковочным вырезом или горизонтальным движком толщины гребня 26 мм при подаче под погрузку вероятность отцепки минимальна.

Заключение

Проведенный анализ по влиянию погрешностей и ошибок измерения на частоту отцепок вагонов в ТОР Республики Узбекистан показал, что на ресурс колес воздействует не только материал колес и ходовых частей, но и качествен-

ТАБЛИЦА 2. Определение вероятности отцепки вагона в ТР-2 по тонкому гребню

Измерение горизонтальным движком	Измерение браковочным вырезом
Гребень 24 мм: m = 24,1 мм; σ = 0,77 мм; β = ∞; α = 24 мм; $P\ (24 < X < \infty) = \Phi\ (\frac{24-24,1}{0,77}) = \frac{1}{2}$ при Ф (∞) = 1 и Ф (0) = $\frac{1}{2}$. Вероятность безотцепочной работы вагона с 8 колесами $P_8 = \frac{1}{2}^8 = 0,004$	**Гребень 24 мм:** m = 24,1 мм; σ = 0,3 мм; β = ∞; α = 24 мм; $P\ (24 < X < \infty) = \Phi\ (\infty) - \Phi\ (\frac{24-24,1}{0,3}) =$ $= 1 - \Phi\ (\frac{0,1}{0,3}) = 0,63$ при Ф (∞) = 1 и Ф (0) = $\frac{1}{2}$. Вероятность безотцепочной работы вагона с 8 колесами $P_8 = (0,63)^8 = 0,024$
Гребень 25 мм: m = 25 мм; σ = 0,77 мм; β = ∞; α = 24 мм; $P\ (24 < X < \infty) = \Phi\frac{24-25}{0,77} = 0,9$ при Ф (∞) = 1 и $\Phi - \frac{1}{0,77} = 0,1$. Вероятность безотцепочной работы вагона с 8 колесами $P_8 = 0,9^8 = 0,43$	**Гребень 25 мм:** m = 25 мм; σ = 0,3 мм; β = ∞; α = 24 мм; $P\ (24 < X < \infty) = \Phi\ (\infty) - \Phi\frac{24-25}{0,3} =$ $= 1 - \Phi\ (3,33) = 1 - 0,0005 = 0,9995.$ Вероятность безотцепочной работы вагона с 8 колесами $P_8 = (0,9995)^8 = 0,9996$
Гребень 26 мм: m = 26 мм; σ = 0,77 мм; β = ∞; α = 24 мм; $P\ (24 < X < \infty) = \Phi\ (\infty) - \Phi\frac{24-25}{0,77} = 0,9953$ при Ф (∞) = 1 и $\Phi - \frac{2}{0,77} = 0,0047$. Вероятность безотцепочной работы вагона с 8 колесами $P_8 = (0,9953)^8 = 0,995$	

ное техническое обслуживание в условиях его эксплуатации.

При изменении норматива минимальной толщины гребня до 24 мм в эксплуатации и до 25 мм при подаче вагонов под погрузку эффект сокращения темпа износа гребня и повышения ресурса колес для компенсации их дефицита достигнут не будет. Уменьшение допустимой толщины гребня до 24 мм не приведет к снижению частоты отцепок в ТОР, так как в дальнейшем после 10 тыс. км пробега вагоны снова окажутся в ремонте по «тонкому гребню».

Результаты проведенного анализа показывают, что при измерении толщины гребня 25 мм браковочным вырезом или горизонтальным движком толщины гребня 26 мм при подаче под погрузку вероятность отцепки минимальна. При подаче под погрузку вагонов средняя ошибка измерения толщины гребня 26 мм с помощью горизонтального движка абсолютного шаблона составляет 0,77 мм.

Кардинальное решение проблемы, связанной с отцепками вагонов в ТОР по интенсивному износу гребней на тележках 18-100, необходимо искать в улучшении качества ремонта тележек, контроле состояния фрикционных клиньев, размеров боковых рам и букс, а также зазоров боковых скользунов [2].

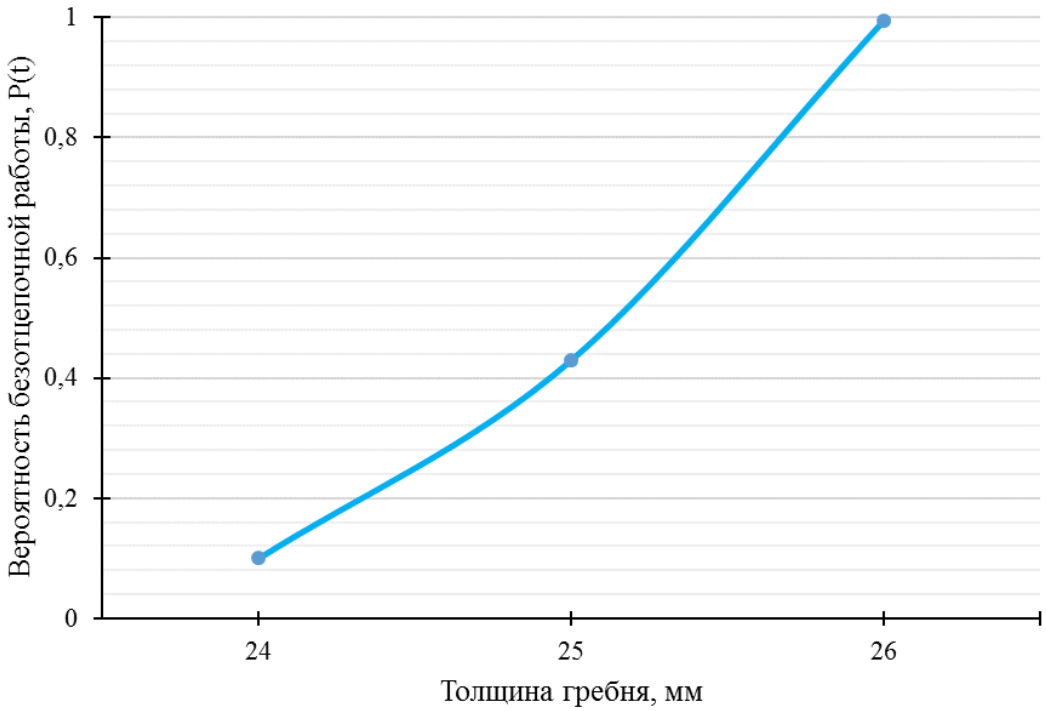


Рис 3. График зависимости вероятности безотцепочной работы от измерения толщины гребня колеса

Библиографический список

1. Бороненко Ю. П. Анализ эффекта и рисков от уменьшения допустимой толщины гребня колеса до 24 мм / Ю. П. Бороненко // Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты: Материалы XIV Междунар. науч.-технич. конференции «210-летию создания первого транспортного вуза России посвящается». – СПб.: ПГУПС, 2019. – С. 12–17.

2. Бороненко Ю. П. Миллиметр не решит проблем износа гребней колес тележек типа 18-100 / Ю. П. Бороненко // Гудок. Газ. – 2018. – С. 2. – URL: gudok.ru (дата обращения: 05.08.2021).

3. Воробьев А. А. Увеличение ресурса железнодорожного колеса технологическим методом / А. А. Воробьев, П. М. Терехов // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2010. – № 2. – С. 121–125.

4. Рахимов Р. В. Выбор направлений развития вагонного парка железных дорог Узбекистана / Р. В. Рахимов // Транспорт Российской Федерации. – 2018. – № 1 (74). – С. 71–74.

5. Концепция развития Управления вагонного хозяйства АО «УТЙ» на 2018–2022 гг. – Ташкент: АО «УТЙ», 2018. – 40 с.

6. Основные показатели социально-экономического развития Республики Узбекистан за 2018–2020 гг. Транспорт и связь. – Государственный комитет Республики Узбекистан по статистике. – URL: https://stat.uz/uploads/doklad (дата обращения: 20.01.2021).

7. Гончаров С. Е. Износ гребней колесных пар грузовых вагонов / С. Е. Гончаров // Техника железных дорог. – 2017. – № 4 (40). – С. 32–37.

8. Калетин С. В. Изменение геометрических размеров колесных пар грузовых вагонов в части снижения критериев браковки по толщине гребня / С. В. Калетин // Техника железных дорог. – 2018. – № 1 (41). – С. 14–15.

9. Гайипов А. Б. Влияние надежности колесных пар инновационных вагонов в эксплуатации на потребность в новых колесах / А. Б. Гайипов, Ю. П. Бороненко, Т. М. Белгородцева // Транспорт Российской Федерации. – 2020. – № 1 (86). – С. 52–57.

10. Орлова А. М. Анализ существующей ситуации взаимодействия колес и рельсов / А. М. Орлова // Постановка задач исследования: тез. докл. XI Междунар. науч.-технич. конференции «Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты» (Санкт-Петербург, 6–10 июля 2016 г.). – СПб.: ПГУПС, 2016. – С. 121–123.

11. Ромен Ю. С. Состояние ходовых частей подвижного состава и износы в системе «колесо–рельс» / Ю. С. Ромен, А. М. Орлова, В. С. Лесничий // Вестник ВНИИЖТ. – 2010. – № 2. – С. 42–45.

Дата поступления: 08.09.2021
Решение о публикации: 25.09.2021

Контактная информация:
ГАЙИПОВ Азиз Бахромович – аспирант;
AzizG89@yandex.ru

Influence of inaccuracies and measurement errors on frequency of uncoupling of cars for unscheduled repairs on the railways of the Republic of Uzbekistan

A. B. Gayipov

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

For citation: Gayipov A. B. Influence of inaccuracies and measurement errors on frequency of uncoupling of cars for unscheduled repairs on the railways of the Republic of Uzbekistan. *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2021, vol. 18, iss. 4, pp. 507–514. (In Russian)
DOI: 10.20295/1815-588X-2021-4-507-514

Summary

Objective: Considering the impact of inaccuracy and errors in measuring the thickness of the flange of wheelsets on the frequency of uncoupling for unscheduled repairs on the railways of the Republic of Uzbekistan. Conducting an analysis of the impact of uncoupling freight cars for unscheduled wheelset malfunctions repairs. **Methods:** Methods of combinatorial and statistical analyzes of the initial data are used. **Results:** A detailed analysis of car uncoupling for unscheduled repairs on the railways of Uzbekistan has been carried out. The probabilities of car uncoupling operation in TR-2 (current repair) due to the "thin flange" malfunction have been determined. The influence of inaccuracies and measurement errors on the frequency of uncoupling of cars for such a repair is estimated. **Practical importance:** The results obtained contribute to the deepening of knowledge about the possibility of the influence of inaccuracies and errors in measuring the thickness of the flange of wheelsets on the performance of cars.

Keywords: Wheelsets, flange, wear, fine flange, rolling surface, grade record, copying bar.

References

1. Boronenko Yu. P. Analiz effekta i riskov ot umen'sheniya dopustimoy tolshchiny grebnya kolesa do 24 mm [Analysis of the effect and risks of reducing the permissible thickness of the wheel flange to 24 mm]. *Podvizhnoy sostav XXI veka: idei, trebovaniya, proyekty: Materialy XIV Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "210-letiyu sozdaniya pervogo transportnogo vuza Rossii posvyashchayetsya"* [*Rolling stock of the 21st century: ideas, requirements, projects: Materials of the XIV International Scientific and Technical Confe-*

rence "Dedicated to the 210th anniversary of the creation of the first transport university in Russia"]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2019, pp. 12–17. (In Russian)

2. Boronenko Yu. P. Millimetr ne reshit problem iznosa grebney koles telezhek tipa 18-100 [Millimeter will not solve the problems of wear of wheel flanges of bogies type 18-100]. *Gudok*, *Gas*, 2018, p. 2. Available at: gudok.ru (accessed: August 05, 2021). (In Russian)

3. Vorobiev A. A. & Terekhov P. M. Uvelicheniye resursa zheleznodorozhnogo kolesa tekhnologicheskim metodom [Increasing the resource of the railway wheel by the technological method]. *Nauchnyye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka* [*Scientific problems of transport in Siberia and the Far East*], 2010, no. 2, pp. 121–125. (In Russian)

4. Rakhimov R. V. Vybor napravleniy razvitiya vagonnogo parka zheleznykh dorog Uzbekistana [The choice of directions for the development of the wagon fleet of Uzbekistan railways]. *Transport Rossiyskoy Federatsii* [*Transport of the Russian Federation*], 2018, no. 1 (74), pp. 71–74. (In Russian)

5. *Kontseptsiya razvitiya Upravleniya vagonnogo khozyaystva AO "UTY" na 2018–2022 gg.* [*The concept of development of the Department of carriage facilities of JSC "UTY" for 2018–2022*]. Tashkent, JSC "UTY" [Uzbekistan Railways] Publ., 2018, 40 p. (In Russian)

6. *Osnovnyye pokazateli sotsial'no-ekonomicheskogo razvitiya Respubliki Uzbekistan za 2018–2020 gg. Transport i svyaz'* [*Key indicators of socio-economic development of the Republic of Uzbekistan for 2018–2020. Transport and communications*]. State Committee of the Republic of Uzbekistan on Statistics. Available at: https://stat.uz/uploads/doklad (accessed: January 20, 2021). (In Russian)

7. Goncharov S. E. Iznos grebney kolesnykh par gruzovykh vagonov [Wheelset flange wear of freight cars]. *Tekhnika zheleznykh dorog* [*Railway Engineering*], 2017, no. 4 (40), pp. 32–37. (In Russian)

8. Kaletin S. V. Izmeneniye geometricheskikh razmerov kolesnykh par gruzovykh vagonov v chasti snizheniya kriteriyev brakovki po tolshchine grebnya [Changing the geometric dimensions of the wheelsets of freight cars in terms of reducing the criteria for rejection by flange thickness]. *Tekhnika zheleznykh dorog* [*Railway Engineering*], 2018, no. 1 (41), pp. 14–15. (In Russian)

9. Gayipov A. B., Boronenko Yu. P. & Belgorodtseva T. M. Vliyaniye nadezhnosti kolesnykh par innovatsionnykh vagonov v ekspluatatsii na potrebnost' v novykh kolesakh [Influence of reliability of wheelsets of innovative cars in operation on the need for new wheels]. *Transport Rossiyskoy Federatsii* [*Transport of the Russian Federation*], 2020, no. 1 (86), pp. 52–57. (In Russian)

10. Orlova A. M. Analiz sushchestvuyushchey situatsii vzaimodeystviya koles i rel'sov [Analysis of the existing situation of interaction of wheels and rails]. *Postanovka zadach issledovaniya.* Tezisy dokladov XI Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Podvizhnoy sostav XXI veka: idei, trebovaniya, proyekty" (Sankt-Peterburg, 6–10 iyulya 2016 g.) [*Statement of research tasks.* Abstracts of the XI International scientific and technical conference "Rolling stock of the XXI century: ideas, requirements, projects" (St. Petersburg, July 6–10, 2016)]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2016, pp. 121–123. (In Russian)

11. Romen Yu. S., Orlova A. M. & Forester V. S. Sostoyaniye khodovykh chastey podvizhnogo sostava i iznosy v sisteme «koleso–rel's» [State of the running parts of the rolling stock and wear in the wheel – rail system]. *Vestnik VNIIZhT* [*Bulletin of the Railway Research Institute*], 2010, no. 2, pp. 42–45. (In Russian)

Received: September 08, 2021
Accepted: September 25, 2021

Author's information:
Aziz B. GAYIPOV – Postgraduate Student;
AzizG89@yandex.ru

УДК 656.073:658.8

Особенности организации работы станции и железнодорожного вокзального комплекса при пуске «Аэроэкспресса»

О. Д. Покровская, А. В. Сугоровский, И. В. Рыбакова, М. А. Марченко, М. В. Шевердова

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

Для цитирования: *Покровская О. Д., Сугоровский А. В., Рыбакова И. В., Марченко М. А., Шевердова М. В.* Особенности организации работы станции и железнодорожного вокзального комплекса при пуске «Аэроэкспресса» // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2021. – Т. 18. – Вып. 4. – С. 515–527. DOI: 10.20295/1815-588X-2021-4-515-527

Аннотация

Цель: Рассмотреть особенности изменения работы станции Санкт-Петербургского транспортного узла и вокзала при запуске «Аэроэкспресса». **Методы:** Применяются средства и методы логистики, общей теории систем, терминалистики, системного и экономического анализов, а также управления эксплуатационной работой железных дорог. **Результаты:** Предложены в условиях станции Санкт-Петербургского транспортного узла альтернативные варианты изменения работы станции и вокзала при запуске «Аэроэкспресса». Первый вариант предполагает организацию приема и отправления поездов на существующем пути; второй – специализацию для приема и отправления скорых пригородных электропоездов в сообщении с аэропортом Пулково действующего перронного электрифицированного приемоотправочного пути в комплексе с расположенной рядом островной пассажирской платформой. При изменении пассажиропотоков на вокзальном комплексе произведен расчет числа билетных касс. Рассмотрены вопросы организации сервисной деятельности по обслуживанию пассажиров «Аэроэкспресса» на вокзальном комплексе. По выполненным экономическим расчетам и на основании результатов анкетирования потенциальных пассажиров сделаны практические рекомендации по запуску «Аэроэкспресса» в условиях Санкт-Петербургского транспортного узла. **Практическая значимость:** Полученные результаты могут быть применены при реализации концепции развития Санкт-Петербургского транспортного узла, проектировании отдельных элементов и устройств железнодорожного узла для совершенствования организации пассажирских перевозок, а также при определении перспектив развития вокзальных комплексов.

Ключевые слова: «Аэроэкспресс», развитие транспортного узла, организация работы вокзального комплекса, сервисная деятельность на вокзальном комплексе.

Введение

Пассажирский транспортный комплекс Российской Федерации играет важную роль в развитии и совершенствовании экономики страны. Транспортная активность населения объективно возрастает, потому требуется принятие системных и долгосрочных решений, позволяющих повысить эффективность единой транспортной системы в целом. Железнодорожный транспорт, как составная часть этой системы, во взаимодействии с другими видами транспорта призван своевременно и качественно удовлетворять потребности населения.

В связи с активным пространственным развитием города в настоящее время Санкт-Петербург нуждается в улучшении сети городского общественного транспорта. Совершенствование го-

родской транспортной инфраструктуры необходимо для удобного и безопасного перемещения граждан.

Отсутствие грамотного взаимодействия различных видов транспорта ведет к снижению уровня обслуживания пассажиров, что в дальнейшем приводит к потерям прибыли компаний перевозчиков [1]. Доставка пассажиров из города в аэропорт – одна из актуальных задач в крупных городах.

Сейчас добраться из Санкт-Петербурга в Пулково можно на личном транспорте, автобусе или такси, при возрастающих пассажиропотоках появляются такие проблемы как высокая аварийность и низкая скорость движения [2].

Чтобы проиллюстрировать возрастание спроса, обратимся к официальному порталу аэропорта Пулково: «Пассажиропоток аэропорта Пулково в 2017 г. составил 16 125 520 человек, что на 21,6% превышает результат 2016 г. Показатель стал рекордным в истории воздушной гавани Санкт-Петербурга. Предыдущий годовой максимум объема перевозок приходился на 2014 г., когда Пулково принял 14,3 млн пассажиров» [3, 4].

В крупных городах по всему миру у пассажиров есть возможность добраться из аэропорта до города на поезде, в большинстве случаев поездка на «Аэроэкспрессе» занимает меньшее количество времени, чем на других видах транспорта. Россия имеет успешный опыт запуска экспресса из города в аэропорт. В Москве компания «Аэроэкспресс» осуществляет пассажирские перевозки по трем железнодорожным линиям: Москва-Белорусская – Аэропорт Шереметьево, Москва-Киевская – Аэропорт Внуково, Москва-Павелецкая – Аэропорт Домодедово. Применение данного сервиса с целью повышения транспортного обслуживания горожан и гостей города планируется и в Санкт-Петербурге: «Аэроэкспресс» соединит Пулково и Витебский вокзал.

Концепция такова, что «Аэроэкспресс» в Петербурге свяжет Пулково и Витебский вокзал, а в дальнейшем может быть продлен до города-спутника Южного. В среднем пассажиры смогут добраться от аэропорта до вокзала за рекордные 20 мин, что отмечается в материалах [5–8].

Теоретические вопросы оптимального размещения устройств в транспортном узле с учетом технологии транспортной работы отражены в работах [9–11].

Отдельное внимание в научной литературе уделяется вопросам управления процессами перевозок [12, 13] с применением методов логистики [14–18], что позволит рационально проектировать технологию работы транспортного узла [19–24]. Исследовать логистику транспортных узлов и терминалов можно с применением инструментария теории терминалистики [25–27], с учетом экономической составляющей, например, с использованием результатов работ [28–30].

Вместе с тем в научной литературе недостаточно проработана проблематика запуска железнодорожного экспресса «город – аэропорт» в формате «Аэроэкспресс» при ее комплексном рассмотрении с вопросами проектирования и устройства транспортно-пересадочных узлов, что послужило объективным требованием к постановке цели настоящего исследования.

Цель данной работы – изучение технологии организации работы станции Санкт-Петербургского транспортного узла и вокзального комплекса в условиях эксплуатации поездов «Аэроэкспресс».

Варианты совершенствования работы станции и вокзала

Рассмотрим изменение работы станции Санкт-Петербургского транспортного узла и вокзала при запуске «Аэроэкспресса».

Первый вариант: организация приема и отправления поездов «Аэроэкспресс» на действующем пути, предназначенном для пригородного движения.

При такой организации движения возможно рассмотрение строительства дополнительного приемоотправочного пути между улицей Введенского канала и путем пассажирского парка с

удлинением платформы для резерва и дальнейшего развития пригородного движения.

В данном варианте пассажиропоток на вокзальном комплексе осуществляется следующим образом: вход в здание вокзала для пассажиров пригородного и дальнего сообщения происходит со стороны Загородного проспекта, выход – по лестничным маршам на Подъездной переулок и Введенский канал. Для пассажиров «Аэроэкспресса» организуется отдельный вход/выход со стороны Введенского канала. Формируется отдельная зона для пассажиров «Аэроэкспресса» и исключается возможность попадания их на территорию вокзального комплекса.

Такой вариант является предпочтительным для развития путевого хозяйства, и движение «Аэроэкспресса» будет независимым от основного движения пригородных поездов. Более удобно продажу проездных документов на поезда пригородного сообщения производить на первом этаже в основном здании вокзала. Павильон на Введенском канале целесообразно подвергнуть модернизации за счет инвестора. Для улучшения качества обслуживания пассажиров следует организовать отдельные кассы, зону досмотра, зал ожидания, стойку регистрации на рейс и предложить другие услуги вокзального комплекса.

Второй вариант: специализировать для приема и отправления скорых пригородных электропоездов в сообщении с аэропортом Пулково существующий перронный электрифицированный приемоотправочный путь в комплексе с расположенной рядом островной пассажирской платформой.

При этом неэлектрифицированный приемоотправочный путь требуется электрифицировать и использовать для резерва.

Вход в здание вокзала расположен со стороны Загородного проспекта, при этом авиапассажир проходит пункт досмотра ручной клади и багажа и производит посадку в «Аэроэкспресс» на платформе. Продажа билетов на «Аэроэкспресс» возможна на первом этаже здания вокзала. При этом авиапассажир пользуется всеми услугами, предоставляемыми на территории вокзального комплекса (носильщик, подъем багажа, общественное питание и др.). В пригородном сообщении посадка и выход с электропоездов будут производиться со стороны Введенского канала. Для удобного перемещения от входа в здание вокзала до платформы требуется одно из решений организации подъема на второй этаж. Чтобы использовать тоннель под пассажирской платформой для прохода пассажиров «Аэроэкспресса», желательна установка траволаторов (это ускорит и облегчит движение пассажиров с багажом, а также исключит пересечение встречных потоков людей), в конце тоннеля требуется установка эскалаторов. Кроме того, установка эскалаторов на месте кладового помещения в центральной части вокзала позволяет пассажирам как «Аэроэкспресса», так и дальних поездов быстро и комфортабельно проходить к поездам.

Выход с электропоезда «Аэроэкспресс» происходит через здание вокзала на Подъездной переулок в сторону метро.

Изменение пассажиропотоков на вокзальном комплексе

Для приема и отправления поездов «Аэроэкспресс» на существующем пути, предназначенном для пригородного движения, организация пассажиропотока на вокзальном комплексе происходит так же, как и при первом варианте, а для приема и отправления скорых пригородных электропоездов в сообщении с аэропортом Пулково – как при втором варианте.

Организация справочно-информационных услуг определяет качество обслуживания пассажиров на вокзалах, обеспечивает доступность железнодорожного транспорта для удовлетворения транспортных потребностей населения. Справочную информацию доводят до пассажиров различными способами: по восприятию (наглядная или звуковая), по времени воздействия (с постоянным или с переменным изображением), по использованию технических средств (громкоговорящее оповещение, информационные терминалы, платформенные указатели и мониторы,

радио-справка и другие виды информационно-справочной аппаратуры). Организация трансфера – это услуга транспортной логистики в перевозке пассажиров от вокзала на такси. Единый корпоративный стиль (водитель в униформе компании, соответствующая раскраска автомобиля), безопасность и комфорт – основные привлекательные факторы для клиентов [6]. Для пассажира «Аэроэкспресса» удобнее организовать отдельную зону обслуживания.

Сервис в электропоездах «Аэроэкспресс»

Сервисная деятельность подразумевает вступление людей в специфические отношения по реализации индивидуальных, групповых и общественных услуг. Цель этих отношений – удовлетворение человеческих потребностей. Транспорт предоставляет клиентам комплекс услуг по обеспечению потребности населения в перемещении, поэтому он относится к важнейшим направлениям сервисной деятельности.

Сервис в пассажирских перевозках можно рассматривать как систему, позволяющую пассажиру выбрать из предлагаемого набора экономически выгодный для себя вариант потребления предоставляемых товаров и услуг с целью создания комфортных условий совершения поездки [6].

При подключении смартфона, планшета, ноутбука или другого мобильного устройства к Wi-Fi-сети на борту поезда пассажиры смогут воспользоваться мультимедийным порталом, который предлагает пассажирам полезную информацию: новости, расписание «Аэроэкспресса», информацию о поезде, а также развлекательный контент – фильмы, музыку, аудиокниги. Выдача забытых вещей осуществляется на основании паспорта и билета. В случае возникновения затруднений с поиском можно оставить письменную заявку на розыск вещей у дежурного по вокзалу. Возможна доставка горячих блюд из вагона-бистро на места пассажиров с ограниченными возможностями. В мобильном баре можно приобрести прохладительные и алкогольные напитки, сэндвичи, снэки, десерты. В поездах пригородного сообщения разрешается перевозка мелких собак без тары в намордниках, на поводке и кошек под наблюдением их владельцев или сопровождающих. За перевозку в поездах пригородного сообщения мелких домашних (комнатных) животных, собак и птиц взимается плата.

Необходимо установить тариф для группы людей (семья и друзья): одна поездка в вагоне стандартного класса, когда билет действителен для проезда группы пассажиров не более 4 человек на дату, указанную в проездном документе. В табл. 1 приведены предоставляемые в поездах «Аэроэкспресс» классы обслуживания и услуги.

Принципиальные решения

Рассмотрим два новых варианта суточного плана-графика станции, два варианта организации пассажиропотоков на вокзальном комплексе, а также предложения по обслуживанию пассажиров.

Первый вариант: организация приема и отправления поездов «Аэроэкспресс» на существующем пути, предназначенном для пригородного движения.

Второй вариант: специализировать для приема и отправления скорых пригородных электропоездов в сообщении с аэропортом Пулково действующий перронный электрифицированный приемоотправочный путь в комплексе с расположенной рядом островной пассажирской платформой.

Предлагается использовать электропоезд «Ласточка» с асинхронными тяговыми двигателями, а именно электропоезд постоянного тока ЭС2Г «Стандарт»: вместимость – 443 человека, составность – 5 вагонов.

Для пассажира «Аэроэкспресса» удобнее организовать отдельную зону обслуживания. Более предпочтительным для этого является вариант организации обслуживания авиапассажиров в Императорском павильоне. В поездах «Аэроэк-

ТАБЛИЦА 1. Классы обслуживания и услуги в поездах «Аэроэкспресс»

Вагон первого класса	Вагон бизнес-класса	Вагон экономического класса с указанием мест	Вагон базового класса без указания мест
Услуга бронирования экскурсий	Услуга бронирования экскурсий	Услуга бронирования экскурсий	Услуга бронирования экскурсий
Услуга продажи ж.-д. и авиабилетов	Услуга продажи ж.-д. и авиабилетов	Услуга продажи ж.-д. и авиабилетов	Услуга продажи ж.-д. и авиабилетов
Услуга заказа такси	Услуга заказа такси	Услуга заказа такси	Услуга заказа такси
Зарядка мобильных телефонов	Зарядка мобильных телефонов	Зарядка мобильных телефонов	
Медиацентр, Интернет	Медиацентр, Интернет	Пресса	
Гарантированное питание, услуги мобильного бара	Услуги бистро, мобильного бара	Услуги мобильного бара	
Аудио- и видеотрансляция, пресса	Аудио- и видеотрансляция, пресса		
Детский набор (при покупке детского билета)	Детский набор (при покупке детского билета)		
Автоматы для чистки обуви	Автоматы для чистки обуви		
Дорожный набор, плед, подушка			
Кресла, раскладывающиеся в положение полулежа			

спресс» могут быть представлены следующие классы обслуживания: вагон первого класса, вагон бизнес-класса, вагон экономического класса с указанием мест, вагон базового класса без указания мест.

В производственной деятельности основные затраты «Аэроэкспресса» состоят из:

• оплаты владельцу инфраструктуры (ОАО «РЖД») за предоставление «нитки» графика;

• оплаты труда локомотивных бригад;

• оплаты отстоя составов на инфраструктуре ОАО «РЖД» в период их незадействования в перевозках;

• расходов на техническое обслуживание, ремонты подвижного состава, амортизацию;

• расходов на электроэнергию;

• расходов на работу касс и терминалов.

Для расчета выручки компании-оператора «Аэроэкспресса» от перевозочной деятельности принята стоимость билета 420 руб. (равная действующей стоимости проезда в поездах «Аэроэкспресса» в Московском транспортном узле), с учетом методики расходных ставок, определяемых на основе зависящих от объемов работы расходов ОАО «РЖД» по перевозочным видам деятельности (табл. 2).

Значения бригадо-часов работы бригады, поездо-часов в отстое представлены в Распоряжении ОАО «РЖД» от 7 апреля 2017 г. № 675р «Об утверждении расходных ставок и оценоч-

ТАБЛИЦА 2. Расчетные единичные расходные ставки

Показатель	Единичная расходная ставка на 2017 г., руб.
Оплата услуг инфраструктуры за предоставление «нитки» графика	20 000,00
Бригадо-час работы бригады	1 111,95
Поездо-час в отстое	4 733,96

ТАБЛИЦА 3. Расчет валовой прибыли компании-оператора «Аэроэкспресса»

Показатель	Значение (в сутки, по данным 2017 г.), руб.	Расходная ставка, руб.	Эксплуатационные затраты, руб./год
Эксплуатационные затраты			
Оплата услуг инфраструктуры за предоставление «нитки» графика	38,00	20 000,00	277 400 000
Бригадо-часы работы бригад	80,16	1111,95	89 133
Поездо-часы отстоя составов	8,00	4733,96	37 871
ВСЕГО			335 927 005
Доходы от предоставляемой услуги			
Перевезено пассажиров	7720	420,00	1 883 476 000

ных уровней затрат для экономических задач», единичной расходной ставки на оплату услуг инфраструктуры за предоставление «нитки» – в документах ОАО «РЖД».

Значения (в сутки) оплаты услуг инфраструктуры за предоставление «нитки» графика, бригадо-часы работы бригад, поездо-часы отстоя составов рассчитаны на основании 19 пар поездов в сутки. Результаты расчета затрат поездо-часов в отстое приведены в табл. 3. Количество перевезенных пассажиров рассчитано на основе пассажиропотока, обслуженного «Аэроэкспрессом» (17,5%), и пассажиропотока аэропорта (16,1 млн пасс./год).

Для оценки стоимости расходов на техническое обслуживание, ремонты подвижного состава, амортизацию использованы данные годового отчета. По данным годового отчета ООО «Аэроэкспресс», расходы на техническое обслуживание, ремонты и эксплуатацию поездов составили в 2015 г. 345,1 млн руб. При этом в оперировании компании находился 31 состав. Таким образом, примерная стоимость расходов на один состав – 11,13 млн руб. в год. При эксплуатации на линии «Аэроэкспресса» двух составов плановые расходы на их техническое обслуживание, ремонты и эксплуатацию равны 22,26 млн руб. в год.

Валовая прибыль компании оператора может быть рассчитана следующим образом:

$$П_{вал} = Д - (Р_{инф} + Р_{л.бриг} + Р_{отст} + Р_{ТО}),$$

где Д – выручка, руб.; $Р_{инф}$ – расходы на предоставление инфраструктуры («ниток» графика); $Р_{л.бриг}$ – расходы на работу локомотивных бригад; $Р_{отст}$ – расходы на отстой незадействованных составов на инфраструктуре ОАО «РЖД»; $Р_{ТО}$ – расходы на техническое обслуживание ремонты и эксплуатацию составов электропоездов.

В результате получаем, что

$$П_{вал} = 1883,48 - (277,40 + 0,09 + 0,04 + 22,26) = 1583,69 \text{ млн руб.}$$

Таким образом, предполагаемая ежегодная валовая прибыль по проекту при освоении прогнозного пассажиропотока будет составлять 1,58 млрд руб. Для сравнения валовая прибыль компании «Аэроэкспресс» за первое полугодие 2017 г. – 1,40 млрд руб.

Заключение

В настоящее время во многих крупных городах мира железнодорожный транспорт используется для сообщения «город – аэропорт». В свою очередь, как показано в данной работе, это необходимо для обеспечения пассажирам своевременной, безопасной, комфортабельной и эффективной поездки из Санкт-Петербурга в Пулково.

Повышение эффективности управления пассажирскими перевозками требует: 1) проведения мероприятий по разработке элементов нового подвижного состава; 2) внедрения современных технических устройств, обеспечивающих более качественное обслуживание пассажиров; 3) создания новых технологий управления эксплуатационной работой, направленных на гармонизацию интересов пассажиров и перевозчика [12].

Сейчас пассажирский блок ОАО «РЖД» функционирует в условиях обострения конкуренции на рынке перевозок, прежде всего с автомобильными и авиационными перевозчиками. Для сохранения объемов пассажирской работы применяются маркетинговые способы регулирования тарифов, разрабатывается система корпоративных стандартов для перевозки, повышаются требования к поставщикам дополнительных услуг пассажирам.

Создание таких комплексов в сообщении «город – аэропорт» оказывает положительное влияние на рост объемов перевозок, повышение доходов и прибыли, улучшение качества транспортного обслуживания населения.

В результате проведения исследования была проанализирована технология организации работы станции Санкт-Петербург-Витебский и вокзального комплекса в условиях эксплуатации «Аэроэкспресса»:

• рассмотрено изменение работы станции и вокзала при запуске этих поездов;

• выполнено построение двух новых вариантов суточного плана-графика станции;

• описаны два варианта организации пассажиропотока на вокзальном комплексе;

• выдвинуты предложения по обслуживанию пассажиров;

• определен требуемый подвижной состав.

Так, в данном исследовании в ходе анкетирования потенциальных пассажиров установлено, что больше половины из них воспользовались бы электропоездом «Аэроэкспресс» при стоимости проезда 300 руб. Таким образом, желание доехать на «Аэроэкспрессе» до аэропорта напрямую зависит от цены на билет, так как за 420 руб. согласны ехать только 30% опрошенных.

Можно полагать, что дальнейшим направлением исследований может стать изучение «зеленого» аспекта развития транспортных узлов при организации экспресса «город – аэропорт» [31–33]. Отдельного внимания заслуживает маркетинговое изучение предпочтений целевой группы для проведения более эффективной ценовой и сервисной политики ОАО «РЖД».

Библиографический список

1. Покровская О. Д. Международная логистика Транссибирской магистрали: использование транзитного потенциала России / О. Д. Покровская, В. М. Самуйлов // Инновационный транспорт. – 2016. – № 3 (21). – С. 3–7.

2. Транспортно-пересадочный узел в Сертолово за 5,75 млрд рублей построят к 2024 г. // Интефакс-Северо-Запад. – 21 сентября 2021 г. – URL: https://www.interfax-russia.ru/northwest/news/transportno-peresadochnyy-uzel-v-sertolovo-za-5-75-mlrd-rubley-postroyatk-2024 (дата обращения: 03.11.2021).

3. Официальный портал аэропорта Пулково. – URL: https://pulkovoairport.ru/about/press_center/news/ (дата обращения: 03.11.2021).

4. Дирекция по развитию транспортной инфраструктуры Санкт-Петербурга и Ленинградской области. – URL: https://spbtrd.ru/projects/hubs/hub-south-east-kudrovo (дата обращения: 03.11.2021).

5. Концепция по развитию железнодорожной инфраструктуры в целях организации пригородных и внутригородских пассажирских перевозок в Санкт-Петербургском железнодорожном узле. – М.: ОАО «РЖД», 2019. – 105 с.

6. Концепция развития транспортной системы Санкт-Петербурга в 2017–2038 гг. (перспектива до 2048 г.). – URL: http://krti.gov.spb.ru/media/uploads/userfiles/2017/03/22/Презентация_материалов_КТС.pdf (дата обращения: 03.11.2021).

7. Программа развития транспортной системы Санкт-Петербурга и Ленинградской области на период до 2020 года. – URL: https://spbtrd.ru (дата обращения: 03.11.2021).

8. Пересадка на электрички. РЖД планируют пересадить на электрички жителей Петербурга. – URL: https://www.dp.ru (дата обращения: 03.11.2021).

9. Шубко В. Г. Железнодорожные станции и узлы / В. Г. Шубко, Н. В. Правдин, Е. В. Архангельский, В. Я. Болотный, В. А. Бураков, С. П. Вакуленко, В. А. Персианов; под ред. В. Г. Шубко, Н. В. Правдина. – М.: МПС РФ, 2002. – 368 с.

10. Бройтман Э. З. Железнодорожные станции и узлы / Э. З. Бройтман. – М.: Маршрут, 2004. – 345 с.

11. Числов О. Н. Теоретические основы рационального размещения элементов железнодорожных промышленных транспортно-технологических систем: дис. … докт. техн.наук, специальность: 05.22.01 / О. Н. Числов. – М.: РУТ-МИИТ, 2009. – 368 с.

12. Кочнев Ф. П. Управление эксплуатационной работой железных дорог / Ф. П. Кочнев, И. Б. Сотников. – М.: Транспорт, 1990. – 424 с.

13. Кудрявцев В. А. Основы эксплуатационной работы железных дорог / В. А. Кудрявцев, В. И. Ковалев, А. П. Кузнецов и др.; под ред. В. А. Кудрявцева.– М.: Профобриздат, 2002. – 352 с.

14. Белозеров В. Л. Пути ликвидации «пробок» на подходах к морским и речным портам / В. Л. Белозеров, А. М. Тюфаев, И. В. Серяпова, П. В. Куренков // Экономика железных дорог. – 2005. – № 8. – С. 76–83.

15. Куренков П. В. Логистика международных интермодальных грузовых перевозок / П. В. Куренков, А. А. Сафронова, Д. Г. Кахриманова // Логистика. – 2018. – № 3 (136). – С. 24–27.

16. Балалаев А. С. Пути повышения эффективности взаимодействия железнодорожного и морского транспорта / А. С. Балалаев, П. В. Куренков // Экономика железных дорог. – 2010. – № 10. – С. 72–79.

17. Мохонько В. П. Ситуационное управление перевозочным процессом / В. П. Мохонько, В. С. Исаков, П. В. Куренков // Транспорт: наука, техника, управление: Сб. ОИ/ВИНИТИ. – 2004. – № 11. – С. 14–16.

18. Куренков П. В. Синхромодальные перевозки и тримодальные терминалы как перспективные направления развития логистических технологий / П. В. Куренков, Д. А. Преображенский, А. В. Астафьев, Д. Г. Кахриманова, С. А. Волкова // Транспорт: наука, техника, управление: Сб. ОИ/ВИНИТИ. – 2018. – № 11. – С. 13–17.

19. Правдин Н. В. Проектирование инфраструктуры железнодорожного транспорта (станции, железнодорожные и транспортные узлы) / Н. В. Правдин, С. П. Вакуленко, А. К. Головнич и др.; под ред. Н. В. Правдина, С. П. Вакуленко. – М.: Учеб.-метод. центр по образованию на ж.-д. транспорте, 2012. – 1086 с.

20. Титова Т. С. Экологические проблемы транспортного строительства / Т. С. Титова, А. А. Степанова // Техносферная и экологическая безопасность на транспорте (ТЭБТРАНС–2014): Материалы IV Междунар. науч.-практич. конференции. – СПб.: ПГУПС, 2014. – С. 202–204.

21. Косенко С. А. Оценка стоимости жизненного цикла верхнего строения пути для различных ремонтных схем и промежуточных рельсовых скреплений / С. А. Косенко, С. С. Акимов, С. В. Богданович, И. К. Соколовский // Вестник Сиб. гос. ун-та путей сообщения. – 2020. – № 2 (53). – С. 92–100.

22. Косенко С. А. Оценка стоимости жизненного цикла верхнего строения пути при продлении межремонтного периода / С. А. Косенко, С. С. Акимов, С. В. Богданович, И. К. Соколовский // Вестник Сиб. гос. ун-та путей сообщения. – 2021. – № 1 (56). – С. 71–78.

23. Корниенко К. И. Совершенствование методики имитационного моделирования заполнения пути

сортировочного парка / К. И. Корниенко // Транспорт Урала. – 2018. – № 2 (57). – С. 35–42. – https://doi.org/10.20291/1815-9400-2018-2-35-42

24. Корниенко К. И. Исследование влияния изменения профиля пути сортировочного парка на качество его заполнения при расформировании составов / К. И. Корниенко // Вестник Урал. гос. ун-та путей сообщения. – 2018. – № 3 (39). – С. 33–42. – https://doi.org/10.20291/1815-9400-2018-2-35-42

25. Покровская О. Д. Определение параметров терминальной сети региона (на примере Кемеровской области) / О. Д. Покровская // Транспорт Урала. – 2012. – № 1 (32). – С. 93–97.

26. Покровская О. Д. Терминалистика – организация и управление в транспортных узлах / О. Д. Покровская, Е. К. Коровяковский // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2016. – Т. 13. – Вып. 4 (49). – С. 509–520.

27. Титова Т. С. Междисциплинарное положение теории терминалистики / Т. С. Титова, О. Д. Покровская // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2018. – Т. 15. – Вып. 2. – С. 248–260.

28. Ковалев Г. А. Оценка потенциала логистической инфраструктуры холдинга ОАО «Российские железные дороги» / А. Г. Ковалев // Вестник РИНХ. – № 3 (47). – Ростов-н./Д.: РИНХ, 2014. – С. 33–41.

29. Логинов С. И. Определение ориентировочной стоимости строительства железнодорожных станций и узлов по укрупненным показателям: учеб.-метод. пособие / С. И. Логинов, Ю. И. Ефименко, А. А. Краснощек. – СПб.: ПГУПС, 2017. – 36 с.

30. Терешина Н. П. Экономика железнодорожного транспорта / Н. П. Терешина, В. Г. Галабурда, В. А. Токарев и др.; под ред. Н. И. Терешиной, Б. М. Лапидуса. – М.: Учеб.-метод. центр по образованию на ж.-д. транспорте, 2011. – 676 с.

31. Титова Т. С. Об объективной оценке акустического воздействия / Т. С. Титова, О. И. Копытенкова, Д. Е. Курепин // Железнодорожный транспорт. – 2017. – № 5. – С. 75–77.

32. Агунов А. В. О построении систем управления качеством электроэнергии / А. В. Агунов, Т. С. Титова, В. А. Кручек // Электротехника. – 2016. – № 5. – С. 14–19.

33. Панова Ю. Н. Экологические аспекты внедрения тыловых терминалов / Ю. Н. Панова, Е. К. Коровяковский, Т. С. Титова // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2011. – Вып. 3 (28). – С. 15–23.

Дата поступления: 14.11.2021
Решение о публикации: 25.11.2021

Контактная информация:
ПОКРОВСКАЯ Оксана Дмитриевна – д-р техн. наук, проф., и. о. зав. кафедрой; insight1986@inbox.ru
СУГОРОВСКИЙ Артем Васильевич – канд. техн. наук, доц.; c123945@yandex.ru
РЫБАКОВА Ирина Васильевна – аспирант; senchilo-ira@mail.ru
МАРЧЕНКО Максим Александрович – аспирант; maks.marchenko1998@mail.ru
ШЕВЕРДОВА Мария Вячеславовна – аспирант; maria.bayern2017@yandex.ru

Organisational features in the work of a railway station complex during the launch of "Aeroexpress"

O. D. Pokrovskaya, A. V. Sugorovskiy, I. V. Rybakova, M. A. Marchenko, M. V. Sheverdova

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

For citation: Pokrovskaya O. D., Sugorovskiy A. V., Rybakova I. V., Marchenko M. A., Sheverdova M. V. Organisational features in the work of a railway station complex during the launch of "Aeroexpress". *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2021, vol. 18, iss. 4, pp. 515–527. (In Russian)
DOI: 10.20295/1815-588X-2021-4-515-527

Summary

Objective: To consider the change in the operation of the St. Petersburg transport hub station and the railway station when launching the Aeroexpress. **Methods:** Means and methods of logistics, general theory of systems, terminalistics, system and economic analysis, as well as management of operational work of railways are used. **Results:** Alternative options for changing the operation of the station and the station at the launch of the Aeroexpress are proposed in the conditions of the St. Petersburg transport hub station. The first option involves organizing the reception and departure of Aeroexpress trains on the existing track intended for suburban traffic. The second option assumes to specialize for the reception and departure of fast suburban electric trains in communication with Pulkovo airport the existing apron electrified receiving and receiving track in a complex with an island passenger platform located nearby. When passenger flows change at the station complex, the number of ticket offices is calculated. The issues of organizing service activities for servicing Aeroexpress passengers at the station complex are considered. Based on the economic calculations carried out and based on the results of the survey of potential Aeroexpress passengers, practical recommendations were made for launching an Aeroexpress train in the conditions of the St. Petersburg transport hub. **Practical importance:** The results obtained can be applied in the implementation of the concept of development of the St. Petersburg transport hub, in the design of individual elements and devices of the railway hub to improve the organization of passenger transportation, as well as in determining the prospects for the development of railway complexes.

Keywords: Aeroexpress, development of the transport hub, organization of the work of the station complex, service activities at the station complex.

References

1. Pokrovskaya O. D. & Samuilov V. M. Mezhdunarodnaya logisitika Transsibirskoy magistraly: ispolzovaniye tranzitnogo potentsiala Rossii [International logistics of the Trans-Siberian Railroad: using transit capacity of Russia]. *Innovatsionniy transport* [*Innovative transport*], 2016, no. 3 (21), pp. 3–7. (In Russian)

2. Transportno-peresadochnyy uzel v Sertolovo za 5,75 mlrd rubley postroyat k 2024 g. [Multimodal passenger transport hub in Sertolovo for 5,75 billion rubles will be built by 2024]. *Interfaks-Severo-Zapad*, September 21, 2021. Available at: https://www.interfax-russia.ru/northwest/news/transportno-peresadochnyy-uzel-v-sertolovo-za-5-75-mlrd-rubley-postroyat-k-2024 (accessed: November 03, 2021). (In Russian)

3. *Ofitsial'nyy portal aeroporta Pulkovo* [*The official internet portal of Pulkovo airport*]. Available at: https://pulkovoairport.ru/about/press_center/news/ (accessed: November 03, 2021). (In Russian)

4. *Direktsiya po razvitiyu transportnoy infrastruktury Sankt-Peterburga i Leningradskoy oblasti* [*Directorate*

for Development of the Saint Petersburg and Leningrad Region Transport System]. Available at: https://spbtrd.ru/projects/hubs/hub-south-east-kudrovo/(accessed: November 03, 2021). (In Russian)

5. *Kontseptsiya po razvitiyu zheleznodorozhnoy infrastruktury v tselyakh organizatsii prigorodnykh i vnutrigorodskikh passazhirskikh perevozok v Sankt-Peterburgskom zheleznodorozhnom uzle* [*Development programme of railway infrastructure for the purpose of organizing suburban and intracity passenger traffic in the Saint Petersburg railway hub*]. Moscow, JSC "Russian Railways" Publ., 2019, 105 p. (In Russian)

6. *Kontseptsiya razvitiya transportnoy sistemy Sankt-Peterburga. 2017–2038 gg. (perspektiva do 2048 g.)* [*Development programme of the Saint Petersburg railway infrastructure for 2017–2038 ("Horizon 2048")*]. Available at: http://krti.gov.spb.ru/media/uploads/userfiles/2017/03/22/Презентация_материалов_КТС.pdf (accessed: November 03, 2021). (In Russian)

7. *Programma razvitiya transportnoy sistemy Sankt-Peterburga i Leningradskoy oblasti na period do 2020* [*Development programme of the Saint Petersburg and Leningrad region railway infrastructure for the period up to 2020*]. Available at: https://spbtrd.ru (accessed: November 03, 2021). (In Russian)

8. *Peresadka na elektrichki. RZHD planiruyut peresadit' na elektrichki zhiteley Peterburga* [*Changing for an urban train. "Russian Railways" is planning to transship Saint Petersburg residents to urban trains*]. Available at: https://www.dp.ru (accessed: November 03, 2021). (In Russian)

9. Shubko V. G., Pravdin N. V., Arkhangel'skiy E. V., Bolotnyy V. Ya., Burakov V. A., Vakulenko S. P. & Persianov V. A. *Zheleznodorozhnyye stantsii i uzly* [*Railway stations and junctions*]. Ed. by V. G. Shubko, N. V. Pravdin. Moscow, RF Ministry of Transport Publ., 2002, 368 p. (In Russian)

10. Broytman E. Z. *Zheleznodorozhniye stantsii i uzly* [*Railway stations and transport nodes*]. Moscow, Marshrut Publ., 2004, 324 p. (In Russian)

11. Chislov O. N. *Teoreticheskiye osnovy ratsionalnogo razmeshcheniya elementov zheleznodorozhnykh promyshlennykh transportno-tekhnologicheskykh system* [*Theoretical foundations of rational distribution of elements of railway industrial transportmanufacturing systems*]. Diss. D. Eng. Sci., specialty: 05.22.01. Moscow, RUT-MIIT Publ., 2009, 369 p. (In Russian)

12. Kochnev F. P. & Sotnikov I. B. *Upravleniye ekspluatatsionnoy rabotoy zheleznykh dorog* [*Railroad field operation management*]. Moscow, Transport Publ., 1990, 424 p. (In Russian)

13. Kudryavtsev V. A., Kovalev V. I., Kuznetsov A. P. et al. *Osnovy ekspluatatsionnoy raboty zheleznykh dorog* [*The foundations of railroad field operation*]. Ed. by V. A. Kudryavtsev. Moscow, Profobrizdat Publ., 2002, 352 p. (In Russian)

14. Belozerov V. L., Tyufayev A. M., Seryapova I. V. & Kurenkov P. V. Puti likvidatsii "probok" na podkhodakh k morskim i rechnym portam [Ways of eliminating 'traffic jams' on the approaches to sea and river ports]. *Ekonomika zheleznykh dorog* [*Railway Economy*], 2005, no. 8, pp. 76–83. (In Russian)

15. Kurenkov P. V., Safronova A. A. & Kakhrimanova D. G. Logistika mezhdunarodnykh intermodal'nykh gruzovykh perevozok [Logistics of international intermodal freight transport]. *Logistika* [*Logistics*], 2018, no. 3, pp. 24–27. (In Russian)

16. Balalaev A. S. & Kurenkov P. V. Puti povysheniya effektivnosti vzaimodeystviya zheleznodorozhnogo i morskogo transporta [Ways to improve the railway and sea transport interaction]. *Ekonomika zheleznykh dorog* [*Railway Economy*], 2010, no. 10, p. 72–79. (In Russian)

17. Mokhon'ko V. P., Isakov V. S. & Kurenkov P. V. Situatsionnoye upravleniye perevozochnym protsessom [Situational management of the transportation process]. *Transport: nauka, tekhnika, upravleniye.* Sb. OI/VINITI [*Transport: science, equipment, management.* Collected volume of OI/VINITI (Russian Institute for Scientific and Technical Information)], 2004, no. 11, pp. 14–16. (In Russian)

18. Kurenkov P. V., Preobrazhenskiy D. A., Astaf'yev A. V., Kakhrimanova D. G. & Volkova S. A. Sinkhromodal'nyye perevozki i trimodal'nyye terminaly kak perspektivnyye napravleniya razvitiya logisticheskikh tekhnologiy [Synchromodal transportation and trimodal terminals as perspective directions for the development of logistics technologies]. *Transport: nauka, tekhnika, upravleniye.* Sb. OI/VINITI [*Transport: science, technology, management.* Collected volume of OI/VINITI (Russian Institute for Scientific and Technical Information)], 2018, no. 11, pp. 13–17. (In Russian)

19. Pravdin N. V., Vakulenko S. P., Golovnich A. K. et al. *Proyektirovaniye infrastruktury zheleznodorozhnogo transporta (stantsii, zheleznodorozhnyye i transportnyye uzly)* [*Designing the railway transport infrastructure (stations, railway and transport hubs)*]. Ed. by N. V. Pravdin, S. P. Vakulenko. Moscow, Training and Methodology Centre for Railway Transport Publ., 2012, 1086 p. (In Russian)

20. Titova T. S. & Stepanova A. A. Ekologicheskie problemy transportnogo stroitel'stva [Environmental problems in transport construction]. *Tekhnosfernaia i ekologicheskaia bezopasnost' na transporte* (*TEBTRANS–2014*) [*Technogenic and environmental safety in transport (TEBTRANS–2014)*]. *Materialy IV Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [*Materials of the 4th International research and practice conference*]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2014, pp. 202–204. (In Russian)

21. Kosenko S. A., Akimov S. S., Bogdanovich S. V. & Sokolovskiy I. K. Otsenka stoimosti zhiznennogo tsikla verkhnego stroyeniya puti dlya razlichnykh remontnykh skhem i promezhutochnykh rel'sovykh skrepleniy [Life cycle cost estimation of the permanent way for various repair schemes and rail fastenings]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* [*The Siberian Transport University Bulletin*], 2020, no. 2 (53), p. 92–100. (In Russian)

22. Kosenko S. A., Akimov S. S., Bogdanovich S. V. & Sokolovskiy I. K. Otsenka stoimosti zhiznennogo tsikla verkhnego stroyeniya puti pri prodlenii mezhremontnogo perioda [Life cycle cost estimation of the permanent way when extending the overhaul period]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* [*The Siberian Transport University Bulletin*], 2021, no. 1 (56), pp. 71–78. (In Russian)

23. Kornienko K. I. Sovershenstvovaniye metodiki imitatsionnogo modelirovaniya zapolneniya puti sortirovochnogo parka [Improvement of simulation modeling of classification tracks filling]. *Transport Urala* [*Transport of the Urals*], 2018, no. 2 (57), pp. 35–42. (In Russian) https://doi.org/10.20291/1815-9400-2018-2-35-42

24. Kornienko K. I. Issledovaniye vliyaniya izmeneniya profilya puti sortirovochnogo parka na kachestvo yego zapolneniya pri rasformirovanii sostavov [Studying the impact of changes in the sorting yard track profile on its filling while trains splitting]. *Vestnik Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya (Vestnik UrGUPS)* [*Herald of the Ural State University of Railway Transport*], 2018, no. 3 (39), pp. 33–42. (In Russian) https://doi.org/10.20291/1815-9400-2018-2-35-42

25. Pokrovskaya O. D. Opredeleniye parametrov terminal'noy seti regiona (na primere Kemerovskoy oblasti) [Determination of the regional terminal network parameters (examplifi ed by the Kemerovo region)]. *Transport Urala* [*Transport of the Urals*], 2012, no. 1 (32), pp. 93–97. (In Russian)

26. Pokrovskaya O. D. & Koroviakovskii E. K. Terminalistika – organizatsiia i upravlenie v transportnykh uzlakh [Terminalistics: organisation and management in transportation hubs]. *Izvestiia Petersburgskogo universiteta putei soobshcheniia* [*Proceedings of Petersburg Transport University*], 2016, vol. 13, iss. 4 (49), pp. 509–520. (In Russian)

27. Titova T. S. & Pokrovskaya O. D. Mezhdistsiplinarnoe polozhenie teorii terminalistiki [Inter-disciplinary position of the terminalistics theory]. *Izvestiia Petersburgskogo universiteta putei soobshcheniia* [*Proceedings of Petersburg Transport University*], 2018, vol. 15, iss. 2, pp. 248–260. (In Russian)

28. Kovalyov G. A. Otsenka potentsiala logisticheskoy infrastruktury kholdinga OAO "Rossiyskiye zheleznyye dorogi" [Assessment of the potential of logistics infrastructure of holding "Russian railways"]. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo ekonomicheskogo universiteta* [*Reporter of Rostov State University of economics*]. Rostov-n./D., RINX [Rostov State University of economics] Publ., 2014, no. 3 (47), pp. 33–41. (In Russian)

29. Loginov S. I., Efimenko Yu. I. & Krasnoshchek A. A. *Opredeleniye orientirovochnoy stoimosty stroitelstva zheleznodorozhnykh stantsiy i uzlov po ukrupnennym pokazatelyam.* Uchebno-metodicheskoye posobiye [*Aggregate-based assessment of estimated cost of railway stations and junctions.* Guidelines]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2016, 36 p. (In Russian)

30. Tereshina N. P., Galaburda V. G., Tokarev V. A. et al. *Ekonomika zheleznodorozhnogo transporta* [*Railway transport economy*]. Ed. by N. P. Tereshina, B. M. Lapidus. Moscow, Uchebno-metodicheskii tsentr po obrazovaniiu na zheleznodorozhnom transporte [Training and Methodology Centre for Railway Transport] Publ., 2011, 676 p. (In Russian)

31. Titova T. S., Kopytenkova O. I. & Kurepin D. E. Ob ob"yektivnoy otsenke akusticheskogo vozdeystviya [Acoustic impact assessment]. *Zheleznodorozhnyy transport* [*Railway transport*], 2017, no. 5, pp. 75–77. (In Russian)

32. Agunov A. V., Titova T. S. & Kruchek V. A. O postroyenii sistem upravleniya kachestvom elektroenergii [On the construction of power quality control systems]. *Elektrotekhnika* [*Electrical engineering*], 2016, no. 5, pp. 14–19. (In Russian)

33. Panova Yu. N., Korovyakovsky E. K. & Titova T. S. Ekologicheskiye aspekty vnedreniya tylovykh terminalov [Ecological aspects of inland terminal implementation]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [*Proceedings of Petersburg Transport University*], 2011, iss. 3 (28), pp. 15–23. (In Russian)

Received: November 14, 2021
Accepted: November 25, 2021

Author's information:
Oksana D. POKROVSKAYA – D. Sci. in Engineering, Professor;
insight1986@inbox.ru
Artem V. SUGOROVSKY – PhD in Engineering, Associate Professor;
123945@yandex.ru
Irina V. RYBAKOVA – Postgraduate Student;
senchilo-ira@mail.ru
Maxim A. MARCHENKO – Postgraduate Student;
maks.marchenko1998@mail.ru
Maria V. SHEVERDOVA – Postgraduate Student;
maria.bayern2017@yandex.ru

УДК 656.224

Определение потребных размеров движения пригородных поездов с учетом суточной и внутрисуточной неравномерностей распределения пассажиропотока*

А. Г. Филиппов, С. С. Смирнов, Д. В. Язев, И. П. Александров

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

Для цитирования: *Филиппов А. Г., Смирнов С. С., Язев Д. В., Александров И. П.* Определение потребных размеров движения пригородных поездов с учетом суточной и внутрисуточной неравномерностей распределения пассажиропотока // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2021. – Т. 18. – Вып. 4. – С. 528–536.
DOI: 10.20295/1815-588X-2021-4-528-536

Аннотация

Цель: Автоматизация обработки данных о пассажиропотоках на произвольном направлении с целью определения количества «ниток» в графике движения поездов для пригородных пассажирских перевозок на перспективу. Проверка достаточности существующей инфраструктуры и проектных решений по реконструкции в части обеспечения необходимой пропускной способности железнодорожных линий. **Методы:** Расчет количества поездов осуществляется математическим моделированием распределения пассажиропотока по часам суток в каждый день недели исходного месяца. Выявление поездов не ежедневного назначения производится сравнением результатов расчета на каждый день недели. **Результаты:** Разработан алгоритм для выполнения расчета на ЭВМ перспективных размеров движения поездов в пригородном сообщении, учитывающий неравномерность распределения пассажиропотока по часам суток и дням недели. **Практическая значимость:** Получаемые при помощи представленного алгоритма данные позволяют упростить разработку перспективных графиков движения поездов с учетом потребностей населения в перевозках. Результаты работы могут быть использованы в технико-экономических обоснованиях реконструкции путевого развития станций и пассажирских устройств, а также служить основанием для технического перевооружения линий с целью увеличения их пропускной способности (замена средств сигнализации и связи, строительство вторых главных путей, переустройство горловин станций и т. п.). Результаты расчета также позволяют выявить графиковые «нитки» для съема поездов в дни недели, когда они не востребованы, но при этом принимать во внимание поезда не ежедневного назначения при разработке нормативного графика движения поездов. Форма представления результатов учитывает пространственную неравномерность пассажиропотока и дает возможность выделить зонные поезда.

Ключевые слова: Размеры движения, неравномерность, пассажиропоток, пропускная способность, зонный поезд, график движения поездов, технико-экономическое обоснование.

Введение

Пригородные перевозки предъявляют высокие требования к проработке графика движения поездов ввиду большого количества особенностей, не присущих другим видам дви-

* Статья опубликована при поддержке Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I» инициативных научных работ, выполняемых студенческими научными коллективами.

жения поездов. К таким особенностям относятся:

1) сосредоточение большого количества пассажиров в сравнительно небольшом числе пунктов;

2) резкое падение густоты пассажиропотока по мере удаления от головной станции;

3) неравномерность перевозок по сезонам, дням недели и часам суток;

4) необходимость частых остановок в пунктах, не являющихся раздельными [1].

Сравнительно небольшие участки обращения (не свыше 200 км [2]) тоже можно отнести к особенностям пригородных перевозок. Требуется, с одной стороны, удовлетворить потребности населения в перевозках и сократить время ожидания поезда, а с другой – рационально определить размеры движения поездов по зонам, чтобы не допустить ни перенаселенности поездов, ни следования поездов с незначительным числом пассажиров. Организовать движение поездов таким образом, чтобы выполнить указанные требования, затруднительно из-за свойственной пригородным перевозкам пространственной неравномерности [3]. Перенаселенность поездов приводит к задержкам поездов при посадке–высадке пассажиров и вызывает нарушение графика движения поездов, что недопустимо из-за серьезного влияния на безопасность движения и бесперебойность работы железнодорожного транспорта [4]. Поэтому не теряет актуальности задача определения потребных размеров движения пригородных поездов.

В настоящей статье показаны этапы разработки алгоритма решения рассматриваемой задачи.

Особенности расчета количества поездов в пригородном сообщении

По железным дорогам России обращаются пригородные поезда различного рода тяги. Обозначенный расчет имеет смысл, как минимум, при средних (от 8 пар поездов) размерах движения. В России все участки со значительным пригородным движением электрифицированы. В противном случае используются дизель-поезда, ввиду того, что требованиям организации пригородных перевозок лучше всего удовлетворяют моторвагонные поезда [5]. Поэтому здесь и далее речь пойдет только о моторвагонных поездах без учета возможной организации пригородного движения локомотивной тягой.

Расчетную населенность w пригородного поезда следует принимать по нормам, приведенным в [6]. Учитывая разнообразие обращающегося подвижного состава, она для каждого типа моторвагонного поезда будет своя и зависит не только от типа, но и от количества вагонов в составе. Тогда расчетное количество поездов, которыми перевозится a пассажиров с i-го до j-го остановочного пункта, в общем случае составит

$$z = a_{ij} / w. \qquad (1)$$

Учет внутрисуточной неравномерности пассажиропотока

Пассажирские перевозки в пригородном сообщении отличаются неравномерностью прибытия и отправления пассажиров в различные часы суток. Например, в утренние часы будних дней пассажиры устремляются из агломерации в город, а в вечернее время – обратно. Поэтому имеет смысл учитывать внутрисуточную неравномерность пассажиропотока отдельно для будних (с понедельника по четверг), предвыходных и выходных дней [7, 8]. Один из примеров распределения прибытия и отправления пассажиров в течение суток по головной станции показан на рис. 1.

Если принять суточный пассажиропоток за единицу, то целесообразно отразить внутрисуточную неравномерность введением коэффициента k_0, ее характеризующую. Значение этого коэффициента равно доле прибытия или отправления пассажиропотока (от суточных размеров) за рассматриваемый час и определяется обсле-

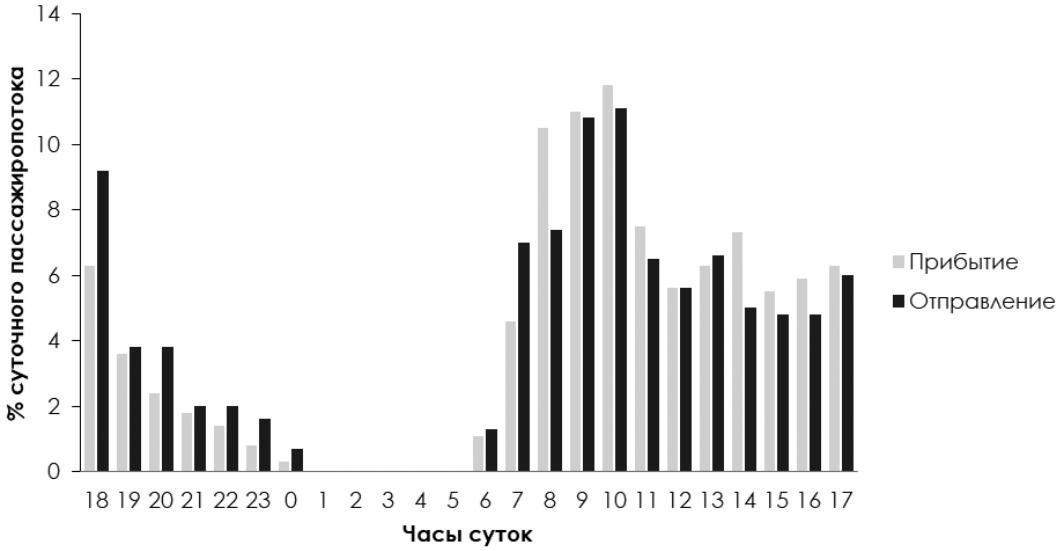


Рис. 1. Диаграмма распределения пассажиропотоков на головной станции

дованием пассажиропотоков. Принимая во внимание коэффициент внутрисуточной неравномерности, количество пассажиров, перевозимых с *i*-го до *j*-го остановочного пункта поездами, прибывающими на головную станцию или отправляющимися с нее в рассматриваемый час суток, составит

$$a_{ij(\text{ч})} = a_{ij(\text{с})} k_0. \qquad (2)$$

Учет суточной неравномерности пассажиропотока

Колебания пассажиропотока в различные дни недели значительны. Это связано в основном с общепринятым графиком работы большинства предприятий и учебных заведений (5 рабочих дней и 2 выходных), что порождает массовый выезд пассажиров из города в пятницу и субботу, а также массовое их возвращение в воскресенье и частично в понедельник. Максимальный пассажиропоток наблюдается в субботу и воскресенье [9]. Колебания пассажиропотока на одном из направлений Санкт-Петербургского железнодорожного узла отражены на рис. 2.

Из диаграмм, представленных на рис. 2, видно, что с понедельника по четверг количество отправленных пассажиров изменяется не более чем на 10 % от минимального их числа в указанные дни, что подтверждает целесообразность расчета размеров движения на эти дни в совокупности. Учет пассажиропотока по дням недели следует производить при помощи коэффициента, характеризующего долю месячного пассажиропотока, приходящегося на рассматриваемый день недели. Сделать это возможно, если соотнести количество перевозимых пассажиров к общему знаменателю, за который при разработке алгоритма принято среднее количество отправляемых пассажиров в будние дни. Данные о среднесуточном отправлении пассажиров с каждого остановочного пункта представляются в виде вектора A', в котором a_n – количество отправленных пассажиров в среднем за месяц в n-й день недели ($n = 1$ для понедельника, $n = 7$ для воскресенья):

$$A' = (a_1 \quad a_2 \quad \cdots \quad a_n \quad \cdots \quad a_7). \qquad (3)$$

Данные об отправлении пассажиров по дням недели в формах статистической отчетности не подразумевают разделения по направлению, что позволяет принимать во внимание только неравномерность, отраженную на головных и конечных станциях.

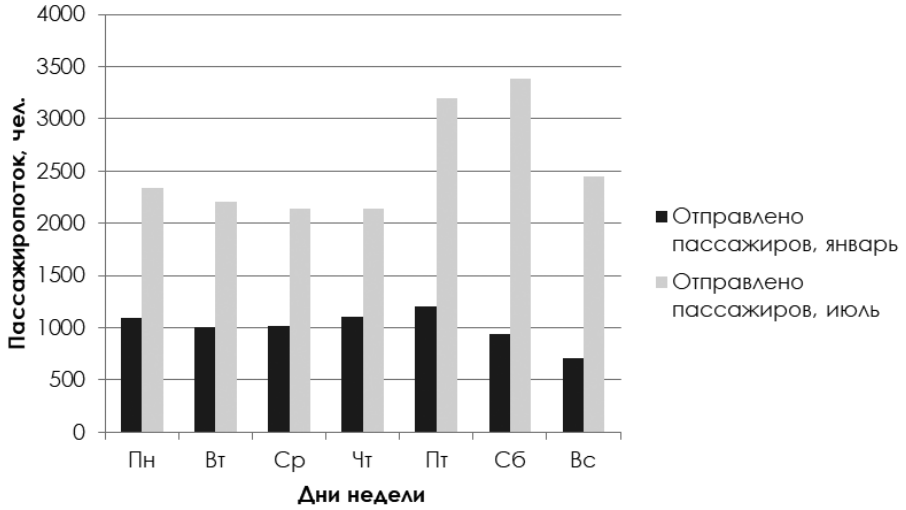


Рис. 2. Распределение количества отправленных пассажиров с головной станции по дням недели в январе и июне 2019 г.

Отношение количества пассажиров, перевезенных в рассматриваемый день недели, к среднесуточному количеству пассажиров, отправленных в будние дни с головной или конечной станции, равно коэффициенту суточной неравномерности $k_{n(\text{с})}$, поэтому для определения количества пассажиров, перевозимых с *i*-го до *j*-го остановочного пункта в этот день, составит

$$a_{ij(\text{с})} = a_{ij(\text{м})} k_{n(\text{с})} \Big/ \sum_{f=1}^{7} (k_{f(\text{с})} m_f), \qquad (4)$$

где $a_{ij(\text{м})}$ – количество перевезенных пассажиров с *i*-го до *j*-го остановочного пункта в рассматриваемом месяце; m_f – количество *f*-х дней в обследуемом месяце; $k_{n(\text{с})}$ – коэффициент суточной неравномерности для описываемого дня (для буднего дня, кроме пятницы, равен единице).

Объединение исходных данных в единый алгоритм

Корреспонденция пассажиропотоков в общем виде представляется квадратной матрицей отправления пассажиров *A* размерности *n*, численно равной количеству остановочных пунктов на исследуемом направлении, с нулевыми элементами по главной диагонали. В ней элементы a_{ij} – количество пассажиров, перевезенных от *i*-го до *j*-го остановочного пункта. Причем, если элементы находятся выше главной диагонали – они относятся к перевозкам в прямом направлении, а наоборот – в обратном. Для создания алгоритма такой вид данных неудобен, в связи с чем был разработан алгоритм разделения сведений о пассажиропотоке на прямое и обратное направления [10]. Упрощение выражается в разделении исходной матрицы на две – для прямого (матрица *B*) и обратного (матрица *C*) направлений, элементы которых сформированы по следующим условиям:

$$b_{ij} = a_{ij}, \begin{cases} i \geq j \\ b_{ij} = 0 \end{cases}; \; c_{ij} = a_{ij}, \begin{cases} i \leq j \\ c_{ij} = 0 \end{cases}.$$

Количество пассажиров в поездах на момент отправления с *i*-го остановочного пункта в прямом направлении равно разности количества вошедших и вышедших на нем с учетом уже находившихся в составах (кроме случая отправления с головной станции):

$$a_{ij(\text{м})} = \sum_{j=1}^{n} b_{ij} - \sum_{i=1}^{n} b_{ij} + a_{i-1\,j(\text{м})}, \; i = \overline{2,n}. \quad (5)$$

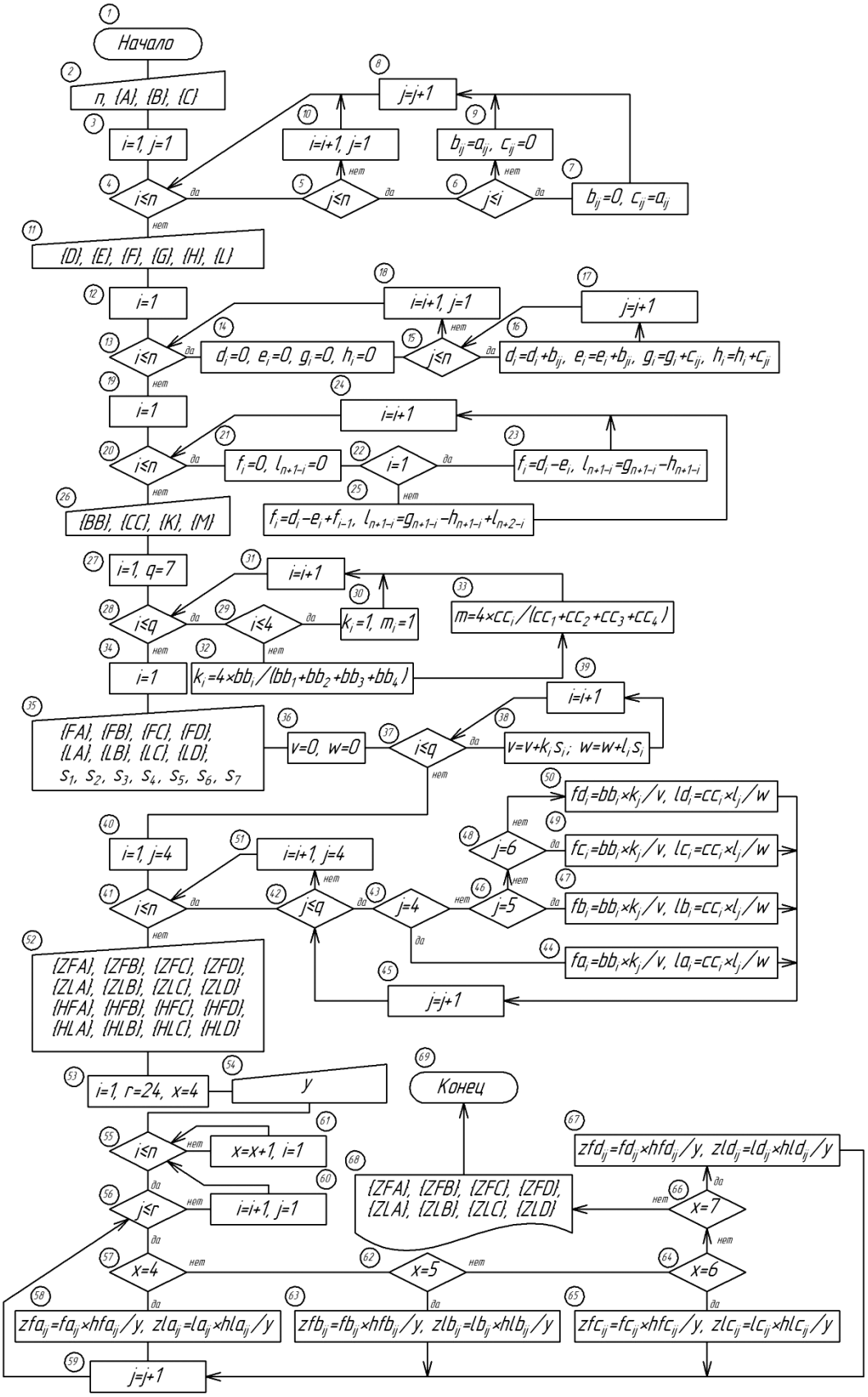


Рис. 3. Алгоритм выполнения расчетов на ЭВМ

Количество пассажиров в поездах на момент отправления с головной станции равно количеству вошедших на ней:

$$a_{ij(\text{м})} = \sum_{j=1}^{n} b_{ij},\ i = 1. \qquad (6)$$

Формулы (5) и (6) справедливы и для обратного направления при замене элементов матрицы *B* на элементы матрицы *C*.

Из (1), (2), (4) и (5) количество поездов в час рассматриваемого дня недели, которыми требуется перевезти пассажиров в прямом направлении, составит

$$z_0 = \left(\sum_{j=1}^{n} b_{ij} - \sum_{i=1}^{n} b_{ij} + a_{i-1\,j(\text{м})} \right) k_{n(\text{с})} k_0 \Bigg/ \Bigg/ \left(w \sum_{f=1}^{7} (k_{f(\text{с})} m_f) \right). \qquad (7)$$

Для случая отправления с головной станции множитель (5) заменяется на (6). Формула (7) справедлива и для обратного направления при замене элементов матрицы *B* на элементы матрицы *C*.

Алгоритм для выполнения программы на ЭВМ представлен на рис. 3. В указанном алгоритме исходными данными являются матрица *A* размерности *n*, векторы *BB* и *CC* размерности *q*, содержащие данные о суточной неравномерности отправления пассажиров с головной и конечной станций по форме, определенной в векторе (3). Векторы *HFA–HFD* и *HLA–HLD* размерности *r* содержат коэффициенты внутрисуточной неравномерности на каждый час суток в прямом и обратном направлениях. Значения элементов s_1–s_7 отражают число *n*-х дней в месяце, учтенных вектором (3). Все остальные массивы объявляются пустыми и заполняются в ходе выполнения операций по заданному алгоритму. Результатом выполнения алгоритма является вывод матриц *ZFA–ZFD* размерности *n*, *r* с данными о потребных размерах движения в прямом направлении в будни, пятницу, субботу и воскресенье исследуемого месяца, а также матриц *ZLA…ZLD* той же размерности, содержащих указанные выше данные для обратного направления.

Заключение

Разработанный алгоритм позволяет выполнять расчеты на ЭВМ и выводить результаты в форме таблиц с указанием необходимого количества поездов на каждом участке. Методика расчета позволяет выявить участки, где потребуется повышенная пропускная способность в перспективе на основании исходных данных, отражающих прогнозные пассажиропотоки. Поскольку потребная пропускная способность определяет техническое оснащение железных дорог, производимые по ней расчеты могут служить технико-экономическим обоснованием необходимости развития инфраструктуры.

Библиографический список

1. Зубков И. И. Организация движения на железнодорожном транспорте: учебник для технич. школ ж.-д. транспорта. – 5-е изд., перераб. и доп. / И. И. Зубков, А. К. Угрюмов, А. П. Романов. – М.: Транспорт, 1981. – 232 с.

2. Федеральный закон от 10.01.2003 г. № 18-ФЗ. Устав железнодорожного транспорта Российской Федерации. – URL: http://www.consultant.ru (дата обращения: 05.10.2021).

3. Грачев А. А. Проектирование технологий организации пригородных перевозок: учеб. пособие / А. А. Грачев, А. Г. Котенко, В. А. Кудрявцев, А. С. Шумари, И. Н. Шутов. – СПб.: ПГУПС, 2009. – 54 с.

4. Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации. – М.: Моркнига, 2020. – 608 с.

5. Технический справочник железнодорожника. – Т. 13 / под ред. Р. И. Робеля. – М.: Гос. транспорт. ж.-д. изд-во, 1956. – 739 с.

6. ГОСТ 34530–2019. Транспорт железнодорожный. Основные понятия. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2019. – 49 с.

7. Кочнев Ф. П. Оптимальные параметры пригородных пассажирских перевозок / Ф. П. Кочнев. – М.: Транспорт, 1975. – 304 с.

8. Кудрявцев В. А. Основы эксплуатационной работы железных дорог: учеб. пособие для студ. учреждений средн. профессионального образования / В. А. Кудрявцев, В. И. Ковалев, А. П. Кузнецов и др.; под ред. В. А. Кудрявцева. – 2-е изд., стер. – М.: Изд. центр «Академия», 2005. – 352 с.

9. Правдин Н. В. Пригородные зоны и зоны тяготения на железнодорожном транспорте (для условий средних и больших городов Республики Беларусь) / Н. В. Правдин, Т. А. Влясюк. – Гомель: БелГУТ, 2007. – 207 с.

10. Заболотская Е. А. Разработка алгоритма автоматизированной обработки данных по пассажиропотокам и его программная реализация / Е. А. Заболотская, Д. В. Изимов, С. С. Смирнов, Д. В. Язев, А. В. Сугоровский, А. Г. Филиппов // Транспорт: проблемы, идеи, перспективы: сб. трудов LXXX Всерос. науч.-технич. конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – СПб.: ПГУПС, 2020. – С. 181–184.

Дата поступления: 13.10.2021
Решение о публикации: 24.10.2021

Контактная информация:
ФИЛИППОВ Антон Геннадьевич – канд. техн. наук, доц.; tigropard10@mail.ru
СМИРНОВ Сергей Сергеевич – студент; sss1999@inbox.ru
ЯЗЕВ Денис Викторович – студент; denchik_yazik167@mail.ru
АЛЕКСАНДРОВ Игорь Павлович – студент; aleksandrovigor2000@mail.ru

Determination of the required amount of traffic of suburban trains, taking into account all-day and intraday irregularities in passenger traffic distribution*

A. G. Filippov, S. S. Smirnov, D. V. Yazev, I. P. Aleksandrov

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

For citation: Filippov A. G., Smirnov S. S., Yazev D. V., Aleksandrov I. P. Determination of the required amount of traffic of suburban trains, taking into account all-day and intraday irregularities in passenger traffic distribution. *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2021, vol. 18, iss. 4, pp. 528–536. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2021-4-528-536

Summary

Objective: Automation of processing data on passenger traffic in an arbitrary direction in order to determine the number of "threads" in the time schedule for suburban passenger traffic in the future. Verification of the adequacy of the existing infrastructure and design solutions for reconstruction in terms of ensuring the required throughput capacity of railway lines. **Methods:** The calculation of the number of trains is carried out by mathematical modeling of passenger traffic distribution by hours of the day on each day of the week of the initial month. The identification of trains with non-daily destination is made

* The article is published with the support of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Emperor Alexander I Petersburg State Transport University " for initiative scientific work carried out by student research teams.

by comparing the calculation results for each day of the week. **Results:** An algorithm has been developed for calculating on a computer the perspective amount of suburban train traffic, taking into account the uneven distribution of passenger traffic by hours of the day and days of the week. **Practical importance:** The data obtained using the presented algorithm makes it possible to simplify the development of advance time schedules, taking into account the needs of the population in transportation. The results of the work can be used in feasibility studies for the reconstruction of station layout development and passenger devices, as well as serve as the basis for the technical re-equipment of lines in order to increase their throughput (replacement of signaling and communication equipment, construction of second main tracks, reconstruction of yard necks, etc.). The results of the calculation also make it possible to identify schedule "threads" for withdrawal of trains on days of the week when they are not in demand, but at the same time take into account non-daily trains when developing a standard time schedule. The form of presentation of the results takes into account the spatial irregularity of passenger traffic and makes it possible to distinguish zonal trains.

Keywords: Traffic sizes, irregularity, passenger traffic, throughput capacity, zonal train, time schedule, feasibility study.

References

1. Zubkov I. I., Ugryumov A. K. & Romanov A. P. *Organizatsiya dvizheniya na zheleznodorozhnom transporte*. Uchebnik dlya tekhnicheskikh shkol zh.-d. transporta [*Organization of movement on railway transport*. Textbook for technical schools of railway transport]. 5th ed., revised and enlarged. Moscow, Transport Publ., 1981, 232 p. (In Russian)

2. *Federal'nyy zakon ot 10.01.2003 g. no. 18-FZ. Ustav zheleznodorozhnogo transporta Rossiyskoy Federatsii* [*Federal Law of 10.01.2003 N 18-FZ Charter of Railway Transport of the Russian Federation*]. Available at: http://www.consultant.ru (accessed: October 05, 2021). (In Russian)

3. Grachev A. A., Kotenko A. G., Kudryavtsev V. A., Shumari A. S. & Shutov I. N. *Proyektirovaniye tekhnologiy organizatsii prigorodnykh perevozok*. Uchebnoye posobiye [*Designing technologies for organizing suburban transportation.* Tutorial]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2009, 54 p. (In Russian)

4. *Pravila tekhnicheskoy ekspluatatsii zheleznykh dorog Rossiyskoy Federatsii* [*Rules for the technical operation of the railways of the Russian Federation*]. Moscow, Morkniga Publ., 2020, 608 p. (In Russian)

5. *Tekhnicheskiy spravochnik zheleznodorozhnika* [*Technical handbook of the railway worker*]. Vol. 13. Ed. by R. I. Robel. Moscow, Gos. Transport. zh.-d. izd-vo Publ., 1956, 739 p. (In Russian)

6. *GOST 34530–2019. Transport zheleznodorozhnyy. Osnovnyye ponyatiya. Terminy i opredeleniya* [*GOST 34530–2019. Railway transport. Basic concepts. Terms and Definitions*]. Moscow, Standartinform Publ., 2019, 49 p. (In Russian)

7. Kochnev F. P. *Optimal'nyye parametry prigorodnykh passazhirskikh perevozok* [*Optimal parameters of suburban passenger transportation*]. Moscow, Transport Publ., 1975, 304 p. (In Russian)

8. Kudryavtsev V. A., Kovalev V. I., Kuznetsov A. P. at al. *Osnovy ekspluatatsionnoy raboty zheleznykh dorog*. Uchebnoye posobiye dlya studentov uchrezhdeniy srednego professional'nogo obrazovaniya [*Foundations of railroad service checks*. Textbook for students of institutions of secondary vocational education]. Ed. by V. A. Kudryavtsev. 2nd ed. Moscow, Izd. tsentr "Akademiya" Publ., 2005, 352 p. (In Russian)

9. Pravdin N. V. & Vlyasyuk T. A. *Prigorodnyye zony i zony tyagoteniya na zheleznodorozhnom transporte (dlya usloviy srednikh i bol'shikh gorodov Respubliki Belarus')* [*Suburban and gravity zones on railway transport (for conditions of medium and large cities of the Republic of Belarus)*]. Gomel, BelGUT [Belarusian State Transport University] Publ., 2007, 207 p. (In Russian)

10. Zabolotskaya E. A., Izimov D. V., Smirnov S. S., Yazev D. V., Sugorovskiy A. V. & Filippov A. G. Raz-

rabotka algoritma avtomatizirovannoy obrabotki dannykh po passazhiropotokam i yego programmnaya realizatsiya [Development of an algorithm for automated data processing on passenger traffic and its software implementation]. *Transport: problemy, idei, perspektivy*. Sbornik trudov LXXVIII Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh [*Transport: problems, ideas, prospects*. Collection papers of the LXXVIII All-Russian research and training conference of students, postgraduates students and young scholars]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2020, pp. 181–184. (In Russian)

Received: October 13, 2021
Accepted: October 24, 2021

Author's information:
Anton G. FILIPPOV – PhD in Engineering, Associate Professor; tigropard10@mail.ru
Sergey S. SMIRNOV – Student;
sss1999@inbox.ru
Denis V. YAZEV – Student;
denchik_yazik167@mail.ru
Igor P. ALEXANDROV – Student;
aleksandrovigor2000@mail.ru

УДК 626.73.021.5

Исследование влияния пропуска тяжеловесных поездов на пропускную и провозную способности железнодорожных участков

В. В. Широкова, Н. А. Кузьмина, Г. В. Санькова

Дальневосточный государственный университет путей сообщений, Российская Федерация, 680021, Хабаровск, ул. Серышева, 47

Для цитирования: *Широкова В. В., Кузьмина Н. А., Санькова Г. В.* Исследование влияния пропуска тяжеловесных поездов на пропускную и провозную способности железнодорожных участков // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2021. – Т. 18. – Вып. 4. – С. 537–545. DOI: 10.20295/1815-588X-2021-4-537-545

Аннотация

Цель: Рассмотреть действенность формирования и пропуска тяжеловесных поездов. Выявить, как влияет организация движения таких поездов на пропускную и провозную способности железнодорожных участков. Критерием эффективности организации тяжеловесного движения на участках сети железных дорог России является наличие крупных корреспонденций массовых грузов, предъявляемых грузоотправителем к перевозке. Препятствием к освоению перспективного грузопотока становятся участки с ограниченной пропускной и провозной способностями, преодолением которого выступает организация тяжеловесного движения. Все страны, которые имеют железные дороги, на определенном этапе развития сталкиваются с ограничениями пропускной способности. Обобщая мировой опыт, можно сделать вывод, что приоритетом в освоении возрастающих объемов «тяжелых грузов» становится увеличение весовых норм грузовых поездов. Проблема пропуска тяжеловесных поездов для железных дорог России является актуальной из-за того, что пропускные способности некоторых участков себя полностью исчерпали. Весьма своевременное появление тяжеловесного движения становится одним из вариантов решения проблемы повышения провозных способностей участков и направлений и, как следствие, создания резерва пропускной способности. **Методы:** Проведено исследование влияния движения тяжеловесных поездов на пропускную и провозную способности. Для решения задачи применены графические и аналитические методы математического моделирования, научные методы сбора и обработки статистических данных, современные достижения в части общих принципов и методов управления рисками. **Результаты:** Выведена формула для определения коэффициента съема грузовых поездов. Проанализировано влияние значений межпоездных интервалов грузовых поездов и тяжеловесных поездов на коэффициент съема. **Практическая значимость:** В качестве основной альтернативы возрастания размеров движения на основных грузонапряженных направлениях при дефиците пропускных способностей предлагается использование технологии тяжеловесного движения. В современных рыночных условиях увеличение веса и длины грузового поезда – один из основных резервов повышения пропускной и провозной способностей. Пропуская тяжеловесные поезда, получаем, что провозная способность растет. Доказана состоятельность этих мероприятий. Увеличение провозной и пропускной способностей рассматриваются с целью повышения унифицированных весовых норм.

Ключевые слова: Пропускная способность, провозная способность, коэффициент съема, межпоездной интервал, грузовой поезд, тяжеловесный грузовой поезд.

Организация тяжеловесного движения на железных дорогах направлена на повышение провозной способности грузонапряженных направлений, которые ограничивают освоение перспективных объемов перевозок топливно-энергетических грузов от мест зарождения до мест потребления [1]. Но так ли это? Можно ли считать, что для достижения эффективности грузоперевозок достаточным будет только увеличение длины и массы поездов?

Развитие тяжеловесного движения с участием профессионалов различных направлений по проблемам колеса, рельса и их взаимодействия, которые являются фундаментальными для железнодорожного транспорта, работающего в условиях больших осевых нагрузок, масс поезда и грузонапряженности, представлено в исследованиях специалистов США и ЮАР [2].

Проблема организации тяжеловесного движения изучалась в работах [3–5]. Так, по мнению автора [6], под тяжеловесным движением понимается организация работы грузовых поездов, имеющих большие осевую нагрузку, массу и длину [6].

Множество положительных особенностей, преимуществ, прогрессивных составляющих тяжеловесного движения можно найти и в отечественной литературе.

Правилами технической эксплуатации железных дорог РФ определено, что тяжеловесный поезд – это грузовой поезд, масса которого на 100 т и более превышает норму массы, установленную графиком движения поездов для соответствующей серии поездного локомотива [7], т. е.

$$Q_{т} > Q_{н} + 100,$$

где $Q_{т}$ – масса тяжеловесного поезда, т; $Q_{н}$ – норма массы грузового поезда, установленная графиком движения поездов, т; 100 – минимальное превышение нормы массы грузового поезда, т.

Рассматривая движение тяжеловесных поездов на графике движения, следует обратить внимание на то, что при их пропуске снимаются грузовые поезда установленных норм массы и длины. Это происходит прежде всего из-за различной величины межпоездных интервалов, с которыми следуют грузовые и тяжеловесные поезда (рис. 1 и 2).

Межпоездной интервал грузовых поездов $I = 10$ мин. Число грузовых поездов установленной массы $N_{гр} = 6$.

Интервал пропуска тяжеловесных поездов $I_{т}$ (см. рис. 2):

а – 10 мин ($N_{т} = 1n, N_{гр} = 5n$);

б –12 мин ($N_{т} = 1n, N_{гр} = 4,5n$);

в – 15 мин ($N_{т} = 1n, N_{гр} = 4n$);

г – 20 мин ($N_{т} = 1n, N_{гр} = 3n$).

На рис. 2 видно, что при пропуске тяжеловесных поездов с разными интервалами изменяется и число пропущенных грузовых поездов установленной массы. В случае равенства интервалов (10 мин) общее число грузовых поездов не изменяется – 6 (рис. 2, *а*), но происходит замена грузового поезда на тяжеловесный. При интервале 12 мин (рис. 2, *б*) с графика снимается 1,5 поезда, при интервале 15 мин – 2 поезда, при интервале 20 мин – 3.

Иначе говоря, чем больше разница между интервалами, тем больше грузовых поездов снимается с графика. Таким образом, можно говорить о том, что при пропуске тяжеловесных поездов имеет место съем грузовых поездов, регулируемый коэффициентом съема, величина которого может быть определена по следующей формуле:

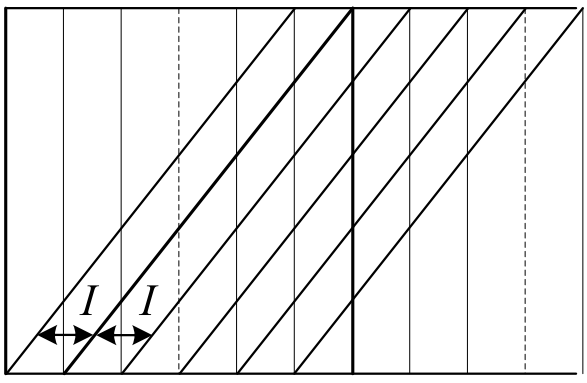


Рис. 1. Пропуск грузовых поездов установленной массы по участку при отсутствии тяжеловесных поездов

$$\varepsilon_{\text{тяж}} = \frac{2I_{\text{т}}}{I} - 1, \text{ но не менее 1.}$$

где $I_{\text{т}}$ – межпоездной интервал для тяжеловесных поездов, мин.

Чтобы посмотреть, как изменится провозная способность, можно выполнить несложный расчет, используя рис. 1 и 2 и принятые расчетные массы поездов 6300 и 8300 т (табл. 1). Коэффициент соотношения масс нетто и брутто – 0,75.

Таким образом, при незначительной разнице интервалов (10 и 12 мин) наблюдается рост объема перевезенного груза, но с увеличением разрыва между межпоездными интервалами (10 и 15, 10 и 20 мин) за один и тот же период число перевезенных тонн брутто и нетто снижается.

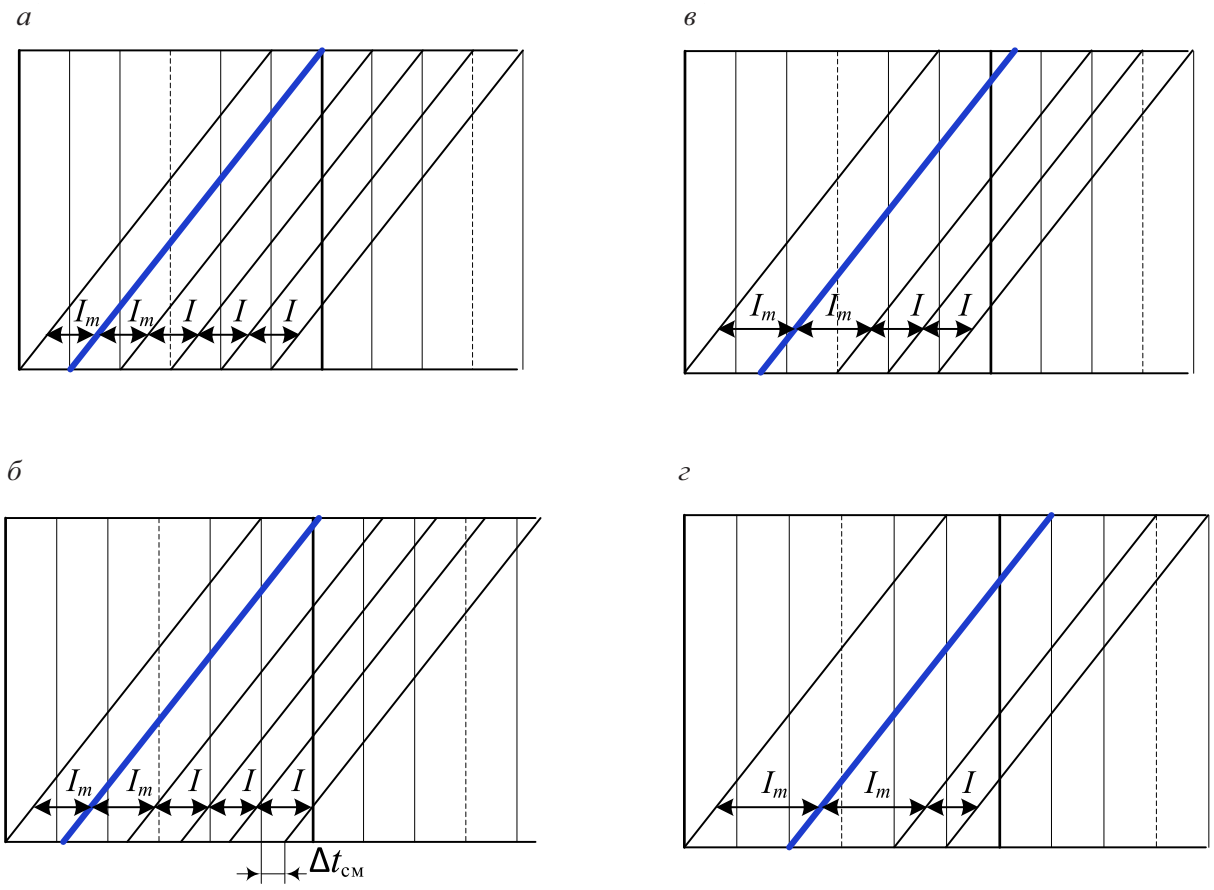


Рис. 2. Пропуск тяжеловесных грузовых поездов по участку

ТАБЛИЦА 1. Расчет перевезенного груза в зависимости от интервала

Вариант	Число грузовых поездов	Число тяжеловесных поездов	Масса поезда, т		Перевезено тонн	
			6300	8300	брутто	нетто
1	6	0	37 800	0	37 800	28 350
а	5	1	31 500	8300	39 800	29 850
б	4,5	1	28 350	8300	36 650	27 487
в	4	1	25 200	8300	33 500	25 125
г	3	1	18 900	8300	27 200	20 400

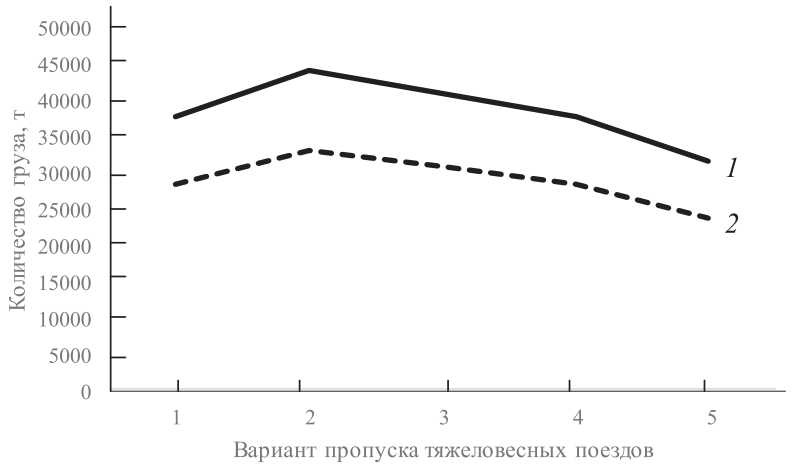


Рис. 3. График зависимости перевезенных тонн груза от межпоездных интервалов тяжеловесных поездов: *1* – т брутто; *2* – т нетто

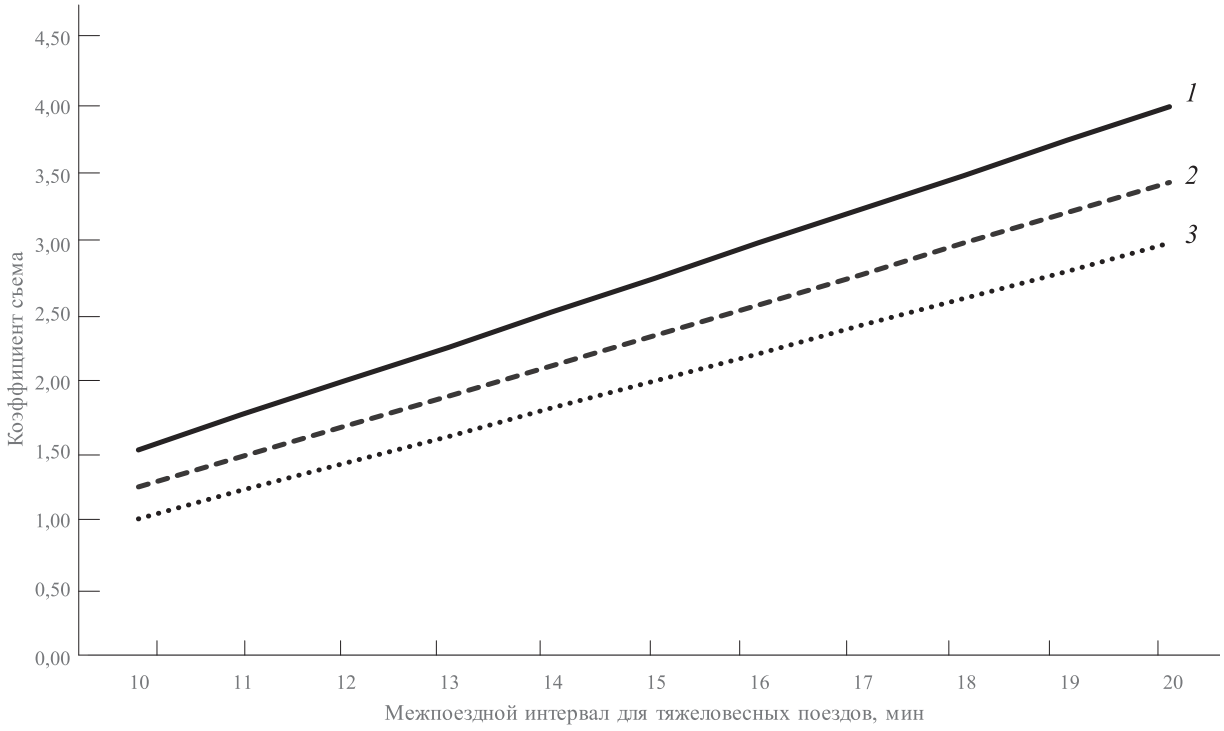


Рис. 4. Зависимость коэффициента съема тяжеловесных поездов от межпоездных интервалов 8 (*1*), 9 (*2*) и 10 мин (*3*)

Рассматривая влияние значений межпоездных интервалов грузовых и тяжеловесных поездов на коэффициент съема, можно установить зависимость, приведенную на рис. 4: при снижении интервала между грузовыми поездами возрастает коэффициент съема.

Итак, при расчете наличной провозной способности двухпутных участков, оборудованных автоматической блокировкой, нельзя однозначно утверждать, что при пропуске тяжеловесных поездов она возрастает. Чтобы посмотреть влияние числа пропускаемых тяжеловесных поез-

дов, обратимся к формуле расчета провозной способности [1]

$$\Gamma = \frac{365 \cdot Q_{\text{бр}} \cdot \varphi}{10^6} \times \times \left[\frac{(1440 - t_{\text{тех}} \cdot \alpha_{\text{н}})}{I} - \right. \left. - N_{\text{с}}^{\text{пасс}} - N_{\text{с}}^{\text{уск}} - N_{\text{с}}^{\text{сб}} - N_{\text{с}}^{\text{тяж}} \right],$$

где $t_{\text{тех}}$ – технологическое «окно», мин; $\alpha_{\text{н}}$ – коэффициент надежности, учитывающий отказы технических средств; I – межпоездной интервал (период графика), мин; $Q_{\text{бр}}$ – масса состава поезда брутто, т; φ – коэффициент соотношения массы состава поезда нетто и брутто; $N_{\text{с}}^{\text{пасс}}$, $N_{\text{с}}^{\text{уск}}$, $N_{\text{с}}^{\text{сб}}$, $N_{\text{с}}^{\text{тяж}}$ – общее число грузовых поездов, снимаемое с графика движения соответственно пассажирскими, скорыми, ускоренными грузовыми, сборными и тяжеловесными поездами.

Определим число снимаемых грузовых поездов:

$$N_{\text{с}}^{\text{пасс(ск)}} = \varepsilon_{\text{пасс(ск)}} \cdot N_{\text{пасс(ск)}},$$

$$N_{\text{с}}^{\text{сб(уск)}} = \varepsilon_{\text{сб(уск)}} \cdot N_{\text{сб(уск)}},$$

$$N_{\text{с}}^{\text{тяж}} = (\varepsilon_{\text{тяж}} - 1) \cdot N_{\text{тяж}},$$

здесь $\varepsilon_{\text{пасс(ск)}}$, $\varepsilon_{\text{сб(уск)}}$, $\varepsilon_{\text{тяж}}$ – коэффициенты съема пассажирским (скорым пассажирским), сборным (ускоренным грузовым), тяжеловесным поездами, $N_{\text{пасс(ск)}}$, $N_{\text{сб(уск)}}$, $N_{\text{тяж}}$ – число пассажирских (скорых), сборных (ускоренных), тяжеловесных поездов.

Зависимость наличной провозной способности от числа пропускаемых тяжеловесных поездов показана на рис. 5.

Из представленных графиков можно сделать вывод о том, что:

1) при незначительном разрыве между интервалами (0–3 мин) и увеличении числа тяжеловесных поездов растет наличная провозная способность;

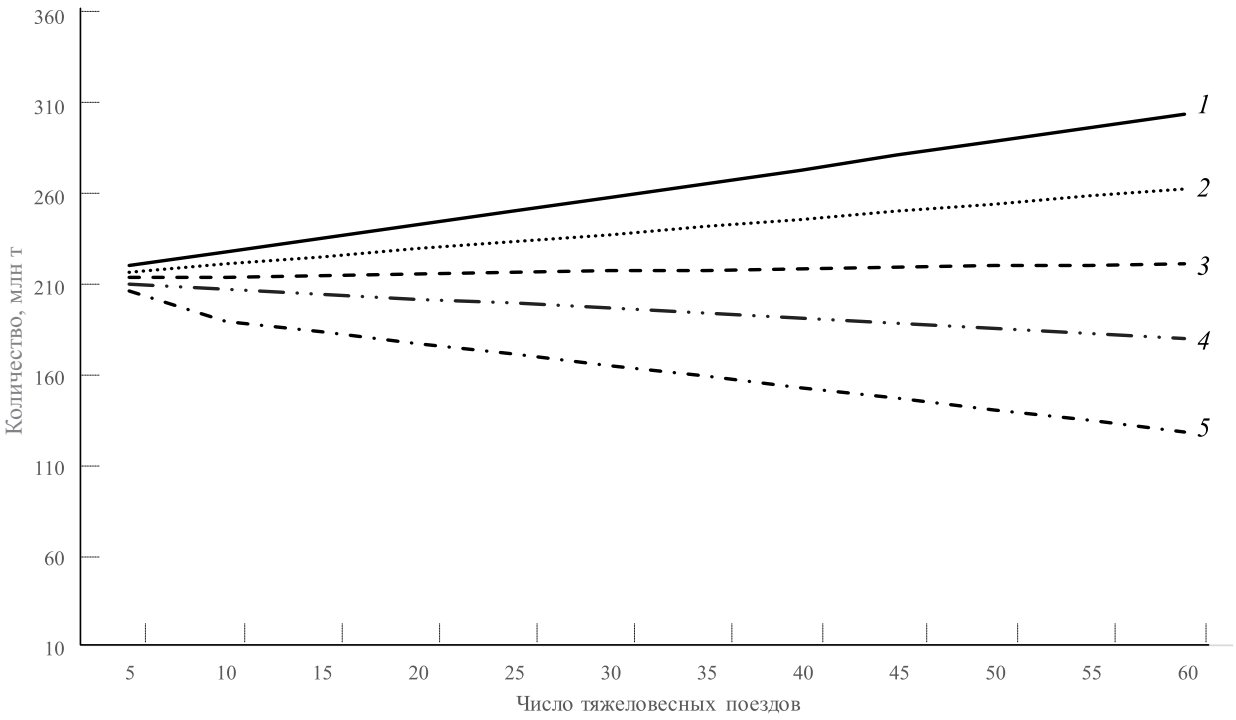


Рис. 5. График изменения наличной провозной способности в зависимости от числа тяжеловесных поездов и межпоездного интервала между ними: межпоездной интервал: *1* – 12 мин, *2* – 14 мин, *3* – 16 мин, *4* – 18 мин, *5* – 20 мин

ТАБЛИЦА 2. Расчет перевезенного груза в зависимости от интервала

Вариант	Число грузовых поездов	Число тяжеловесных поездов	Масса поезда, т		Перевезено тонн	
			6300	12 600	брутто	нетто
1	6	0	37 800	0	37 800	28 350
а	5	1	31 500	12 600	44 100	33 075
б	4,5	1	28 350	12 600	40 950	30 712
в	4	1	25 200	12 600	37 800	28 350
г	3	1	18 900	12 600	31 500	23 625

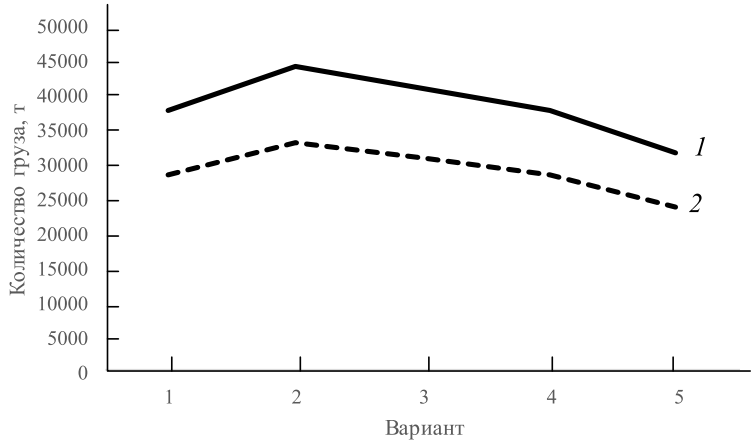


Рис. 6. Зависимость провозной способности от величины интервала для соединенных поездов: *1* – т брутто; *2* – т нетто

2) при разнице между интервалами 4–5 мин и большом числе тяжеловесных поездов значительное изменение провозной способности не наблюдается;

3) при значительном разрыве межпоездных интервалов (6 мин и более) для тяжеловесных и грузовых поездов происходит снижение провозной способности.

Если в качестве тяжеловесных поездов рассматривать соединенные поезда с такими же интервалами движения, как для тяжеловесных, то результаты изменятся (табл. 2).

Из рис. 6 следует, что чем больше разница между интервалами, тем меньше провозная способность. Но для соединенных поездов разница должна быть более 5 мин.

Увеличение массы поездов является не только одной из наиболее эффективных мер по повышению провозной способности железных дорог, но и средством улучшения эксплуатационных показателей их работы и снижения себестоимости перевозок. Масса поезда определяет требования к техническому вооружению железных дорог, в первую очередь к мощности локомотивов, длине станционных путей, устройствам электроснабжения при электротяге, маневровым средствам и т. д.

Таким образом, установление рациональной массы поездов на железных дорогах представляет собой важную и сложную технико-экономическую проблему, тесно связанную как с увеличением провозной способности железных дорог, так и затрагивающую значительно более широкий круг вопросов. Ее выбор может рассматриваться при заданных типе и мощности локомотива или для случаев, когда мощность локомотива неизвестна, т. е. должна быть определена одновременно с массой поезда.

Развитие тяжеловесного движения служит одним из инструментов, который позволит повысить провозную способность направления, создаст резерв пропускной способности на сети ОАО «РЖД».

Следовательно:

1) для увеличения провозной способности необходимо снижать разницу между межпоездными интервалами грузовых и тяжеловесных поездов;

2) при значительной разнице между интервалами число тяжеловесных поездов не должно быть более 10–15 в сутки;

3) для уменьшения коэффициента съема необходимо снижать разницу между интервалами.

Несомненно, что развитие тяжеловесного движения усилит пропускные возможности сети российских железных дорог [8, 9].

В условиях повышения объема перевозок можно увеличить количество тяжеловесных поездов при соответствующей инфраструктуре. Таким образом, только при введении 20–25% тяжеловесных поездов без учета капитальных вложений увеличивается на 15% годовой дополнительный доход. Следовательно, можно утверждать, что такая организация движения поездов экономически выгодна и обоснована. Получаемый при этом дополнительный объем перевозок позволит сократить затраты на поездокилометры и на остановки поездов.

Проведенные нами исследования подтверждают состоятельность данного утверждения. В то же время в связи с организацией постоянного обращения поездов повышенного веса и значительной длины возникают требующие решения вопросы [10]. Анализ отечественной литературы показывает, что существуют как сторонники, так и противники тяжеловесного движения [11]. Но, как показывает практика, рост действенности перевозочного процесса, в том числе «за счет увеличения веса и длины грузовых поездов, обеспечивает увеличение провозной способности сети железных дорог в условиях ограничения инвестиционных ресурсов в среднесрочной перспективе» [12, с. 60].

Библиографический список

1. Кузьмина Н. А. Исследование влияния движения поездов повышенной массы и длины как элемента увеличения эффективности перевозочного процесса / Н. А. Кузьмина // Сб. науч. трудов Евразийск. науч. объединения. – № 1 (59). – М.: Евразийск. науч. объединение, 2020. – С. 45–50.

2. Харрис У. Дж. Обобщение передового опыта тяжеловесного движения: вопросы взаимодействия колеса и рельса / У. Дж. Харрис; пер. с англ. С. М. Захарова, Дж. Ландрен и др.; под ред. С. М. Захарова. – М.: Интекст, 2000. – 408 с.

3. Martins R. S. Wheel and rail perfomance at Carajas Railway / R. S. Martins, R. T. Costa // Guedelines to Best Practeces for Heavy Haul Operation: Wheel and Rail Interface Issues. – Virginia Beach, USA: IHHA, 2001. – P. 4.25–4.27.

4. Roney M. Maintaining technical leadership in today's business environment / M. Roney // Proceedings of 7th IHHA Conference. – Brisbane, Australia: IHHA, 2001. – P. 2.1–2.5.

5. Zhixiu Geng. Heavy-haul transportation technologias on Datong-Qinhuangdao Railway / Zhixiu Geng. – Beiging: China Railway Publishing House, 2009. – 539 p.

6. Abhyuday D. R. Cost reduction policies and driving behavior. Ir train drivers influencing diesel traction energy consumption / D. R. Abhyuday // Новые тенденции развития в управлении процессами перевозок, автоматике и инфокоммуникациях: Труды Всерос. науч.-практич. конференции транспортных вузов, инженерных работников и представителей академической науки с международным участием (Хабаровск, 29 сентября 2017 г.) / под ред. А. И. Годяева. – Хабаровск: Изд-во Дальневосточ. гос. ун-та путей сообщения, 2017. – С. 19–35.

7. Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации. – URL: https://company.rzd.ru (дата обращения: 12.09.2021).

8. Программа развития на сети железных дорог ОАО «РЖД» тяжеловесного движения. – URL: http://www.rzd-expo.ru/images/Events-2019/27ts/01.pdf (дата обращения: 11.08.2021).

9. Стратегия развития холдинга «РЖД» на период до 2030 года (основные положения). – Дата офиц.

опубл.: 16.04.2014 г. – URL: http://doc.rzd.ru/doc/public/ru?STRUCTURE_ID=704&layer_id=5104&id=6396 (дата обращения: 22.09.2021).

10. Климова Е. В. Исследование сфер эффективности применения технологии пропуска соединенных и тяжеловесных поездов / Е. В. Климова // Вестник Сиб. гос. ун-та путей сообщения. – 2017. – № 4 (43). – С. 66–73.

11. Гильманов А. И. Увеличение массы поезда по сети железных дорог / А. И. Гильманов, О. И. Залогова // Молодая наука Сибири: электрон. науч. журн. – 2018. – № 1. – URL: http://mnv.irgups.ru/toma/11-2018 (дата обращения: 27.08.2021).

12. Ушкова Е. Тяжеловесам – зеленый свет / Е. Ушкова // РЖД ПАРТНЕР. – 2018. – № 9 (373). – С. 59–61.

Дата поступления: 30.09.2021
Решение о публикации: 18.10.2021

Контактная информация:
ШИРОКОВА Валентина Васильевна – канд. пед. наук, доц.; appa1953@yandex.ru
КУЗЬМИНА Наталья Александровна – канд. пед. наук, доц.; kuzminaprepodavatel@mail.ru
САНЬКОВА Галина Васильевна – ст. преподаватель; gvsankova@mail.ru

Study of the influence of handling heavy trains on the carriage and traffic capacity of railway sections

V. V. Shirokova, N. A. Kuzmina, G. V. Sankova

Far Eastern State Transport University, 47, ul. Serysheva, Khabarovsk, 680021, Russian Federation

For citation: Shirokova V. V., Kuzmina N. A., Sankova G. V. Study of the influence of handling heavy trains on the carriage and traffic capacity of railway sections. *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2021, vol. 18, iss. 4, pp. 537–545. (In Russian)
DOI: 10.20295/1815-588X-2021-4-537-545

Summary

Objective: Considering the effectiveness of the formation and handling of heavy trains. Revealing how the organization of the movement of such trains affects the carriage and traffic capacity of railway sections. **Methods:** To solve the problem, graphic and analytical methods of mathematical modeling, scientific methods of collecting and processing statistical data, modern achievements in terms of general principles and methods of risk management were employed. **Results:** A formula has been derived to determine the rate of removal of freight trains. The analysis of the influence of the values of the freight trains and heavy trains spacing on the removal rate has been conducted. **Practical importance:** As the main alternative to increasing the size of traffic on the main cargo-intensive directions, with a shortage of carrying capacity, it is proposed to use the technology of heavy traffic. In modern market conditions, an increase in the weight and length of a freight train is one of the main reserves for increasing carriage and traffic capacity. Passing heavy trains, we achieve growing carrying capacity. The consistency of these measures has been proven. An increase in carriage and traffic capacity is considered with the aim of increasing unified weight norms.

Keywords: Traffic capacity, carriage capacity, rate of removal, train spacing, freight train, heavy freight train.

References

1. Kuzmina N.A. Issledovaniye vliyaniya dvizheniya poyezdov povyshennoy massy i dliny kak elementa uvelicheniya effektivnosti perevozochnogo protsessa [Study of the influence of the movement of trains of increased mass and length as an element of increasing the efficiency of the transportation process]. *Sbornik nauchnykh trudov Yevraziyskogo nauchnogo ob"yedineniya* [*Collection of scientific papers of the Eurasian Scientific Association*], no. 1 (59). Moscow, Yevraziyskoye nauchnoye ob"yedineniye Publ., 2020, pp. 45–50. (In Russian)

2. Harris W.J. *Obobshcheniye peredovogo opyta tyazhelovesnogo dvizheniya: voprosy vzaimodeystviya kolesa i rel'sa* [*Generalization of the advanced experience of heavy traffic. The problems of wheel–rail interaction*]. Transl. from English by S.M. Zakharov, J. Landrain et al.; ed. by S.M. Zakharov. Moscow, Intext Publ., 2000, 408 p. (In Russian)

3. Martins R.S. & Costa R.T. Wheel and rail perfomance at Carajas Railway. *Guedelines to Best Practeces for Heavy Haul Operation: Wheel and Rail Interface Issues*. Virginia Beach, USA, IHHA Publ., 2001, pp. 4.25–4.27.

4. Roney M. Maintaining technical leadership in today's business environment. *Proceedings of 7th IHHA Conference*. Brisbane, Australia, IHHA Publ., 2001, pp. 2.1–2.5.

5. Zhixiu Geng. *Heavy-haul transportation technologias on Datong-Qinhuangdao Railway*. Beiging, China Railway Publishing House, 2009, 539 p.

6. Abhyuday D.R. Cost reduction policies and driving behavior. Ir train drivers influencing diesel traction energy consumption. *Novyye tendentsii razvitiya v upravlenii protsessami perevozok, avtomatike i infokommunikatsiyakh. Trudy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii transportnykh vuzov, inzhenernykh rabotnikov i predstaviteley akademicheskoy nauki s mezhdunarodnym uchastiyem* (Khabarovsk, 29 sentyabrya 2017 g.) [*New development trends in the management of transportation processes, automation and infocommunications. Proceedings of the All-Russian scientific and practical conference of transport universities, engineering workers and representatives of academic science with international participation* (Khabarovsk, September 29, 2017)]. Ed. by A.I. Godyaev. Khabarovsk, DVGUPS [Far Eastern State Transport University] Publ., 2017, pp. 19–35.

7. *Pravila tekhnicheskoy ekspluatatsii zheleznykh dorog Rossiyskoy Federatsii* [*Rules for the technical operation of the railways of the Russian Federation*]. Available at: https://company.rzd.ru (accessed: September 12, 2021). (In Russian)

8. *Programma razvitiya na seti zheleznykh dorog OAO "RZHD" tyazhelovesnogo dvizheniya* [*Program for the development of heavy-haul traffic on the railway network of Russian Railways*]. Available at: http://www.rzd-expo.ru/images/Events-2019/27ts/01.pdf (accessed: August 11, 2021). (In Russian)

9. *Strategiya razvitiya kholdinga "RZHD" na period do 2030 goda (osnovnyye polozheniya)* [*Development strategy of the Russian Railways holding for the period up to 2030 (key provisions)*]. Date of official publ.: April 16, 2014. Available at: http://doc.rzd.ru/doc/public/ru?STRUCTURE_ID=704&layer_id=5104&id=6396 (accessed: September 22, 2021). (In Russian)

10. Klimova E.V. Issledovaniye sfer effektivnosti primeneniya tekhnologii propuska soyedinennykh i tyazhelovesnykh poyezdov [Research of the spheres of efficiency of application of the technology of passage of connected and heavy trains]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universitetata putey soobshcheniya* [*Bulletin of the Siberian State University of Railways*], 2017, no. 4 (43), pp. 66–73. (In Russian)

11. Gilmanov A.I. & Zalogova O.I. Uvelicheniye massy poyezda po seti zheleznykh dorog [Increase in train mass on the railway network]. *Molodaya nauka Sibiri*. Elektronnyy nauchnyy zhurnal [*Young science of Siberia*. Electronic scientific journal], 2018, no. 1. Available at: http://mnv.irgups.ru/toma/11-2018 (accessed: August 27, 2021). (In Russian)

12. Ushkova E. Tyazhelovesam – zelenyy svet [For heavyweights – green light]. *RZHD PARTNER* [*RZD PARTNER*], 2018, no. 9 (373), pp. 59–61. (In Russian)

Received: September 30, 2021
Accepted: October 18, 2021

Author's information:
Valentina V. SHIROKOVA – PhD in Pedagogy, Associate Professor; appa1953@yandex.ru
Natalia A. KUZMINA – PhD in Pedagogy, Associate Professor; kuzminaprepodavatel@mail.ru
Galina V. SANKOVA – Senior Lecturer; gvsankova@mail.ru

УДК 377.1/378.1

К истории вопроса проверки знаний обучающихся на примере Института инженеров путей сообщения

П. В. Великоруссов[1], **М. М. Воронина**[2], **М. М. Шевченко**[3]

[1] Иркутский национальный исследовательский технический университет, Российская Федерация, 664074, Иркутск, ул. Лермонтова, 83
[2] Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр. 9
[3] Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Российская Федерация, 198262, Санкт-Петербург, Ленинский пр., 101

Для цитирования: *Великоруссов П. В., Воронина М. М., Шевченко М. М.* К истории вопроса проверки знаний обучающихся на примере Института инженеров путей сообщения // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2021. – Т. 18. – Вып. 4. – С. 546–553. DOI: 10.20295/1815-588X-2021-4-546-553

Аннотация

Цель: Изучить требования, которые предъявлялись к учащимся для проверки усвоения материала после окончания курса наук, рассмотреть изменения, которые происходили на протяжении столетий, в процессе проверки знаний: от самых примитивных (в частности, при приеме на рабфак требовалось знание арифметики в пределах первого десятка) до достаточно сложных, нестандартных (например, клаузуры). Описать лучшие методы преподавания и контроля знаний и необходимость их совершенствования в настоящее время. **Методы:** Проводится сравнительный анализ вступительных, публичных, выпускных экзаменов в разные годы существования Института инженеров путей сообщения. Показаны результаты испытаний, которые давали ответ на вопрос об уровне знаний, эффективности преподавания. **Результаты:** Доказана необходимость совершенствования процесса проверки знаний, для того чтобы научить студентов самостоятельности, умению работать с литературой, анализировать и просто думать. **Практическая значимость:** Анализ и изучение истории проведения вступительных, переводных, выпускных экзаменов за разные годы дают возможность дать некоторые прогнозы для настоящего времени. Сейчас возрастающая оцифровка преподавания и обучения и связанные с этим изменения требуют новых подходов в организации процессов обучения и проверки знаний. Показана необходимость одновременного использования стандартной процедуры проверки усвоенного материала и проведения тестирования в современных условиях. Их корректировка и взаимосвязь позволят повысить объективность оценки и, главное, качество обучения.

Ключевые слова: Проверка знаний, вступительные, публичные экзамены, клаузуры, тестирование.

Процесс обучения и процесс проверки того, чему научили, всегда шли параллельно. В России прототипы экзаменов впервые появились при Петре I, поскольку именно при нем откры-

вались первые светские школы, например школа «математических и навигацких, то есть мореходных хитростно искусств учения» (1701 г.). Учащиеся, которые ее окончили, могли поступать на государственную службу. При этом в первую очередь от них требовалось знание математики. Затем появились Инженерная школа (1711 г.), Артиллерийская (1712 г.), немного позже – «цифирные» школы: «… во всех губерниях дворянского и приказного чина, дьячьих и подъяческих детей от 10 до 15 лет, опричь однодворцов, учить цифири и некоторую часть геометрии». В Указе специально оговаривалось, что без письменных свидетельств об окончании школ «жениться их не допускать, и венечных памятей не давать» [1, с. 86]. Эти «письменные свидетельства» свидетельствуют о том, что испытания, т. е. аналог проверки полученных знаний, уже были. При этом вступительные экзамены во вновь открывающихся учебных заведениях – гидротехнических, школах кантонистов, военных – в XVIII в. практически не проводились.

Идея проверки знаний нашла отражение и в знаменитом указе о чинах русского государственного деятеля М. М. Сперанского*, согласно которому никто не мог получить чин коллежского асессора и выше, не имея свидетельства об окончании университета или о сдаче соответствующих экзаменов. В августе 1809 г. Александр I утверждает разработанный Сперанским указ [2, с. 1054], при этом он включал в себя и краткую программу для испытания чиновников, состоящую из следующих разделов. 1. Науки словесные. «Грамматическое познание Российского языка и правильное на оном сочинение. Познание, по крайней мере, одного языка иностранного, и удобность перелагать с оного на Российский»; 2. Правоведение. «Основательное познание Права Естественного, Права Римского и Права частного Гражданского, с приложением сего последнего к Российскому законодательству. Сведения в нужнейших частях Права общего, как то: Экономии Государственной и законов уголовных»; 3. Науки исторические. «Основательное познание отечественной Истории. История Всеобщая Древняя и Новая с частями, к ней принадлежащими, как то: с Географией и Хронологией. Сюда же принадлежат первоначальные основания Статистики, особенно Российского Государства»; 4. Науки математические и физические. «Знание, по крайней мере, начальных основ Математики, как то: Арифметики и Геометрии, и общие сведения в главных частях Физики» [2, с. 1056].

Дальнейшее развитие системы проверки знаний (не в гуманитарных областях) было связано с появлением в стране высшего технического образования, в первую очередь с Институтом путей сообщения, основанном в 1809 г. Образование в нем строилось по французской системе. Экзамены стали неотъемлемым атрибутом обучения.

Проверку усвоения материала обычно начинали с выдачи заданий. Ученик должен был самостоятельно понять и закрепить материал. Видимо, проверить все это было сложно, потому в первые годы работы института для сдачи экзамена «каждый воспитанник должен был представлять сочинение и чертежи и удостоверять под присягою, что составлял их самостоятельно» [3, с. 69]. В 1830-х годах в институте экзамены проводились 4 раза в год: перед приемом, «в половине учебного года, закрытый экзамен в конце его и, наконец, публичный экзамен» [3, с. 86].

Публичный экзамен – это действительно публичные испытания. Дату их проведения публиковали в газетах, приглашали всех заинтересованных лиц, причем они могли принимать активное участие в этом процессе, т. е. задавать любые вопросы по заявленной теме. Естественно, на такие экзамены допускались лучшие ученики.

Вот одно из описаний публичного экзамена, на котором присутствовал М. М. Сперанский, составленное будущим министром путей сообще-

* М. М. Сперанский в 1803–1807 гг. был директором Департамента Министерства внутренних дел, с 1808 г. – ближайшее доверенное лицо Императора Александра I по всем вопросам внутренней политики. В последующие годы под руководством М. М. Сперанского были изданы первое «Полное собрание законов Российской империи» в 45 т. и «Свод законов Российской империи» в 15 т.

ния П. П. Мельниковым. «Я имел случай лично удостовериться, до какой степени разнообразны и основательны были познания этого государственного человека по разным отраслям наук. В 1824 году во время публичного экзамена в Институте путей сообщения между большим числом посетителей находился и Сперанский. Я был вызван в чине инженера прапорщика для экзамена в физике и механике, и как Главноуправляющий, тогда герцог Александр Виртембергский, не знал русского языка, да и профессоры высших предметов были французы, то отвечать следовало по-французски. Сперанский спросил у герцога позволение сделать вопрос и, обращаясь ко мне, сказал, не могу ли я объяснить ему чрезвычайно интересные опыты об электрических токах, недавно объявленных в записках Французской академии (опыты, которые положили начало электромагнитным телеграфам). Профессор наш, известный ученый Ламе, после член Французской академии наук, следил за всеми новейшими открытиями, в особенности по математике и ее приложениям, и в одну из последних лекций передал нам подробно о новой теории электрических токов, так что я мог вполне удовлетворить желание Сперанского. Он благодарил меня в самых лестных выражениях, говоря, между прочим, что он присутствует не на экзамене, а выслушал весьма интересную и поучительную лекцию» [4, с. 52]. Проведение публичных экзаменов продолжалось в институте в течение нескольких десятилетий.

В 40-х годах XIX в. существовала 10-балльная система оценок в институте. Высшим баллом считалась цифра 10. Каждый студент подвергался частным* экзаменам не менее 10 раз в сезон. Средняя цифра годовых баллов, получаемых на репетициях, умножалась на 4, средний балл полугодового экзамена – на 2, а годового экзамена – на 4. Затем сумма всех баллов делилась на 10. Для перевода на следующий курс необходимо было набрать 6,66 баллов [5, с. 74]. Форма проведения экзамена была впечатляющей и торжественной – они проходили в больших залах в присутствии всех экзаменующихся. Экзаменаторов по основным предметам было не менее трех человек. Экзамены и «баллы объявлялись тотчас же, как экзаменующийся отойдет от стола» [6, с. 488]. Пересдача экзаменов разрешалась только один раз, второй – лишь с разрешения Совета института.

Над проблемой проверки знаний учащихся думали многие выдающиеся педагоги и ученые. Например, Дмитрий Иванович Менделеев считал, что устные, «массовые» экзамены (т. е. переходные) при обучении не нужны. Главными причинами отмены экзаменов Менделеев назвал две. К первой относится то, что при правильном отношении педагога к своему делу он уже до экзаменов может судить об уровне подготовки и способности учеников. Издержками системы образования и лишней тратой времени называл Менделеев экзамены и по второй причине, когда по результатам экзаменов судят о работе учителей. «Очевидно, что проверять надо учителей вовсе не на экзаменах, а на самом ходе преподавания, хотя главную-то проверку дадут сами ученики – когда вырастут, осмотрятся и вспомнят, что и как внушал им тот или другой учитель» [7, с. 66–67]. Эти высказывания вполне актуальны и в наше время.

Нестандартный метод проверки знаний практиковался в институте в самом начале XX в. Так же, как и сейчас, перед руководством института стояла проблема качества и способа обучения: как научить студентов самостоятельности, умению работать с литературой и просто думать. Как убедиться в том, что работа сделана самостоятельно? Вот выписка из отчета института за 1902 г. [8, л. 810об.]:

1. «Для испытания студентов в отношении степени подготовленности их к совершению самостоятельной работы, а равно для проверки насколько хорошо усвоены ими те или иные курсы, Советом института назначаются клаузуры**.

* «Частный экзамен» – это опрос на репетициях, т. е. на практических занятиях.

** Клаузура (clausura) в переводе с испанского означает внутреннюю часть монастыря (недоступ-

2. Клаузуры заключаются в совершенно самостоятельном, т. е. без всякой посторонней помощи, решении теоретических и практических задач, исполняемых студентами в стенах института под надзором профессоров и преподавателей.

3. Запрещается пользоваться пособиями, кроме таблиц, разговаривать».

После проведения клаузур студентам ставились оценки. (Можно сравнить с современными баллами.) Как ни странно, учащимся клаузуры нравились, они реально показывали, на что способен данный студент. Клаузуры применялись в институте и для получения диплома. Вот расписание испытаний для получения звания инженера путей сообщения в 1902 г. Начинаются они с клаузур: « 2, 3, 4 октября – клаузура по мостам, 8, 9 октября – клаузура по водяным сообщениям и портам, 12, 13 октября – клаузура по железным дорогам и водоснабжению станций, 16, 17 октября – клаузура по прикладной механике, 19, 20 октября – клаузура по архитектуре с расчетом металлических покрытий» [8, л. 96]. Только после прохождения клаузур с 23 октября по 30 ноября проводились экзамены.

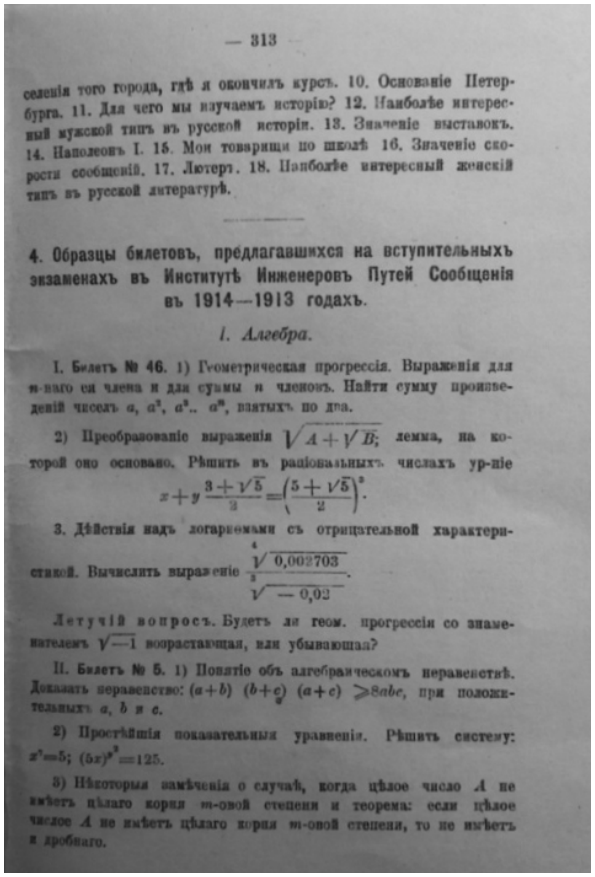
В Институт путей сообщения всегда был большой конкурс, поступить в него было сложно. Вступительные экзамены было достаточно сложными. Готовились к ним обычно с помощью репетиторов или в частных школах. Например, в 1896 г., для того чтобы поступить в Институт путей сообщения, нужно было написать сочинение и сдать письменные и устные экзамены по арифметике, алгебре, геометрии и тригонометрии. «Наконец, вне конкурса, нужно было исполнить рисунок и показать достаточное знание немецкого языка. Экзаменующихся было более семисот. Из них нужно было отобрать 150.Чтобы достигнуть этого, предлагались иногда замысловатые задачи. Помню, что по арифметике меня попросили указать признак делимости на два в пятеричной системе» [9, с. 34].

В начале XX в. были очень популярны подготовительные курсы инженера путей сообщения Петра Кронидовича Шмулевича (окончил институт в 1900 г.). С 1906 по 1917 г. он заведовал курсами по подготовке к поступлению в высшие учебные заведения, был автором и издателем математической литературы, кроме того, составлял многочисленные сборники задач. Курсы у него были достаточно дорогими. Занятия проводились по 10–12 ч каждый день в течение двух месяцев, но зато результат был превосходным. Образец экзаменационного билета по алгебре в Институте путей сообщения [10] иллюстрирует рис. 1.

Чрезвычайно интересны темы сочинений, предлагавшиеся на вступительных экзаменах в высшие учебные заведения (рис. 2). Справились бы современные ученики с ними?

После Октябрьской революции в течение нескольких лет система преподавания и проверки знаний в институте оставалась неизменной. Но уже в 1923/24 учебном году было разработано «Положение о новом методе преподавания», в том числе о проверочных процедурах. В частности, было признано необходимым упразднить лекционную систему, заменив ее семинарско-групповой и лабораторной. «Лекции – вступительная и заключительная – должны иметь подсобное значение. Установление степени усвоения должно производиться на основе учета всей работы, проделанной студентом» [11, л. 463]. Посещение групповых занятий студентами обязательно. Для сдачи зачетов в каждой группе устанавливались два срока, экзамены отменялись. Такую методику надо рассматривать как попытку улучшить систему преподавания. Действительно, в то время студенты могли посещать лишь небольшое количество лекций в

ную посторонним), или затворничество. Начиная с XVI в. клаузурой в различных художественных школах стали называть короткие, продолжительностью от 2 до 6 ч творческие задания, выполненные самостоятельно. В процессе обучения возникала настоятельная необходимость проверки знаний и умения каждого студента. Форма проверки была весьма эффективной: каждого студента запирали в отдельном помещении и предоставляли возможность в одиночку решить поставленную задачу. Позднее клаузуры проводились в больших помещениях под наблюдением специальных служащих.



— 313 —

селенія того города, гдѣ я окончилъ курсъ. 10. Основаніе Петербурга. 11. Для чего мы изучаемъ исторію? 12. Наиболѣе интересный мужской типъ въ русской исторіи. 13. Значеніе выставокъ. 14. Наполеонъ I. 15. Мои товарищи по школѣ 16. Значеніе скорости сообщеній. 17. Лютеръ. 18. Наиболѣе интересный женскій типъ въ русской литературѣ.

4. Образцы билетовъ, предлагавшихся на вступительныхъ экзаменахъ въ Институтѣ Инженеровъ Путей Сообщенія въ 1914—1913 годахъ.

I. Алгебра.

I. Билетъ № 46. 1) Геометрическая прогрессія. Выраженія для n-наго ея члена и для суммы n членовъ. Найти сумму произведеній числъ a, a^2, a^3.. a^n, взятыхъ по два.

2) Преобразованіе выраженія $\sqrt{A+\sqrt{B}}$; лемма, на которой оно основано. Рѣшить въ раціональныхъ числахъ ур-ніе $x+y\frac{3+\sqrt{5}}{2}=\left(\frac{5+\sqrt{5}}{2}\right)^3$.

3. Дѣйствія надъ логарифмами съ отрицательной характеристикой. Вычислить выраженіе $\frac{\sqrt[4]{0{,}002703}}{\sqrt[3]{-0{,}02}}$.

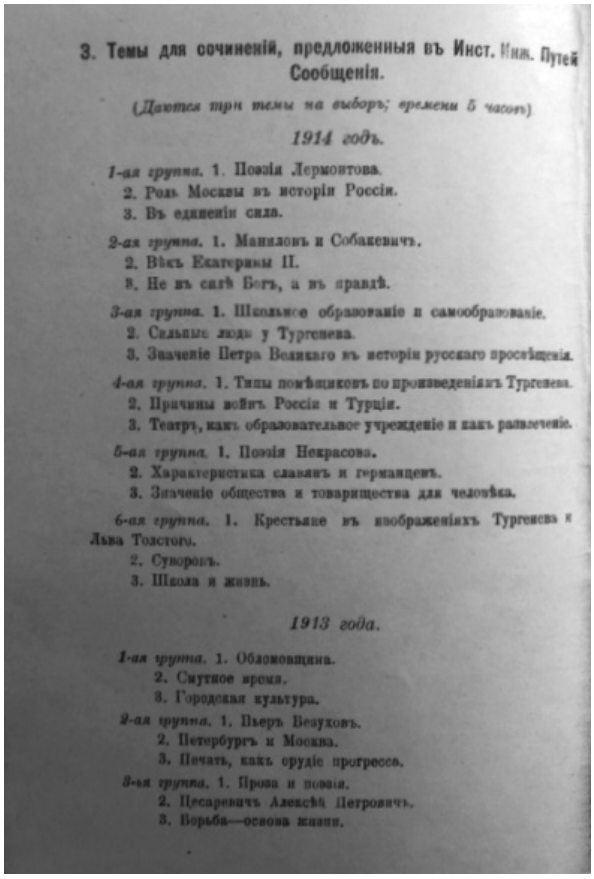
Легчій вопросъ. Будетъ ли геом. прогрессія со знаменателемъ $\sqrt{-1}$ возрастающая, или убывающая?

II. Билетъ № 5. 1) Понятіе объ алгебраическомъ неравенствѣ. Доказать неравенство: $(a+b)\left(b+\frac{c}{2}\right)(a+c)\geqslant 8abc$, при положительныхъ a, b и c.

2) Простѣйшія показательныя уравненія. Рѣшить систему: $x^y=5$; $(5x)^{y^2}=125$.

3) Нѣкоторыя замѣчанія о случаѣ, когда цѣлое число A не имѣетъ цѣлаго корня m-овой степени и теорема: если цѣлое число A не имѣетъ цѣлаго корня m-овой степени, то не имѣетъ и дробнаго.

Рис. 1. Образец экзаменационного билета по алгебре



3. Темы для сочиненій, предложенныя въ Инст. Инж. Путей Сообщенія.

(Даются три темы на выборъ; времени 5 часовъ)

1914 годъ.

1-ая группа. 1. Поэзія Лермонтова.
2. Роль Москвы въ исторіи Россіи.
3. Въ единеніи сила.

2-ая группа. 1. Маниловъ и Собакевичъ.
2. Вѣкъ Екатерины II.
3. Не въ силѣ Богъ, а въ правдѣ.

3-ая группа. 1. Школьное образованіе и самообразованіе.
2. Сильные люди у Тургенева.
3. Значеніе Петра Великаго въ исторіи русскаго просвѣщенія.

4-ая группа. 1. Типы помѣщиковъ по произведеніямъ Тургенева.
2. Причины войнъ Россіи и Турціи.
3. Театръ, какъ образовательное учрежденіе и какъ развлеченіе.

5-ая группа. 1. Поэзія Некрасова.
2. Характеристика славянъ и германцевъ.
3. Значеніе общества и товарищества для человѣка.

6-ая группа. 1. Крестьяне въ изображеніяхъ Тургенева и Льва Толстого.
2. Суворовъ.
3. Школа и жизнь.

1913 года.

1-ая группа. 1. Обломовщина.
2. Смутное время.
3. Городская культура.

2-ая группа. 1. Пьеръ Безуховъ.
2. Петербургъ и Москва.
3. Печать, какъ орудіе прогресса.

3-ья группа. 1. Проза и поэзія.
2. Цесаревичъ Алексѣй Петровичъ.
3. Борьба—основа жизни.

Рис. 2. Некоторые предлагаемые темы сочинений на вступительных экзаменах

силу самых разнообразных причин, в этом случае семинарские занятия были более эффективными. Однако предусматривалась возможность оставления части предметов и на старом – лекционном – методе, но при этом Главпрофобр* все же рекомендовал перейти на систему группового экзамена, т. е. спрашивать сразу группу в 5–10 человек.

Поиски новых систем преподавания закончились в начале 1930-х годов возвращением к лекциям и восстановлением индивидуальных экзаменов. С 1932 г. экзамены стали проводиться только в периоды весенней и зимней сессий, знания студентов начали оценивать сначала по пятибалльной, а затем по четырехбалльной системе: «отлично», «хорошо», «посредственно», «неудовлетворительно».

В последнее время для проверки усвоения материала мы постепенно переходим к различным формам тестирования. Существует множество различных видов тестов, но в целом они построены по принципу постепенного усложнения вопросов (задач). Предполагается, что при этом можно эффективно измерить уровень знаний и качественно оценить степень подготовленности учащихся. Считается, что такой контроль развивает учащихся, способствует изучению предмета, приучает к систематическому труду, а также имеет большое воспитательное значение. Кроме того, он формирует у них положительные нравственные качества и создает здоровое общественное мнение.

Однако существует и другое мнение: «Результаты решения тестовых задач легко поддаются

* Главное управление профессионального образования (*Главпрофобр*) – центральный орган управления профессиональным образованием в РСФСР в 1920–1930 гг.

количественной оценке и статистической обработке, что создает видимость объективности испытания. В действительности же при применении теста фиксируется лишь конечный результат исследуемого процесса (ответ, данный испытуемым лицом). Самый же процесс, который привел к тому или иному результату, обычно не вскрывается. Поэтому диагностической и прогностической ценности большинство тестов не имеют» [12, с. 367].

Истина, как всегда, находится где-то посредине. С одной стороны, возрастающая оцифровка преподавания и обучения и связанные с этим изменения требуют новых подходов в организации процессов проверки знаний. Но: Вы принимаете кого-то на работу, на ответственную работу. Вы проведете встречу или дадите безликий тест? По нашему мнению, риторический вопрос.

Видимо, наилучший вариант – комплексное использование тестовых и нетестовых форм контроля, что, в конечном счете, будет направлено на повышение качества обучения.

Библиографический список

1. Указ № 2778 от 28 февраля 1714 г. // Полное собрание законов Российской Империи с 1649 года. Т. V (1713–1719). – СПб.: Типография II отделения Собственной Его Императорского Величества Канцелярии, 1830.

2. Указ № 23.771 от 6 августа1809 г. // Полное собрание законов Российской Империи с 1649 года. Т. XXX (1808–1809). – СПб.: Типография II отделения Собственной Его Императорского Величества Канцелярии, 1830.

3. Ларионов А. М. История института инженеров путей сообщения Императора Александра I-го за первое столетие его существования. 1810–1910 / А. М. Ларионов. – СПб.: Типография Ю. Н. Эрлих, 1910.

4. Воронина М. М. Габриэль Ламе / М. М. Воронина. – Л.: Наука, 1987.

5. Воспоминания В. А. Панаева // Русская старина. – 1893. – Т. LXXIX, октябрь. – Типография Высочайше утвержд. товарищества «Общественная польза». – С. 74.

6. Воспоминания В. А. Панаева // Русская старина. – 1893. – Т. LXXIX, сентябрь. – Типография Высочайше утвержд. товарищества «Общественная польза». – С. 488.

7. Менделеев Д. И. Соч. / Д. И. Менделеев. – М.: Изд-во АН СССР, 1952. – Т. XXIII.

8. Центральный государственный исторический архив Санкт-Петербурга (ЦГИА СПб). – 1901. – Ф. 381. – Оп. 1. – Д. 560. – Л. 810об.

9. Тимошенко С. П. Воспоминания / С. П. Тимошенко. – Киев: Наукова думка, 1993.

10. Шмулевич П. К. Сборник задач, предлагавшихся на конкурсных экзаменах при поступлении в специальные высшие учебные заведения / П. К. Шмулевич. – Пг.: Типография товарищества «Екатерингофское Печатное Дело», 1916.

11. Центральный государственный архив Санкт-Петербурга (ЦГА СПб). – 1925. – Ф. 2556. – Оп. 1. – Д. 11. – Л. 463.

12. Большая Советская Энциклопедия. – М.: Гос. изд-во «Большая Советская Энциклопедия», 1956. – Т. 42.

Дата поступления: 18.10.2021
Решение о публикации: 28.10.2021

Контактная информация:
ВЕЛИКОРУССОВ Петр Викторович – руководитель центра довузовской профориентации; p.velikorussov@gmail.com
ВОРОНИНА Маргарита Михайловна – д-р техн. наук, проф.; voronina.pgups@gmail.com
ШЕВЧЕНКО Михаил Максимович – д-р ист. наук, проф.; mixail.shevchenko.44@mail.ru

On the history of the question of checking students' knowledge on the example of the Institute of Railway Engineers

P. V. Velikorussov [1], **M. M. Voronina** [2], **M. M. Shevchenko** [3]

[1] Irkutsk National Research Technical University, 83, ul. Lermontov, Irkutsk, 664074, Russian Federation
[2] Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation
[3] Saint Petersburg State Marine Technical University, 101, Leninsky pr., Saint Petersburg, 198262, Russian Federation

For citation: Velikorussov P. V., Voronina M. M., Shevchenko M. M. On the history of the question of checking students' knowledge on the example of the Institute of Railway Engineers. *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2021, vol. 18, iss. 4, pp. 546–553. (In Russian)
DOI: 10.20295/1815-588X-2021-4-546-553

Summary

Objective: To study the requirements imposed on students to check their mastering of the material after the end of the course of sciences, to consider the changes that took place over the centuries in the process of testing knowledge: from the most primitive (for example, when entering the workers' faculty, knowledge of arithmetic was required within the first ten), to rather complex, non-standard (for example, clausura). To describe the best teaching and knowledge testing methods and the need to improve them now. **Methods:** A comparative analysis of entrance, public, final exams in different years of the existence of the Institute of Railway Engineers is carried out. The test results presented demonstrate the level of knowledge and teaching efficiency. **Results:** The need to improve the process of checking knowledge has been proven in order to teach students independence, the ability to work with literature, analyze and think critically. **Practical importance:** Analysis and study of the history of entrance, transfer, final exams for different years make it possible to give some predictions for the present time. Now the increasing digitization of teaching and learning and the related changes require new approaches to organizing learning and knowledge testing. The necessity of simultaneous use of the standard procedure for checking the acquired material and testing in modern conditions is shown. Their adjustment and interconnection will improve the objectivity of the assessment and, most importantly, the quality of education.

Ключевые слова. Knowledge testing, entrance, public exams, clausuras, testing.

References

1. Ukaz no. 2778 ot 28 fevralya 1714 g. [Decree N 2778 of February 28, 1714]. *Polnoye sobraniye zakonov Rossiyskoy Imperii s 1649 goda* [*Complete collection of laws of the Russian Empire since 1649*]. Vol. V (1713–1719). Saint Petersburg, Printing House of the II Branch of His Imperial Majesty's Own Chancellery, 1830. (In Russian)

2. Ukaz no. 23.771 ot 6 avgusta 1809 g. [Decree N 23. 771 of August 06, 1809]. *Polnoye sobraniye zakonov Rossiyskoy Imperii s 1649 goda* [*Complete collection of laws of the Russian Empire since 1649*]. Vol. XXX (1808–1809). Saint Petersburg, Printing House of the II Branch of His Imperial Majesty's Own Chancellery, 1830. (In Russian)

3. Larionov A. M. *Istoriya instituta inzhenerov putey soobshcheniya Imperatora Aleksandra I-go za pervoye stoletiye yego sushchestvovaniya. 1810–1910* [*History of Emperor Alexander I Institute of Railway Engineers over the first century of its existence. 1810–1910*]. Saint Petersburg, Tipografiya Yu. N. Erlikh Publ., 1910 (In Russian)

4. Voronina M. M. *Gabriel' Lame* [*Gabriel Lamé*]. Leningrad, Nauka Publ., 1987 (In Russian)

5. Vospominaniya V. A. Panayeva [Memories of V.A. Panaev]. *Russkaya starina* [*Russian antiquity*], 1893, vol. LXXIX, October, p. 74. (In Russian)

6. Vospominaniya V. A. Panayeva [Memories of V. A. Panaev]. *Russkaya starina* [*Russian antiquity*], 1893, vol. LXXIX, September, p. 488. (In Russian)

7. Mendeleev D. I. *Sochineniya* [*Written works*]. Moscow, Izd-vo AN SSSR Publ., 1952, vol. XXIII. (In Russian)

8. *Tsentral'nyy gosudarstvennyy istoricheskiy arkhiv Sankt-Peterburga (TSGIA SPb)* [*Central State Historical Archives of Saint Petersburg (TsGIA SPb)*], 1901, Fund. 381, List of files 1, File 560, Sheet 810 (reverse). (In Russian)

9. Timoshenko S.P. *Vospominaniya* [*Memories*]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1993. (In Russian)

10. Shmulevich P. K. *Sbornik zadach, predlagavshikhsya na konkursnykh ekzamenakh pri postuplenii v spetsial'nyye vysshiye uchebnyye zavedeniya* [*Collection of problems proposed in competitive exams for admission to special higher educational institutions*]. Petrograd, Tipografiya tovarishchestva "Yekateringofskoye Pechatnoye Delo" Publ., 1916. (In Russian)

11. *Tsentral'nyy gosudarstvennyy istoricheskiy arkhiv Sankt-Peterburga* (*TSGIA SPb*) [*Central State Historical Archives of St. Petersburg* (*TsGIA SPb*)]. 1925, Fund 2556, List of files 1, File 11, Sheet 463. (In Russian)

12. *Bol'shaya Sovetskaya Entsiklopediya* [*Great Soviet Encyclopedia*]. Moscow, Gosudarstvennoye izdatel'stvo «Bol'shaya Sovetskaya Entsiklopediya», 1956, vol. 42. (In Russian)

Received: October 18, 2021
Accepted: October 28, 2021

Author's information:
Petr V. VELIKORUSSOV – Head of the Center for Pre-University Career Guidance; p.velikorussov@gmail.com
Margarita M. VORONINA – D. Sci. in Engineering, Professor; voronina.pgups@gmail.com
Mikhail M. SHEVCHENKO – D. Sci. in History, Professor; mixail-.shevchenko.44@mail.ru

УДК 629.4.015

Источник питания для позиции безразборной диагностики подшипников

А. П. Зеленченко, А. А. Богдан, М. Ш. Шадмонходжаев

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

Для цитирования: *Зеленченко А. П., Богдан А. А., Шадмонходжаев М. Ш.* Источник питания для позиции безразборной диагностики подшипников // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2021. – Т. 18. – Вып. 4. – С. 554–560.
DOI: 10.20295/1815-588X-2021-4-554-560

Аннотация

Цель: Рассмотрены два возможных варианта источников питания: управляемая трехфазная мостовая схема выпрямления с понижающим трансформатором и импульсный преобразователь, получающий питание от сети через неуправляемый трехфазный мостовой выпрямитель для приведения во вращение с требуемой частотой колесно-моторных блоков электровозов и электропоездов на позиции безразборной диагностики подшипников. В обоих случаях предполагается, что источники питания получают электроэнергию от сети 380/220 В, 50 Гц. Нагрузкой источника питания являются тяговые двигатели электропоездов ЭР2Р, ЭР2Т, ЭТ2, ЭТ2М и электровоза ВЛ-10. **Методы:** Используется математическое моделирование в среде MatLab/Simulink к аналитическим расчетам. **Результаты:** Были определены токи и напряжения нагрузки, на основании расчетов углы регулирования и коэффициенты мощности выпрямителя с понижающим трансформатором, коэффициент заполнения импульсного преобразователя. **Практическая значимость:** Предложен вариант энергоэффективного источника питания, включающего в себя неуправляемый выпрямитель и импульсный преобразователь.

Ключевые слова: Электроподвижной состав, виброакустическая диагностика, позиции безразборной диагностики подшипников, источники питания, выпрямитель, импульсный преобразователь, понижающий трансформатор.

Источник питания предназначен для приведения во вращение с требуемой частотой колесно-моторных блоков электровозов и электропоездов на позиции безразборной диагностики подшипников.

Рассматриваются два возможных варианта источников питания:

– управляемая трехфазная мостовая схема выпрямления (мост Ларионова) с понижающим трансформатором (рис. 1, *I*);

– импульсный преобразователь, получающий питание от сети через неуправляемый трехфазный мостовой выпрямитель (рис. 1, *II*).

В обоих случаях предполагается, что источники питания получают электроэнергию от сети 380/220 В, 50 Гц. Нагрузкой источника питания являются тяговые двигатели электропоездов ЭР2Р, ЭР2Т, ЭТ2, ЭТ2М и электровоза ВЛ-10.

Параметры тяговых двигателей приведены в табл. 1.

Цель статьи – рассмотрение предлагаемых вариантов источников питания на основании оценки эффективности энергопотребления. В качестве критерия эффективности энергопотребления используется коэффициент мощности, поскольку он является комплексным по-

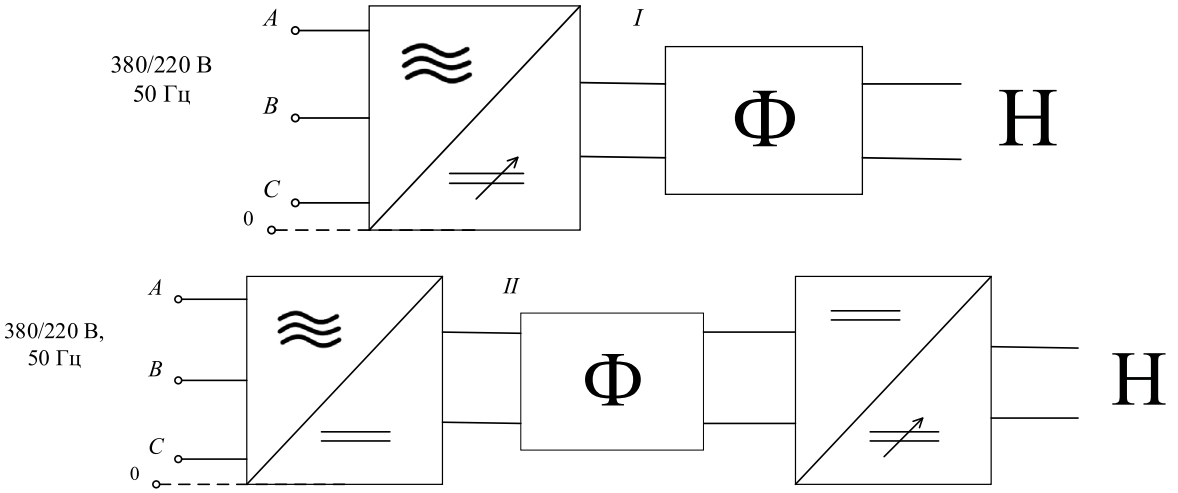


Рис. 1. Управляемый трехфазный трансформаторный выпрямитель (*I*) и безтрансформаторный трехфазный выпрямитель с импульсным преобразователем (*II*): Ф – фильтр; Н – нагрузка

ТАБЛИЦА 1. Параметры тяговые двигателей

Показатели	Характеристики двигателей типа	
	1ДТ-003	ТЛ2К1
Требуемая частота вращения при диагностике, об/мин	150	
Сопротивление обмоток якоря, Ом	0,0715	0,0317
Сопротивление обмоток главных полюсов, Ом	0,13	0,025
Сопротивление обмоток добавочных полюсов, Ом	0,021	0,0365
Сопротивление компенсационных обмоток, Ом	–	

казателем эффективности энергопотребления и характеризует степень нежелательного влияния источника питания как потребителя реактивной мощности и генератора высших гармоник на питающую сеть [1–10].

На основании математического моделирования в среде MatLab/Simulink были определены величины токов ($I_н$) и напряжений нагрузки ($U_н$):

Двигатель	1ДТ-003	ТЛ2К1
$I_н$, А	9,2	30,2
$U_н$, В	70	132

В результате расчетов при коэффициентах трансформации понижающего трансформатора $k = 2, 3, 4, 5$ были определены углы регулирования выпрямителя α и коэффициенты мощности $K_м$ (табл. 2).

Угол регулирования α определяется зависимостью

$$\alpha = \arccos(U_н / (K_{сх} \cdot E_2)),$$

где коэффициент схемы $K_{сх} = 2{,}34$; E_2 – действующее значение фазной электродвижущей силы вторичной обмотки трансформатора.

Коэффициент мощности определяется соотношением

$$K_м = k_{и(i)} \cdot \cos(\alpha + \gamma/2),$$

в котором γ – угол коммутации, принимаемый равным 0; $k_{и(i)} = 0{,}955$ – коэффициент искажения формы тока, потребляемого из сети.

На рис. 2 приведены зависимости $\alpha = f(k)$ и $K_м = f(k)$ для разных двигателей.

ТАБЛИЦА 2. Углы регулирования выпрямителя и коэффициенты мощности

Показатель	Коэффициент трансформации, k	Двигатель	
		1ДТ-003	ТЛ2К1
α	2	74,26	59,18
	3	65,96	39,74
	4	57,08	–
	5	47,19	–
cosα	2	0,27	0,51
	3	0,41	0,77
	4	0,54	1,03
	5	0,68	1,28
$K_м$	2	0,26	0,49
	3	0,39	0,73
	4	0,52	–
	5	0,65	–

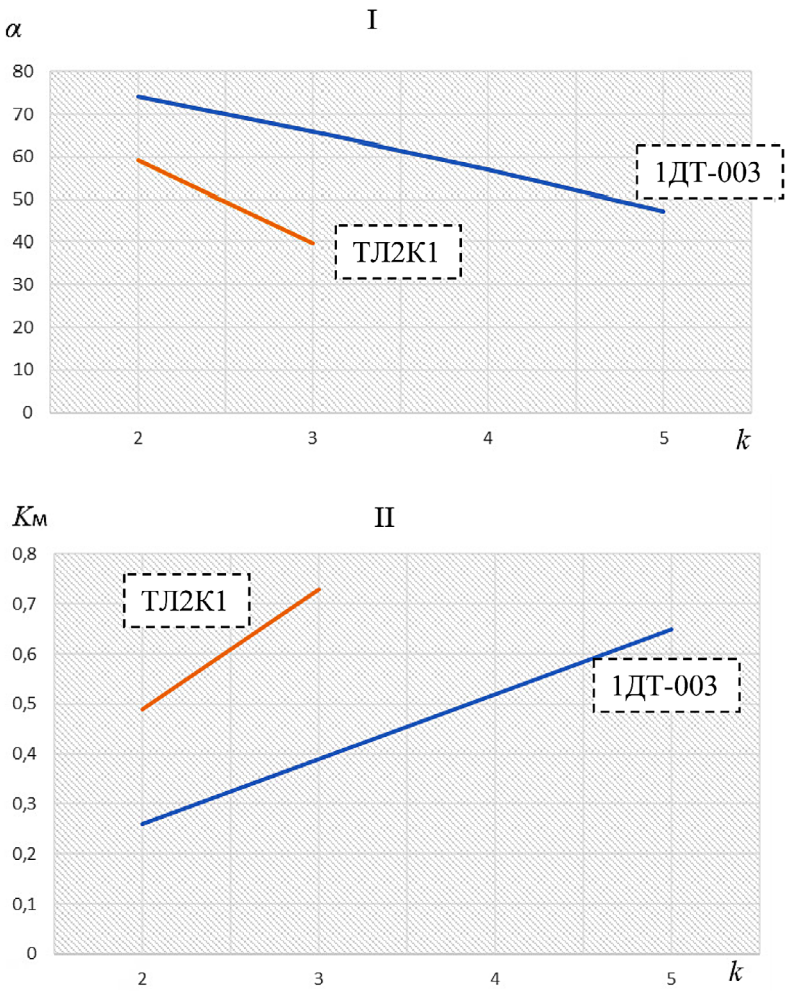


Рис. 2. Зависимости α = $f(k)$ (I) и $K_м = f(k)$ (II) для двигателей 1ДТ-003 и ТЛ2К1

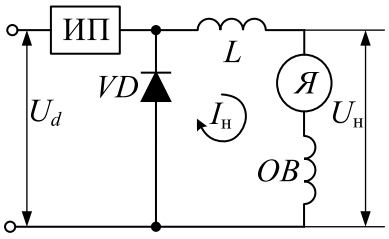


Рис. 3. Схема, иллюстрирующая принцип ИРН: *VD* – обратный диод; *L* – сглаживающий реактор; *Я, ОВ* – якорь и обмотки возбуждения тягового двигателя соответственно

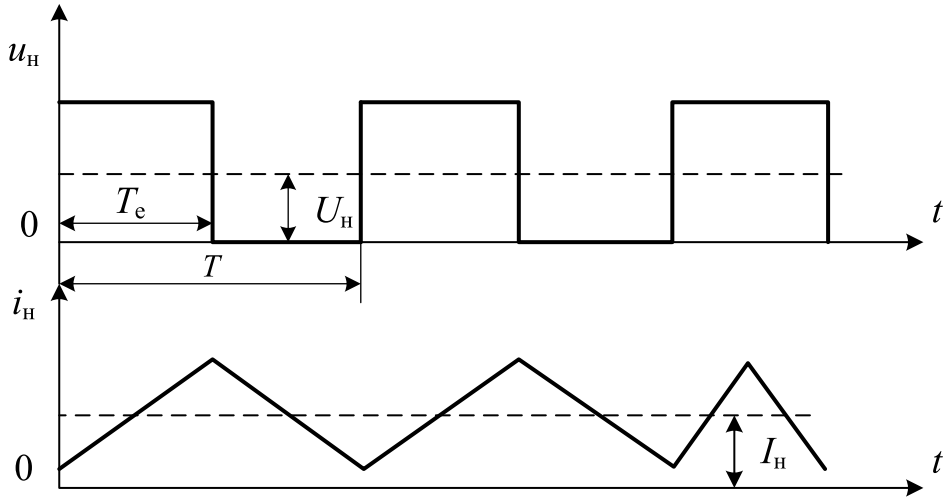


Рис. 4. Временные диаграммы, иллюстрирующие принцип ИРН

Было установлено, что увеличение коэффициента трансформации понижающего трансформатора позволяет уменьшить угол регулирования и увеличить коэффициент мощности выпрямительной установки. Однако при росте коэффициента мощности источника питания появляется возможность импульсного регулирования напряжения (ИРН) (рис. 3), суть которого состоит в превращении постоянного входного напряжения U_d в последовательность импульсов с помощью импульсного преобразователя (ИП).

Независимо от конструктивного исполнения ИП является ключом, с помощью которого осуществляются подключение и отключение напряжения U_d к нагрузке.

На рис. 4 представлены временные диаграммы $u_н(t)$, $i_н(t)$, иллюстрирующие принцип ИРН. Изменяя временные параметры импульсов T_e, величина T регулирует среднее напряжение на нагрузке $U_н$.

ИРН может быть реализовано двумя способами:

– частотным:

$$T_e = \text{const}, \; T = \text{Var};$$

– широтным:

$$T_e = \text{Var}, \; T = \text{const}.$$

Приведем данные расчетов коэффициента заполнения импульсного преобразователя:

Двигатель	1ДТ-003	ТЛ2К1
U_d, В	514,8	
λ	0,136	0,256

Следовательно, в результате проведенной работы установлено, что:

1) при требуемых нагрузках управляемая трехфазная мостовая схема выпрямления с понижающим трансформатором имеет низкие значения коэффициентов мощности;

2) коэффициент мощности импульсного преобразователя, получающего питание от сети переменного тока через неуправляемый выпрямитель при тех же нагрузках, равен 1, что обеспечивает требуемые параметры регулирования токов и напряжений.

Библиографический список

1. Шадмонходжаев М. Ш. Позиция диагностики межкатушечных соединений тягового двигателя / М. Ш. Шадмонходжаев, А. П. Зеленченко // Транспорт: проблемы, идеи, перспективы. – 2019. – № LXXIX. – С. 78–81.

2. Шадмонходжаев М. Ш. Позиция виброакустической диагностики подшипников качения электрического подвижного состава / М. Ш. Шадмонходжаев, А. П. Зеленченко // Тяговый подвижной состав. – 2019. – № 210. – С. 80–81.

3. Зеленченко А. П. Основы диагностики подшипников качения электрического подвижного состава: учеб. пособие / А. П. Зеленченко, Н. В. Орехова, Д. В. Федоров. – СПб.: ПГУПС, 2001. – 28 с.

4. Зеленченко А. П. Техническая диагностика электрического подвижного состава: учеб. пособие / А. П. Зеленченко, А. Е. Цаплин, И. А. Ролле. – СПб.: ПГУПС, 2016. – 67 с.

5. Определение состояния подшипникового узла методом акустической эмиссии: метод. указания к лабораторной работе / сост. А. П. Зеленченко. – СПб.: ПГУПС, 2004. – 8 с.

6. Плакс А. В. Диагностика тяговых двигателей электрического подвижного состава: учеб. пособие / А. В. Плакс, А. П. Зеленченко, А. П. Бояринов. – СПб.: ПГУПС, 1999. – 34 с.

7. Зеленченко А. П. Надежность электрического подвижного состава: учеб. пособие / А. П. Зеленченко. – СПб.: ПГУПС, 2001. – 36 с.

8. Зеленченко А. П. Устройства диагностики тяговых двигателей электрического подвижного состава / А. П. Зеленченко. – М.: МПС РФ, Департамент кадров и учебных заведений, Учеб.-метод. кабинет, 2002. – 37 с.

9. Зеленченко А. П. Диагностические комплексы электрического подвижного состава: учеб. пособие / А. П. Зеленченко, Д. В. Федоров. – М.: Учеб.-метод. центр по образованию на ж.-д. транспорте, 2014. – 112 с.

10. Зеленченко А. П. Информационные технологии и системы диагностики при эксплуатации и обслуживании электрического подвижного состава: учеб. пособие / А. П. Зеленченко, В. О. Иващенко. – СПб.: ПГУПС, 2017. – 50 с.

Дата поступления: 21.10.2021
Решение о публикации: 26.10.2021

Контактная информация:
ЗЕЛЕНЧЕНКО Алексей Петрович – канд. техн. наук, доц.; v-zelenchenko46@mail.ru
БОГДАН Антон Анатольевич – канд. техн. наук, доц.; antonbogdan79@mail.ru
ШАДМОНХОДЖАЕВ Муродилла Шухратиллаевич – аспирант; smurodilla@gmail.com

Power supply for a CIP position for bearings

A. P. Zelenchenko, A. A. Bogdan, M. Sh. Shadmonkhodzhaev

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

For citation: Zelenchenko A. P., Bogdan A. A., Shadmonkhodzhaev M. Sh. Power supply for a CIP position for bearings. *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2021, vol. 18, iss. 4, pp. 554–560. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2021-4-554-560

Summary

Objective: Two possible options for power sources are considered: a controlled three-phase bridge rectifier circuit with a step-down transformer and a pulse converter receiving power from the network through an uncontrolled three-phase bridge rectifier to drive the wheel-motor units of electric locomotives and electric trains into rotation with the required frequency at the position of CIP bearing diagnostics. In both cases, it is assumed that the power supplies receive electricity from the 380/220 V, 50 Hz network. The power source is loaded with traction motors of the ER2R, ER2T, ET2, ET2M electric trains and the VL-10 electric locomotive. **Methods:** Mathematical modeling is used in the MatLab/Simulink environment for analytical calculations. **Results:** The currents and voltages of the load were determined, based on the calculations, the control angles and power factors of the rectifier with a step-down transformer, the duty cycle of the pulse converter. **Practical importance:** A variant of an energy-efficient power supply is proposed, including an uncontrolled rectifier and a pulse converter.

Keywords: Electric rolling stock, vibroacoustic diagnostics, CIP positions for bearings, power supplies, rectifier, pulse converter, step-down transformer.

References

1. Shadmonkhodzhaev M. Sh. & Zelenchenko A. P. Pozitsiya diagnostiki mezhkatushechnykh soyedineniy tyagovogo dvigatelya [Position of diagnostics of coil-to-coil connections of a traction motor]. *Transport: problemy, idei, perspektivy* [*Transport: problems, ideas, prospects*], 2019, no. LXXIX, pp. 78–81. (In Russian)

2. Shadmonkhodzhaev M. Sh. & Zelenchenko A. P. Pozitsiya vibroakusticheskoy diagnostiki podshipnikov kacheniya elektricheskogo podvizhnogo sostava [Position of vibroacoustic diagnostics of rolling bearings of electric rolling stock]. *Tyagovyy podvizhnoy sostav* [*Traction rolling stock*], 2019, no. 210, pp. 80–81. (In Russian)

3. Zelenchenko A. P., Orekhova N. V. & Fedorov D. V. *Osnovy diagnostiki podshipnikov kacheniya elektricheskogo podvizhnogo sostava*. Uchebnoye posobiye [*Fundamentals of diagnostics of rolling bearings of electric rolling stock*. Tutorial]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2001, 28 p. (In Russian)

4. Zelenchenko A. P., Tsaplin A. E. & Rolle I. A. *Tekhnicheskaya diagnostika elektricheskogo podvizhnogo sostava*. Uchebnoye posobiye [*Technical diagnostics of electric rolling stock*. Tutorial]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2016, 67 c. (In Russian)

5. *Opredeleniye sostoyaniya podshipnikovogo uzla metodom akusticheskoy emissii*. Metodicheskiye ukazaniya k laboratornoy rabote [*Determination of the state of the bearing assembly by the acoustic emission method*. Methodical instructions for laboratory work]. Compiled by A. P. Zelenchenko. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2004, 8 p. (In Russian)

6. Plaks A. V., Zelenchenko A. P. & Boyarinov A. P. *Diagnostika tyagovykh dvigateley elektricheskogo podvizhno-*

go sostava. Uchebnoye posobiye [*Diagnostics of traction motors of electric rolling stock*. Tutorial]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 1999, 34 p. (In Russian)

7. Zelenchenko A. P. *Nadezhnost' elektricheskogo podvizhnogo sostava.* Uchebnoye posobiye [*Reliability of electric rolling stock*. Tutorial]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2001, 36 p. (In Russian)

8. Zelenchenko A. P. *Ustroystva diagnostiki tyagovykh dvigateley elektricheskogo podvizhnogo sostava* [*Diagnostic devices for traction motors of electric rolling stock*]. Moscow, MPS RF [Ministry of Railways of the Russian Federation] Publ., 2002, 37 p. (In Russian)

9. Zelenchenko A. P. & Fedorov D. V. *Diagnosticheskiye kompleksy elektricheskogo podvizhnogo sostava*. Uchebnoye posobiye [*Diagnostic complexes for electric rolling stock*. Tutorial]. Moscow, Uchebno-metodicheskiy tsentr po obrazovaniyu na zh.-d. transporte [Training and Methodological center for education on the railway transport] Publ., 2014, 112 p. (In Russian)

10. Zelenchenko A. P. & Ivashchenko V. O. *Informatsionnyye tekhnologii i sistemy diagnostiki pri ekspluatatsii i obsluzhivanii elektricheskogo podvizhnogo sostava*. Uchebnoye posobiye [*Information technologies and diagnostic systems during the operation and maintenance of electric rolling stock*. Tutorial]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2017, 50 p. (In Russian)

Received: October 21, 2021
Accepted: October 26, 2021

Author's information:
Alexey P. ZELENCHENKO – PhD in Engineering, Associate Professor; v-zelenchenko46@mail.ru
Anton A. BOGDAN – PhD in Engineering, Associate Professor; antonbogdan79@mail.ru
Murodilla Sh. SHADMONKHODZHAEV – Postgraduate Student; smurodilla@gmail.com

УДК 656

Анализ проблем механических редукторов транспортных систем и их решение с помощью магнитного датчика

Ю. В. Креселюк

Луганский государственный университет имени Владимира Даля, Луганская Народная Республика, 91034, Луганск, квартал Молодежный, 20-а

Для цитирования: *Креселюк Ю. В.* Анализ проблем механических редукторов транспортных систем и их решение с помощью магнитного датчика // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2021. – Т. 18. – Вып. 4. – С. 561–570.
DOI: 10.20295/1815-588X-2021-4-561-570

Аннотация

Цель: Повысить надежность механических редукторов при помощи магнитного датчика, что в основном существенно увеличит надежность транспортных механизмов и систем в целом. **Методы:** Проведен анализ происшествий, которые были освещены в средствах массовой информации. **Результаты:** Сделаны выводы о последствиях выхода из строя механических редукторов. Для предотвращения аварийных ситуаций, связанных с поломкой механического редуктора, предлагается применение магнитного датчика, с помощью которого производятся анализ и диагностика редуктора и его составляющих в процессе эксплуатации. Составлена математическая модель магнитного датчика и представлена блок-схема устройства обработки выходного сигнала модулятора датчика. **Практическая значимость:** Поломки механического редуктора – распространенная проблема, которая приводит к остановке транспортных механизмов и систем. Обнаружение неисправности механического редуктора позволяет значительно сократить стоимость ремонта, а также предотвратить неожиданную поломку механизма, которая может привести к полной остановке транспортной системы. Использование магнитного датчика в тяговом редукторе электропоезда уменьшит вероятность поломки тягового редуктора в процессе эксплуатации и снизит стоимость ремонта, увеличит надежность работы тяговой передачи, а также упростит введение в эксплуатацию новых электропоездов и тяговых редукторов.

Ключевые слова: Механический редуктор, магнитный датчик, транспортная система, электропоезд.

Введение

В настоящее время надежность транспортных машин имеет большое значение для предприятий и экономики в целом. Все звенья транспортных машин должны обладать достаточным уровнем безотказности и долговечности. Повышение уровня надежности самого слабого и уязвимого отдельного звена существенно увеличивает надежность всего механизма в целом.

Механический редуктор широко распространен как в промышленности, так и на транспорте. Он регулирует частоту вращения и момент передачи нагрузки от привода к исполнительным органам [1], а также является одним из наиболее ответственных участков, и выход его из строя может привести к значительному ущербу, который исчисляется не только экономическими затратами, но и человеческими жизнями.

К основным причинам выхода механического редуктора из строя [2] относятся:

– повреждение и критический износ подшипников;

– различные повреждения или отсутствие зубьев на зубчатых колесах и ведомых валах;

– нарушение центровки валов.

Постановка проблемы

Все неисправности редуктора в настоящее время определяются визуально, вибрационными или акустическими методами [3, 4]. Но часто эти неисправности уже свидетельствуют о серьезной поломке и требуют значительно больше времени на устранение, чем если были бы выявлены в начальный момент формирования дефекта. При поломке или дефекте одного компонента механического редуктора и его дальнейшая эксплуатация неизбежно приведут к поломке других компонентов, а затем и к полному отказу.

Рассмотрим происшествия, которые были освещены в средствах массовой информации:

1) 24 июня 2021 г. вертолет санитарной авиации Ми-8 совершил аварийную посадку в 130 км от Новосибирска, причиной ее стали неисправности главного редуктора;

2) в Харьковской области (Украина) 3 февраля 2010 г. два вагона электропоезда сошли с рельс из-за поломки малой шестерни главного редуктора, в результате было задержано движение других поездов, но удалось избежать человеческих жертв и загрязнения окружающей среды;

3) в Республике Саха (Якутия) Российской Федерации на переправе Мегино-Алдан – Крест-Хальджай через р. Алдан 4 октября 2019 г. произошла поломка редуктора на буксире с баржой, в результате баржа была отцеплена и заякорена, буксир проследовал на берег для ремонта редуктора;

4) вертолет Ми-8Т авиакомпании АО «Норильскавиа», в котором находились 3 члена экипажа и 16 пассажиров, 24 февраля 2021 г. следовал по регулярному маршруту Дудинка – Усть-Авам (поселок на Таймыре) и через 28 км экипаж принял решение садиться из-за технических неполадок главного редуктора;

5) в 1988 г. во время круиза из Тильбери (Великобритания) в Карибское море произошла крупная авария, из-за скрытого заводского дефекта началась выработка гребного вала и ступицы, возникшая по причине трения между деталями вала и шестернями, в результате зубчатое колесо было расцентрировано и были сломаны девять зубьев колеса редуктора;

6) 6 июня 2021 г. произошла из-за поломки тягового редуктора экстренная остановка поезда, следовавшего по маршруту «Волгоград – Урюпино», из-за удаленности от населенных пунктов ждать транспорт людям пришлось около 4 ч, и это притом, что ночью температура воздуха опустилась ниже 13°, также были задержаны другие поезда.

Вышеперечисленные происшествия не отражают проблему в полном масштабе, поломки механического редуктора – распространенная проблема, которая может вызывать остановку целых производственных линий, цехов и даже предприятий. Если не обнаружить проблему на ранней стадии и не устранить ее, поломка механического редуктора неизбежно приведет к финансовым потерям и поставит под угрозу безопасность людей.

Решение проблемы

Для предотвращения аварийных ситуаций, связанных с поломкой механического редуктора в процессе эксплуатации, предлагается применять магнитный датчик, благодаря которому производится анализ редуктора и его составляющих. С помощью данного датчика возможны:

– диагностика ошибок зацепления;

– диагностика износа зубьев;

– диагностика целостности зубьев;

– определение отсутствия или изменение геометрии зуба зубчатого колеса (ЗК);

– определение повреждения подшипников.

Конструкция магнитного датчика может иметь множество вариантов [5, 6]. Рассмотрим цилиндрический датчик со встроенным модулятором (рис. 1). Данная магнитная система состоит из двух магнитопроводов: внешнего и внутреннего. На внутреннем располагается модулятор с обмоткой возбуждения и выходной обмоткой, с которой снимается сигнал.

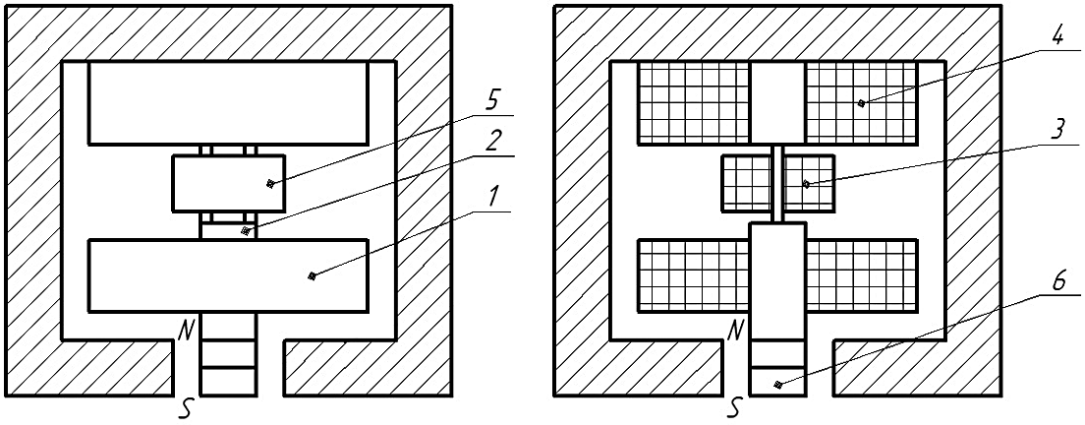


Рис. 1. Конструкция цилиндрического датчика с модулятором: *1* – внешний магнитопровод; *2* – внутренний магнитопровод; *3* – катушки возбуждения; *4* – выходные обмотки; *5* – модулятор; *6* – постоянный магнит (ПМ)

Математическая модель магнитного поля датчика

Математическая модель магнитного поля датчика основана на уравнении Фредгольма 1-го рода. В линейной изотропной среде потенциал магнитного поля эквипотенциальной поверхности с распределенными зарядами простого слоя равен [7]

$$\varphi(Q) = \frac{1}{4\pi\mu_0} \oint \frac{\sigma(p)}{\left|\overline{r_Q} - \overline{r_P}\right|} dS, \qquad (1)$$

где P – точка источника; Q – точка наблюдения (рис. 2); σ (ρ) – поверхностная плотность магнитных зарядов постоянного слоя.

Считается, что

$$\lim_{|r_a|\to\infty} \varphi(Q) = 0.$$

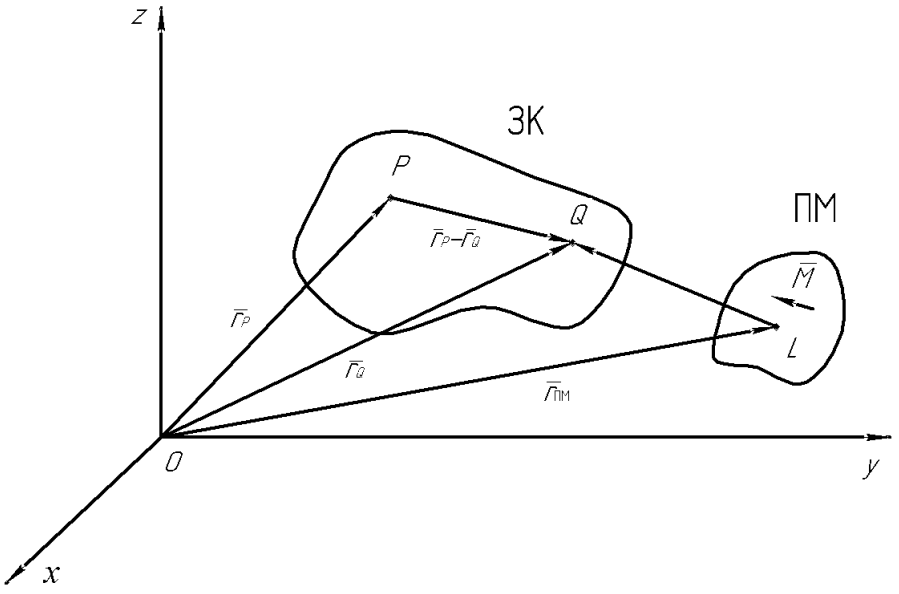


Рис. 2. К расчету поля решения уравнения Фредгольма 1-го рода (L – точка источника постоянного магнитного поля; $\overline{M}$ – направление магнитного поля)

Из теории потенциала [8] известно, что функция потенциала непрерывна при переходе точки на эквипотенциальную поверхность S, значит, из формулы (1) следует интегральное уравнение

$$\overline{\varphi} = \overline{A} \cdot \overline{\sigma}, \qquad (2)$$

в котором A – интегральный оператор

$$A = \frac{1}{4\pi\mu_0} \int_S \frac{1}{\left|\overline{r_Q} - \overline{r_P}\right|} dS .$$

Для плоскопараллельного поля формула (2) примет следующий вид:

$$\varphi = A \cdot \tau, \qquad (3)$$

здесь оператор A равен

$$A = \frac{1}{2\pi\mu_0} \int_L \tau(p) \ln \frac{1}{\left|\overline{r_Q} - \overline{r_P}\right|} dL ,$$

$\tau(p)$ – линейная плотность магнитных зарядов.

Уравнения (2) и (3) являются линейными интегральными уравнениями Фредгольма 1-го рода.

В рассматриваемой магнитной системе датчика источником магнитного поля служит постоянный магнит с известным распределением плотности магнитных зарядов. Тогда формулу (2) можно записать так:

$$\varphi - \varphi_{\text{ПМ}} = A\sigma, \qquad (4)$$

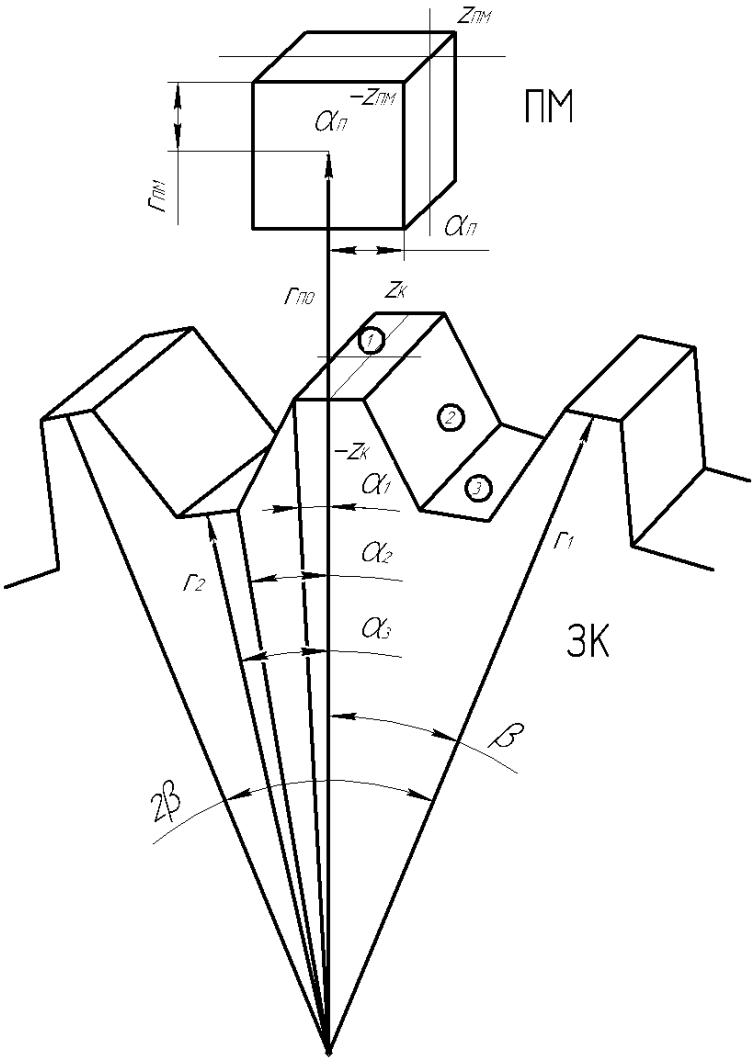


Рис. 3. Геометрическая модель магнитной системы датчика с вариантом расположения ПМ

где $\varphi_{ПМ}$ – потенциал магнитного поля, создаваемый ПМ.

Далее выбирается одно уравнение, соответствующее точке наблюдения Q_N, и из всех уравнений, записанных для поверхности зубчатого колеса, оно почленно вычитается. Тогда значение потенциала зубчатого колеса из (4) исключается, а на место уравнения для Q_N ставится условие о суммарном заряде на поверхности зубчатого колеса

$$\int_{S_K} \sigma dS = 0,$$
$$\int_{S_K} \sigma dS = q_{ПМ} = M_n \cdot S_{ПМ} \cdot \mu_0 \qquad (5)$$

при размещении постоянного магнита, как показано на рис. 3.

Уравнения (2) и (4) являются сингулярными, для их численного решения применяется метод модифицированных квадратур, суть которого в следующем: поверхность зубчатого колеса и постоянного магнита делится на N и M прямоугольных элементарных площадок ΔS_i, предполагается, что на площадке $\sigma_j = \text{const}$, $i = \overline{(1, N)}$.

Тогда уравнения (5) превращаются в систему линейных уравнений

$$[A] \cdot [\sigma] = [\varphi_{ПМ}] \cdot$$

Уравнение для j-й точки ($j = \overline{(1, N)}$), лежащей в центре площадки ΔS_j, записывается с учетом того, что интеграл по поверхности S разбивается на интеграл по поверхности $S/\Delta S_j$, аппроксимирующийся методом прямоугольников, и на интеграл по поверхности ΔS_j, который берется в аналитической форме:

$$\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{N} \sigma_j \frac{1}{\left|\overline{r_i} - \overline{r_j}\right|} \Delta S_j + \sigma_j \int_{\Delta S_j} \frac{1}{\left|\overline{r_{ij}}\right|} dS_j = -\sum_{l=1}^{M} \frac{\sigma_{ПМ} \cdot \Delta S_l}{\left|\overline{r_i} - \overline{r_j}\right|}. \qquad (6)$$

Если принять стороны элементарной прямоугольной площадки Δa_j, Δb_j, то второй интеграл в правой части уравнения (6) будет равен

$$\int_{\Delta S_j} \frac{1}{\left|\overline{r_{ij}}\right|} dS_j = \int_0^{a_j} d\xi \int_0^{b_j} \frac{1}{\sqrt{\xi^2 + \eta^2}} d\eta =$$
$$= \Delta a_j \cdot \operatorname{arcsh} \frac{\Delta b_j}{\Delta a_j} + \Delta b_j \cdot \operatorname{arcsh} \frac{\Delta a_j}{\Delta b_j}.$$

Тогда элементы матрицы $[A]$

$$[A] = [a_{ij}],$$

при

$$i \neq j \quad a_{ij} = \frac{1}{\left|\overline{r_i} - \overline{r_j}\right|} \cdot \Delta a_j \cdot \Delta b_j,$$

при

$$i = j \quad a_{ii} = \Delta a_j \cdot \operatorname{arcsh} \frac{\Delta b_j}{\Delta a_j} + \Delta b_j \cdot \operatorname{arcsh} \frac{\Delta a_j}{\Delta b_j}.$$

Для плоскопараллельного поля:
при

$$i \neq j \quad a_{ij} = \ln \frac{1}{\left|\overline{r_i} - \overline{r_j}\right|} \cdot \Delta l_j,$$

при

$$i = j \quad a_{ii} = \Delta l_i \cdot \ln \frac{2l}{\Delta l_j} = \Delta l_j \cdot (1 + \ln 2 - \ln \Delta l_j),$$

здесь Δl_j – длина элементарного отрезка контура зубчатого колеса.

Устройство обработки выходного сигнала модулятора датчика

Блок-схема устройства обработки выходного сигнала модулятора цилиндрического магнитного датчика приведена на рис. 4.

С выходной обмотки W_1 сигнал модулятора поступает на вход усилителя напряжения с коэффициентом усиления $K_1 = 100$. После детектирования амплитудным детектором (рис. 4)

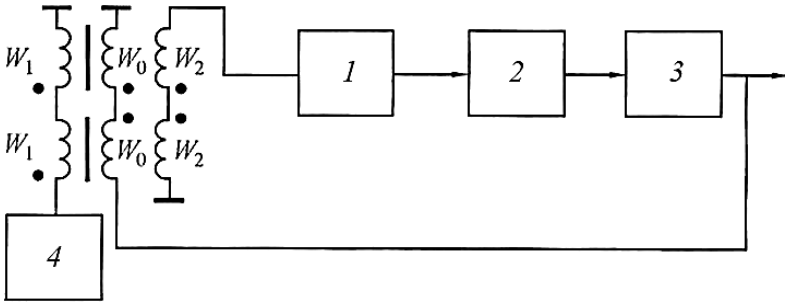


Рис. 4. Блок-схема устройства обработки выходного сигнала модулятора: *1* – усилитель напряжения; *2* – амплитудный детектор; *3* – усилитель тока; *4* – генератор

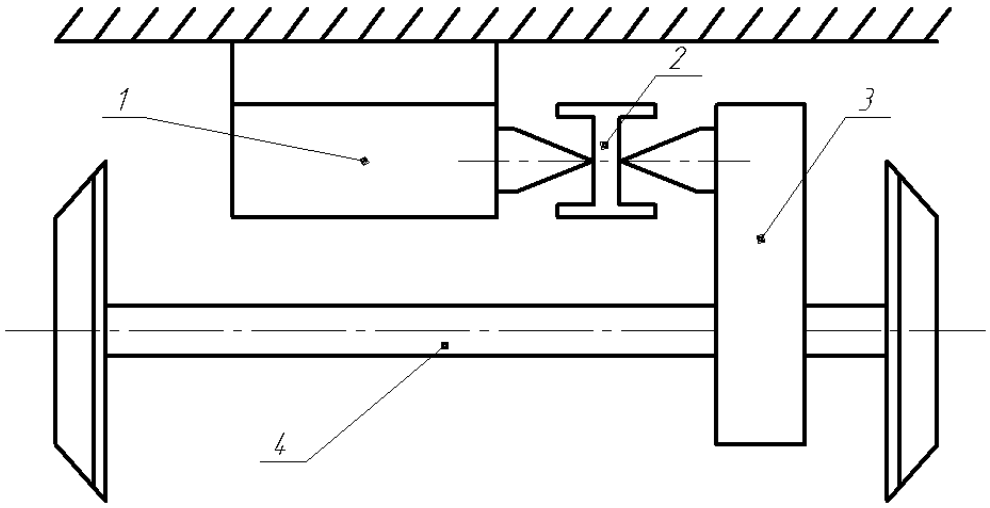


Рис. 5. Тяговая передача электропоезда: *1* – двигатель; *2* – карданная муфта; *3* – тяговый редуктор; *4* – ось колесной пары

сигнал усилителям становится больше из-за тока с коэффициентом усиления $K_3 = 10^{-2}$. Коэффициент передачи амплитудного синхронного детектора $K_2 = 0{,}85$.

Для линеаризации статической характеристики и увеличения ее стабильности в устройство введена отрицательная обратная связь, для чего в модуляторе предусмотрена обмотка W_0. Коэффициент передачи цепи обратной связи

$$K_{\text{о.с}} = \frac{\omega_0}{2l}.$$

При числе витков обмотки обратной связи $W_0 = 100$ и длине сердечников $2l = 8$ мм коэффициент обратной связи $K_{\text{о.с}} = 1{,}25 \cdot 10^4$. Коэффициент передачи устройства обработки выходного сигнала модулятора

$$K = \frac{K_\Phi \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3}{1 + K_\Phi \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_{\text{о.с}}} = 7{,}5 \cdot 10^{-5},$$

где K_Φ – коэффициент передачи модулятора по амплитудному значению сигнала.

Применение магнитного датчика на тяговом редукторе электропоезда

Редуктор является частью тяговой передачи (рис. 5) и служит для передачи вращающего

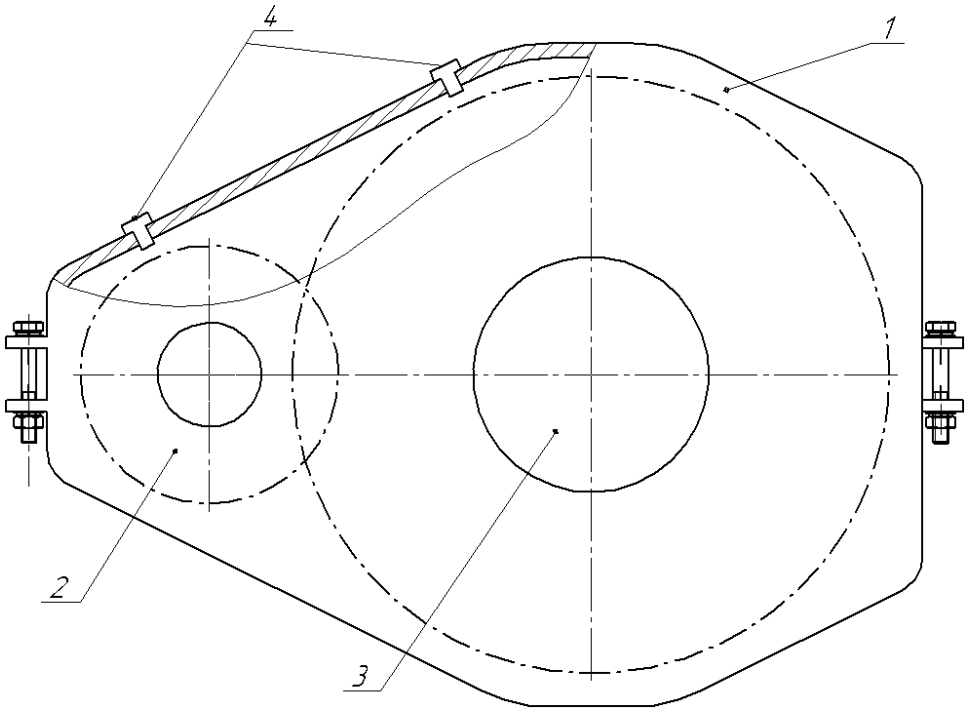


Рис. 6. Установка датчиков на тяговый редуктор: *1* – корпус тягового редуктора; *2* – ведущая шестерня; *3* – ведомая шестерня; *4* – датчики

момента от двигателя на колесную пару в тяговом режиме и от колесной пары к тяговому двигателю при электрическом торможении [9]. Основными неисправностями тягового редуктора электропоезда являются [10]:

– трещины в валу шестерни;

– трещины и изменение геометрии зубьев шестерни;

– разрушение опорных подшипников;

– поломка зубьев шестерни.

Проблема состоит в том, что при эксплуатации электропоезда невозможно определить небольшие неисправности в редукторе и устранить их до появления глобальных проблем. Эксплуатация электропоезда с неисправным редуктором недопустима, так как может повлечь за собой экономические потери. Например, остановка грузового электропоезда на путях блокирует движение других поездов и вызывает задержку доставки груза. Также время транспортировки напрямую отражается в цене товара, что ведет к экономическим потерям, так как затраты на транспортировку могут составлять до 30 % от себестоимости товара [11, 12].

Для решения вышеописанной проблемы предлагается использовать датчики, которые устанавливаются непосредственно над зубчатыми колесами и шестернями в корпусе механического редуктора (рис. 6), что дает возможность постоянно контролировать состояния зубьев во время эксплуатации. Количество применяемых магнитных датчиков в механических редукторах, зависит от числа зубчатых колес и шестерен.

Использование датчиков в корпусе тягового редуктора электропоезда позволит оценивать состояние подшипников, которое отражается на шестернях и приводит к ошибкам зацепления. Появляется возможность своевременно среагировать на возникновение неисправностей и предпринять дальнейшие действия для их устранения. Данная мера снизит вероятность полного выхода из строя тягового редуктора электропоезда в процессе эксплуатации, уменьшит стои-

мость ремонта и увеличит надежность работы тяговой передачи.

Также к достоинствам такого технического решения относится то, что эти датчики упростят введение в эксплуатацию новых электропоездов и механических редукторов, так как сразу укажут на ошибки зацепления, в результате чего отпадет необходимость в акустической и вибрационной диагностиках.

Заключение

Диагностика редуктора в процессе эксплуатации повышает надежность транспортной системы в целом. Предлагаемый датчик дает возможность получить информацию о состоянии зубьев зубчатых колес, а также определить ошибки зацепления в процессе эксплуатации. Использование датчика для анализа и контроля неисправностей механического редуктора приводит к значительному уменьшению экономических потерь и повышению безопасности транспортных систем.

Библиографический список

1. Анфимов М. И. Редукторы. Конструкции и расчет / М. И. Анфимов. – М.: Машиностроение, 1993. – 463 с.

2. Длоугий В. В. Приводы машин: справочник / В. В. Длоугий, Т. И. Муха, А. П. Цупиков, Б. В. Януш; под общ. ред. В. В. Длоугого. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение, 1982. – 383 с.

3. Бойко Л. С. Редукторы и мотор-редукторы общемашиностроительного применения: справочник / Л. С. Бойко, А. А. Высоцкий, Э. И. Галиченко и др. – М.: Машиностроение, 1984. – 247 с.

4. Биргер И. А. Техническая диагностика / И. А. Биргер. – М.: Машиностроение, 1978. – 240 с.

5. Волков Ю. В. Датчики для измерений при производстве электрической и тепловой энергии: учеб. пособие / Ю. В. Волков. – СПб.: СПбГУПТД, 2019. – 89 с.

6. Фрайден Дж. Современные датчики: справочник / Дж. Фрайден; пер. с англ. Ю. А. Заболотной; под ред. Е. Л. Свинцова. – М.: Техносфера, 2005. – 592 с.

7. Парселл З. Электричество и магнетизм: учеб. руководство. – 3-е изд., испр. / З. Парселл; пер. с англ. под ред. А. И. Шальникова, А. О. Вайсенберга. – М.: Наука, 1983. – 416 с.

8. Арсенин В. Я. Методы математической физики и специальные функции / В. Я. Арсенин.– М.: Наука, 1984. – 414 с.

9. Бочаров В. И. Магистральные электровозы: Общие характеристики. Механическая часть / В. И. Бочаров, А. И. Кодинцев, А. И. Кравченко и др. – М.: Машиностроение, 1991. – 224 с.

10. Бирюков И. В. Тяговые передачи электроподвижного состава железных дорог / И. В. Бирюков, А. И. Беляев, Е. К. Рыбников. – М.: Транспорт, 1986. – 256 с.

11. Клычева Н. А. Основы транспортного бизнеса: учеб.-метод. пособие / Н. А. Клычева, О. Н. Мадяр. – М.: Рос. ун-т транспорта (МИИТ), 2020. – 64 с.

12. Адамов В. Е. Экономика и статистика фирм: учебник / В. Е. Адамов, С. Д. Ильенкова, Т. П. Сиротина. – М.: Финансы и статистика, 1996. – 240 с.

Дата поступления: 19.10.2021
Решение о публикации: 22.10.2021

Контактная информация:
КРЕСЕЛЮК Юрий Владимирович – ст. преподаватель; yurakreselyuk@mail.ru

Analysis of the problems of mechanical gearboxes of transport systems and their solution using a magnetic sensor

Yu. V. Kreselyuk

Vladimir Dahl Lugansk National University, 20-a, quarter Molodezhny, Lugansk, 91034, Lugansk People's Republic

For citation: Kreselyuk Yu. V. Analysis of the problems of mechanical gearboxes of transport systems and their solution using a magnetic sensor. *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2021, vol. 18, iss. 4, pp. 561–570. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2021-4-561-570

Summary

Objective: Increasing reliability of mechanical gearboxes using a magnetic sensor, which will significantly increase the reliability of transport mechanisms and systems in general. **Methods:** An analysis of incidents covered in the media was carried out. **Results:** Conclusions are drawn about the consequences of failure of mechanical gearboxes. To prevent emergency situations caused by a breakdown of a mechanical gearbox, it is proposed to use a magnetic sensor, which allows carrying out analysis and diagnostics of the gearbox and its components during operation. A mathematical model of a magnetic sensor is compiled and a block diagram of a device for processing the output signal of the sensor modulator is presented. **Practical importance:** Failure of a mechanical gearbox is a common problem that leads to a stop of transport mechanisms and systems. Detection of a mechanical gearbox malfunction can significantly reduce the cost of repairs, as well as prevent unexpected damage to the mechanism, which can lead to a complete stop of the transport system. The use of a magnetic sensor in the traction gearbox of an electric train will reduce the likelihood of a traction gearbox breakdown during operation and reduce the cost of repairs, increase the reliability of the traction drive, and also simplify the commissioning of new electric trains and traction gearboxes.

Keywords: Mechanical gearbox, magnetic sensor, transport system, electric train.

References

1. Anfimov M. I. *Reduktory. Konstruktsii i raschet* [*Reduction gears. Designs and calculation*]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1993, 463 p. (In Russian)

2. Dlougiy V. V., Mukha T. I., Tsupikov A. P. & Yanush B. V. *Privody mashin*. Spravochnik [*Machine drives*. Reference book]. Under general ed. of V. V. Dlougiy. 2nd ed., revised and enlarged. Leningrad, Mashinostroyeniye Publ., 1982, 383 p. (In Russian)

3. Boyko L. S., Vysotsky A. A., Galichenko E. I. et al. *Reduktory i motor-reduktory obshchemashinostroitel'nogo primeneniya*. Spravochnik [*Reducers and geared motors for general machine-building applications*. Reference book]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1984, 247 p. (In Russian)

4. Birger I. A. *Tekhnicheskaya diagnostika* [*Technical diagnostics*]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1978, 240 p. (In Russian)

5. Volkov Yu. V. *Datchiki dlya izmereniy pri proizvodstve elektricheskoy i teplovoy energii*. Uchebnoye posobiye [*Sensors for measurements in the production of electrical and thermal energy*. Tutorial]. Saint Petersburg, SPbGUPTD [Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design] Publ., 2019, 89 p. (In Russian)

6. Fraden J. *Sovremennyye datchiki*. Spravochnik [*Handbook of modern sensors.* Reference book]. Transl. from English by Yu. A. Zabolotnaya; ed. by E. L. Svintsov. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2005, 592 p. (In Russian)

7. Purcell H. *Elektrichestvo i magnetism*. Uchebnoye rukovodstvo [*Electricity and magnetism*. Tutorial]. Transl.

from English; ed. by A. I. Shalnikov, A. O. Vaysenberg. 3rd ed., revised. Moscow, Nauka Publ., 1983, 416 p. (In Russian)

8. Arsenin V. Ya. *Metody matematicheskoy fiziki i spetsial'nyye funktsii* [*Methods of mathematical physics and special functions*]. Moscow, Nauka Publ., 1984, 414 p. (In Russian)

9. Bocharov V. I., Kodintsev A. I., Kravchenko A. I. et al. *Magistral'nyye elektrovozy: Obshchiye kharakteristiki. Mekhanicheskaya chast'* [*Mainline electric locomotives*: *General characteristics. Mechanical part*]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1991, 224 p. (In Russian)

10. Biryukov I. V., Belyaev A. I. & Rybnikov E. K. *Tyagovyye peredachi elektropodvizhnogo sostava zheleznykh dorog* [*Traction transmissions of electric rolling stock of railways*]. Moscow, Transport Publ., 1986, 256 p. (In Russian)

11. Klycheva N. A. & Madyar O. N. *Osnovy transportnogo biznesa*. Uchebno-metodicheskoye posobiye [*Fundamentals of transport business*. Teaching aid]. Moscow, MIIT [Russian University of Transport] Publ., 2020, 64 p. (In Russian)

12. Adamov V. E., Ilyenkova S. D. & Sirotina T. P. *Ekonomika i statistika firm*. Uchebnik [*Economics and statistics of firms*. Textbook]. Moscow, Finansi i statistika Publ., 1996, 240 p. (In Russian)

Received: October 19, 2021
Accepted: October 22, 2021

Author's information:
Yuri V. KRESELYUK – Senior Lecturer;
yurakreselyuk@mail.ru

УДК 621.48:629.31

Методика диагностирования дизельных двигателей автомобильной техники по параметрам акустического сигнала

В. А. Кручек [1], **А. А. Горбачев** [2], **Р. А. Иванов** [2]

[1] Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9
[2] Военная академия материально-технического обеспечения имени генерала армии А. В. Хрулева, 199034, Санкт-Петербург, наб. Макарова, 8

Для цитирования: *Кручек В. А., Горбачев А. А., Иванов Р. А.* Методика диагностирования дизельных двигателей автомобильной техники по параметрам акустического сигнала // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2021. – Т. 18. – Вып. 4. – С. 571–577. DOI: 10.20295/1815-588X-2021-4-571-577

Аннотация

Цель: Разработка методики диагностирования двигателей автомобильной техники по параметрам акустического сигнала. **Методы:** Применяется созданный математический аппарат для обработки акустических сигналов двигателей, позволяющий с значительной достоверностью построить акустический портрет испытуемого двигателя и с высокой оперативностью сравнивать его с эталонным акустическим портретом исправного двигателя того же типа. Акустический сигнал снимается с силовой установки автомобильных базовых шасси с помощью нового средства технического диагностирования. **Результаты:** Разработанная методика диагностирования двигателей автомобильной техники по параметрам акустического сигнала дает возможность существенно повысить оперативность и достоверность поиска неисправностей в двигателях автомобильной техники, не прибегая к разборным методам диагностирования. **Практическая значимость:** Описанная методика и новое диагностическое оборудование позволяют сделать заключение о исправности силовой установки и заключение о дальнейшей эксплуатации или получить информацию о видах неисправностей в двигателе, что снизит время на диагностирование автомобильной техники в целом и ускорит процесс выявления неисправностей безразборным методом с выдачей рекомендаций по их устранению.

Ключевые слова: Автомобильная техника, методика диагностирования, нелинейный элемент, акустический сигнал, двигатель, реализационный базис линейного преобразования, эталонный спектр, оперативность.

Введение

Большую часть автомобильного парка гражданских промышленных предприятий страны составляют автомобили семейства «КАМАЗ», которые оснащены дизелями КАМАЗ-740, ЯМЗ-846, ЯМЗ-238 и т. д.

Техническое диагностирование (ТД) транспортной техники и машин является определяющим элементом системы планово-предупредительного технического обслуживания (ТО) и ремонта с периодическим контролем по техническому состоянию (ТС), регламентировано руководящими документами соответствующих ведомств РФ.

Постоянная модернизация, рост мощности, изменение технических характеристик и усложнение конструкции дизельных силовых установок (СУ) автомобильного транспорта (АТ) требуют постоянного совершенствования оснаще-

ния системы диагностирования. Современные технологии диагностирования дизельных двигателей транспортного средства, используемых в качестве СУ АТ, позволяют выявить их фактическое ТС с достаточной высокой точностью, которая достигается в стационарных условиях за счет применения дорогостоящего диагностического оборудования при длительных временных простоях техники.

Постановка задач исследования

К перспективным направлениям контроля ТС СУ относится метод диагностирования по параметрам спектра акустического сигнала (АС) во время ее работы. Для повышения точности и достоверности акустического метода диагностирования необходимо учитывать весь спектр сигналов, генерируемых СУ, в диапазоне частот от 0,1 Гц до 20 кГц. Внедрение метода диагностирования СУ АТ по параметрам АС дает возможность с высокой степенью достоверности определять ТС СУ, своевременно предупреждать отказы и поддерживать АТ в постоянной технической готовности, резко сократить время и трудозатраты на ее проведение в нестационарных условиях во время эксплуатации.

Поэтому работа, направленная на совершенствование методов, технологий и средств ТД СУ транспортных средств, является актуальной научной и производственно-технологической задачей. Ее цель – повышение надежности и готовности СУ АТ, а также специальной техники за счет повышения эффективности средств и методики диагностирования по параметрам АС.

Проведенные исследования АС показали, что его можно представить как совокупность всех акустических сигналов и их гармонических составляющих, охватывающих спектр от 0 до 20 кГц. Введением нелинейного преобразования для переноса АС в более высокую область частот создаются условия взаимодействия гармонических составляющих между собой (комбинационных составляющих). Данная особенность преобразования АС позволила увеличить амплитуды таких сигналов с малой интенсивностью и выделить более информативные спектральные составляющие, что приводит к изменению спектра выходного сигнала, т. е. к изменению структуры спектрального изображения АС. Это дает возможность представить суммарный спектр АС в виде совокупности элементарных геометрических фигур (прямоугольников, квадратов, треугольников). Такое представление совокупного сигнала можно использовать для машинного распознавания образов, что существенно упрощает вопрос проведения диагностирования различных двигателей автомобильной техники и поиска неисправностей [1–7].

Разработанный реализационный базис линейного преобразования АС на основе оптико-голографического метода их обработки позволяет в реальном масштабе времени проводить обработку сложного входного сигнала, что существенно сокращает время на обработку АС и принятие решения по выявленным неисправностям.

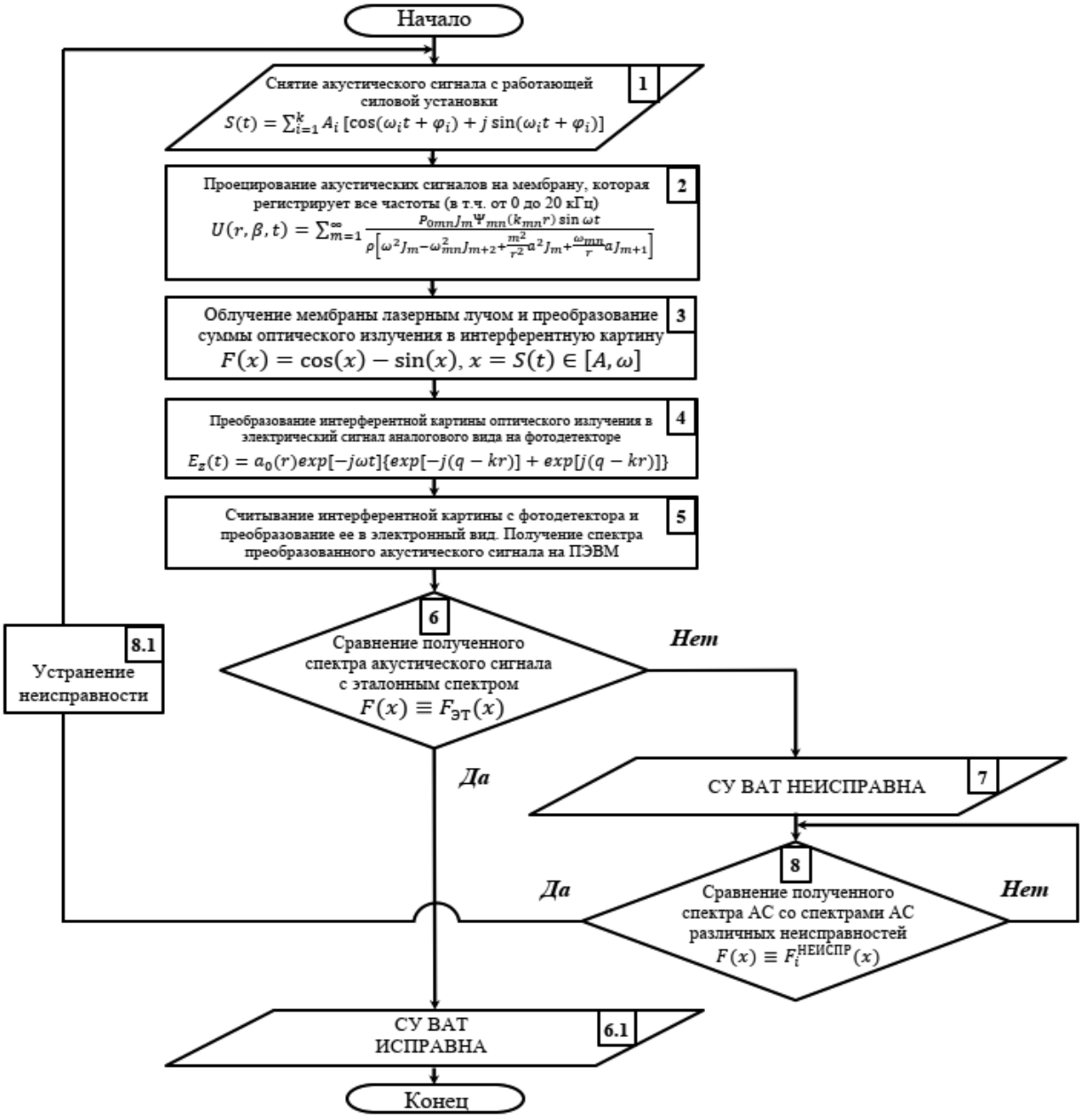
Методика диагностирования

Исходя из вышесказанного, методика диагностирования двигателей автомобильной техники по параметрам АС может состоять из логически последовательных этапов, представленных на рисунке в виде укрупненной блок-схемы:

1. Снятие АС работающего двигателя при помощи существующих методов приема и передачи звуковых волн (с использованием фонендоскопа) [6, 7]:

$$S(t) = \sum_{i=1}^{k} A_i[\cos(\Omega_i t + \varphi_u) + j\sin(\Omega_i t + \varphi_i)],$$

где i – порядок обрабатываемого колебания; k – показатель количества обрабатываемых колебаний; A – амплитуда колебаний; Ω – частота колебаний; t – время; φ – сдвиг частоты колебаний; j – комплексная функция.



Укрупненная блок-схема методики диагностирования силовой установки автомобильных базовых шасси по параметрам АС

2. Проецирование АС на мембрану с закрепленной в ее центре оптической системой из полупрозрачного и непрозрачного зеркал для преобразования АС в механические колебания этой мембраны, которая воспроизводит все частоты акустических колебаний (от 0 до ∞ Гц), с помощью математической модели колебаний мембраны [6, 7]:

$$U(r,\beta,t) = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{P_{0mn} J_m \Psi_{mn}(k_{mn} r)\sin\omega t}{\rho\left[\omega^2 J_m - \omega_{mn}^2 J_{m+2} + \frac{m^2}{r^2} a^2 J_m + \frac{\omega_{mn}}{r} a J_{m+1}\right]},$$

в котором r – радиус мембраны; β – угол в полярной системе координат; t – время; m – порядок

моды; P_0 – давление звуковой волны; J – функция Бесселя; Ψ – фундаментальные функции мембраны; k – волновое число; ω – круговая частота колебаний; ρ – плотность мембраны; a – натяжение мембраны.

3. Облучение мембраны прибора лазерным лучом с разложением его в оптической системе полупрозрачного и непрозрачного зеркал на два когерентных источника света, тем самым преобразовывая механические колебания мембраны в оптические колебания вида [6, 7]

$$E_z(t) = a_0(r)\exp[-j\omega t]\times$$
$$\times\left\{\exp[-j(q-kr)]+\exp[j(q-kr)]\right\},$$

здесь (r) – амплитудное значение вектора напряженности электрического поля в данной точке пространства, ω – круговая частота колебаний.

4. Преобразование суммы оптического излучения в интерферентную картину с помощью математической модели нелинейного элемента реального времени [6, 7]:

$$F(x) = \cos(x) - \sin(x),$$

$$x = S(t) \in [A, \omega].$$

5. Регистрация интерферентной картины с помощью фотодетектора и преобразование оптического излучения в электронный вид для дальнейшей передачи в программный комплекс обработки результатов измерений. Получение спектра, преобразованного АС в программном комплексе персональной электронно-вычислительной машины (ПЭВМ) [8].

6. Сравнение построенного спектра АС от двигателя автомобильной техники с эталонным спектром исправной силовой установки такого же типа из существующей базы знаний различных силовых установок:

$$F(x) \equiv F_{\text{ЭТ}}(x),$$

где $F_{\text{ЭТ}}(x)$ – эталонный спектр АС исправного двигателя такого же типа.

Если спектр АС от двигателя автомобильной техники тождественен спектру АС исправного двигателя такого же типа, то оператор делает вывод о том, что двигатель исправен.

7. Когда спектр АС от двигателя ($F(x)$) не тождественен эталонному спектру АС исправного двигателя ($F_{\text{ЭТ}}(x)$), оператор делает вывод о том, что исследуемый двигатель автомобильной техники неисправен.

8. Полученный спектр АС от двигателя ($F(x)$) сравнивается со спектрами АС различных неисправностей ($F_i^{\text{НЕИСПР}}(x)$) из базы знаний неисправностей путем перебора; при совпадении указанных спектров оператор делает вывод о том, что найдена та или иная неисправность и дает указания на ее устранение [9, 10]. После этого происходит переход к шагу 1 настоящей методики.

Этапы методики повторяются до тех пор, пока все найденные неисправности не будут устранены.

Заключение

Разработанная методика диагностирования двигателей автомобильной техники по параметрам АС дает возможность с высоким уровнем оперативности и достоверности производить поиск неисправностей в этих двигателях, не прибегая к разборным методам диагностирования.

Сущность методики заключается в совершенствовании безразборных методов диагностирования двигателей автомобилей. Ее научная новизна заключается в применении существующего и разработанного математического аппарата для обработки АС двигателей, позволяющих со значительной достоверностью создать акустический портрет работающего двигателя и с высокой оперативностью сравнить его с эталонным акустическим портретом исправного двигателя того же типа, а в случае несовпадения акустических портретов на основе созданной базы знаний неисправностей оперативно обнаружить существующую неисправность и дать рекомендации оператору по ее устранению.

Практическая значимость разработанной методики заключается в оперативности получения информации об исправности (неисправности) двигателя и о видах неисправностей в двигателе. Это снизит время на диагностирование автомобильной техники в целом, ускорит процесс выявления неисправностей в реальном времени.

Библиографический список

1. Василенко Г. И. Голографическое опознавание образов / Г. И. Василенко. – М.: Сов. радио, 1977. – 324 с.

2. Алгоритмы обучения распознавания образов / под ред. В. Н. Вапника. – М.: Сов. радио, 1973. – 201 с.

3. Павлов Б. В. Акустическая диагностика механизмов / Б. В. Павлов. – М.: Машиностроение, 1971. – 168 с.

4. Аркадьев А. Г. Обучение машины распознаванию образов / А. Г. Аркадьев, Э. М. Браверман. – М.: Наука, 1964. – 110 с.

5. Серобабин А. Т. Голографическая обработка цифровой радиотехнической информации / А. Т. Серобабин // Лазерные информационные системы космических аппаратов. – М.: Машиностроение, 1981. – С. 263–267.

6. Серобабин А. Т. Предварительное преобразование акустических сигналов в системах распознавания / А. Т. Серобабин, А. К. Соколенко // Математические методы распознавания образов. – Рига: ЭКБСОН, 1989. – С. 129–132.

7. Серобабин А. Т. Анализ звуковых колебаний мембраны телефона методом голографической интерферометрии / А. Т. Серобабин, Г. К. Климин // Помехоустойчивость и эффективность систем связи и управления. – Вып. 2. – Ставрополь: МО СССР, 1984. – С. 63–68.

8. Патент № 2016115114. Российская Федерация, МПК G01 M 15/02. Устройство для акустической диагностики двигателей / А. А. Горбачев, А. Т. Серобабин, Н. В. Ворончихин. – Заявл. 19.04.2016 г.; опубл. 24.09.2018 г. – Бюл. № 27.

9. Горбачев А. А. Оценка точности измерения пластин методом голографической интерферометрии / А. А. Горбачев // Материально-техническое обеспечение войск в реализации приоритетов национальной безопасности России, состояние и перспективы развития: сб. науч. статей. – СПб.: ВАМТО, 2016. – № 1. – С. 166–169.

10. Горбачев А. А. Синтез нелинейного преобразования акустических сигналов при диагностике двигателя внутреннего сгорания / А. А. Горбачев // Материально-техническое обеспечение войск в реализации приоритетов национальной безопасности России, состояние и перспективы развития: сб. науч. статей. – СПб.: ВАМТО, 2016. – № 1. – С. 154–158.

Дата поступления: 20.10.2021
Решение о публикации: 24.10.2021

Контактная информация:
КРУЧЕК Виктор Александрович – д-р техн. наук, проф.; victor.kruchek@yandex.ru
ГОРБАЧЕВ Андрей Александрович – начальник кафедры; goraa02@mail.ru
ИВАНОВ Роман Алексеевич – ст. преподаватель; senior.dachnik@yandex.ru

Methodology for diagnosing diesel engines of automotive vehicles by the parameters of the acoustic signal

V. A. Kruchek [1], **A. A. Gorbachev** [2], **R. A. Ivanov** [2]

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

[2] Military Academy for Logistics named after General of the Army A. V. Khrulev, 8, Makarova nab., Saint Petersburg, 199034, Russian Federation

For citation: Kruchek V.A., Gorbachev A.A., Ivanov R.A. Methodology for diagnosing diesel engines of automotive vehicles by the parameters of the acoustic signal**.** *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2021, vol. 18, iss. 4, pp. 571–577. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2021-4-571-577

Summary

Objective: Development of a methodology for diagnosing engines of automotive vehicles by the parameters of an acoustic signal. **Methods:** A mathematical apparatus has been developed for processing acoustic signals of engines, which allows creating an acoustic portrait of the engine under test with high reliability and comparing it with high efficiency with a reference acoustic portrait of a serviceable engine of the same type. The acoustic signal is removed from the power plant of the car base chassis using a newly created technical diagnostic tool. **Results:** The developed methodology for diagnosing automotive engines by the parameters of an acoustic signal allows us to significantly increase the level of efficiency and reliability of troubleshooting in automotive engines without resorting to collapsible diagnostic methods. **Practical importance:** The developed methodology and new diagnostic equipment make it possible to conclude on the serviceability of the power plant and to give an opinion on further operation or to obtain information on the types of malfunctions in the engine, which will reduce the time for diagnosing automotive equipment in general and speed up the process of identifying malfunctions by a CIP method with the issuance of recommendations for their elimination.

Keywords: Automotive technology, diagnostic technique, nonlinear element, acoustic signal, engine, implementation basis of linear transformation, reference spectrum, efficiency.

References

1. Vasilenko G. I. *Golograficheskoye opoznavaniye obrazov* [*Holographic pattern recognition*]. Moscow, Sov. Radio Publ., 1977, 324 p. (In Russian)

2. *Algoritmy obucheniya raspoznavaniya obrazov* [*Pattern recognition learning algorithms*]. Ed. by V.N. Vapnik. Moscow, Sov. Radio Publ., 1973, 201 p. (In Russian)

3. Pavlov B. V. *Akusticheskaya diagnostika mekhanizmov* [*Acoustic diagnostics of mechanisms*]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1971, 168 p. (In Russian)

4. Arkadiev A. G. & Braverman E. M. *Obucheniye mashiny raspoznavaniyu obrazov* [*Learning a machine for pattern recognition*]. Moscow, Nauka Publ., 1964, 110 p. (In Russian)

5. Serobabin A. T. Golograficheskaya obrabotka tsifrovoy radiotekhnicheskoy informatsii [Holographic processing of digital radio information]. *Lazernyye informatsionnyye sistemy kosmicheskikh apparatov* [*Spacecraft laser information systems*]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1981, pp. 263–267. (In Russian)

6. Serobabin A. T. & Sokolenko A. K. Predvaritel'noye preobrazovaniye akusticheskikh signalov v sistemakh raspoznavaniya [Pre-conversion of acoustic signals in recognition systems]. *Matematicheskiye metody raspoznavaniya obrazov* [*Mathematical methods for pattern recognition*]. Riga, EKBSON Publ., 1989, pp. 129–132. (In Russian)

7. Serobabin A. T. & Klimin G. K. Analiz zvukovykh kolebaniy membrany telefona metodom gologra-

ficheskoy interferometrii [Analysis of sound vibrations of a telephone membrane by the method of holographic interferometry]. *Pomekhoustoychivost' i effektivnost' sistem svyazi i upravleniya* [*Noise immunity and efficiency of communication and control systems*], iss. 2. Stavropol, MO SSSR [Ministry of Defense of the USSR] Publ., 1984, pp. 63–68. (In Russian)

8. Gorbachev A.A., Serobabin A.T. & Voronchikhin N.V. *Ustroystvo dlya akusticheskoy diagnostiki dvigateley* [*Device for acoustic diagnostics of engines*]. Patent no. 2016115114, Russian Federation, IPC G01M 15/02. Applied April 19, 2016; publ. September 24, 2018. Bul. no. 27. (In Russian)

9. Gorbachev A.A. Otsenka tochnosti izmereniya plastin metodom golograficheskoy interferometrii [Assessment of the accuracy of measuring plates by the method of holographic interferometry]. *Material'no-tekhnicheskoye obespecheniye voysk v realizatsii prioritetov natsional'noy bezopasnosti Rossii, sostoyaniye i perspektivy razvitiya* [*Material and technical support of troops in the implementation of the priorities of Russia's national security, state and development prospects*]. Collection of scientific articles. Saint Petersburg, VAMTO [General Khrulev A.V. Military Academy of Material Logistics] Publ., 2016, no. 1, pp. 166–169. (In Russian)

10. Gorbachev A.A. Sintez nelineynogo preobrazovaniya akusticheskikh signalov pri diagnostike dvigatelya vnutrennego sgoraniya [Synthesis of nonlinear transformation of acoustic signals in the diagnosis of an internal combustion engine]. *Material'no-tekhnicheskoye obespecheniye voysk v realizatsii prioritetov natsional'noy bezopasnosti Rossii, sostoyaniye i perspektivy razvitiya* [*Material and technical support of troops in the implementation of the priorities of Russia's national security, state and development prospects*]. Collection of scientific articles. Saint Petersburg, VAMTO [General Khrulev A.V. Military Academy of Material Logistics] Publ., 2016, no. 1, pp. 154–158. (In Russian)

Received: October 20, 2021
Accepted: October 24, 2021

Author's information:
Victor A. KRUCHEK – D. Sci. in Engineering, Professor; victor.kruchek@yandex.ru
Andrey A. GORBACHEV – Head of Department; goraa02@mail.ru
Roman A. IVANOV – Senior Lecturer; senior.dachnik@yandex.ru

УДК 656.213+06

Принципы теории нечетких множеств в формализации инфраструктурно-технологического взаимодействия припортовой железнодорожной транспортной системы *

О. Н. Числов [1,2], **Д. С. Безусов** [2]

[1] Научно-технологический университет (НТУ) «Сириус», Российская Федерация, 354340, Сочи, Олимпийский пр., 1

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

Для цитирования: *Числов О. Н., Безусов Д. С.* Принципы теории нечетких множеств в формализации инфраструктурно-технологического взаимодействия припортовой железнодорожной транспортной системы // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2021. – Т. 18. – Вып. 4. – С. 578–590. DOI: 10.20295/1815-588X-2021-4-578-590

Аннотация

Цель: Сформулировать предложения для улучшения показателей инфраструктурно-технологического взаимодействия при оценке многовариантных управленческих решений в региональной железнодорожной системе на примере системы «припортовая станция – порт». **Методы:** На основе анализа публикаций в направлении данных исследований применена модификация методов теории нечетких множеств и теории вероятностей для выбора и формализации важнейших транспортно-технологических процессов припортовых станций с учетом возможных стохастических явлений в управлении взаимодействием станции и порта**. Результаты:** Получено теоретическое обоснование степени принадлежности аксиомат станционных транспортно-технологических процессов к тем или иным условиям взаимодействия станции и порта, отношения их объединения и включения. Разработана матрица связей основных технологических операций и инфраструктурных элементов для конкретной припортовой станции. Представлены пример и описаны аксиоматы транспортных процессов вариантов обслуживания причалов порта. Сформулированы подходы к оценке логических ситуаций и нечеткости подмножеств параметров транспортных процессов в управлении взаимодействием станции и порта. В среде системы аналитических вычислений определены временные параметры вариантов организации транспортных процессов. **Практическая значимость:** Выполнена визуализация нечеткой организации транспортных подпроцессов, оценены степени логического соответствия аксиомат станционных транспортно-технологических процессов и их энтропия, построена диаграмма принадлежности набора времен вариантов транспортных процессов, что позволяет учесть слабоформализуемые процессы в управлении работой системы «припортовая станция – порт» и в перспективе снизить простои местных вагонов в системе.

Ключевые слова: Железнодорожная инфраструктура, припортовая железнодорожная станция, порт, аналитическое моделирование, модельная схема станции, теория нечетких множеств, нечеткие подмножества, теория вероятностей, энтропия, аксиоматы станционных транспортно-технологических процессов, простой местного вагона, пакет программного обеспечения.

* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, НТУ «Сириус», ОАО «РЖД» и Образовательного фонда «Талант и успех» (проект № 20-38-51014).

Введение

Северо-Кавказская железная дорога (СКЖД) – филиал ОАО «РЖД» – обеспечивает транспортировку грузов в сообщении с южнороссийскими портами Азово-Черноморского бассейна (АЧБ) и является важнейшим инфраструктурным объектом как Южного федерального округа, так и России в целом. С одной стороны, снижение объемов перевозок грузов и пассажиров по завершению XXII Олимпийских зимних игр в Сочи, обострение экономико-политических отношений по санкционным воздействиям, ограничения по пандемии коронавирусной инфекции отрицательно отразились на работе СКЖД. Но, с другой стороны, переориентация экспортного грузопотока на порты Юга России, активизация работы международных транспортных коридоров (МТК) «Север–Юг» и «Транссиб» позволили увеличить объемы перевозок на южном припортовом направлении. Например, погрузка экспортных грузов в направлении морских портов АЧБ в январе–августе 2021 г. составила около 60 млн т, увеличившись по сравнению с аналогичным периодом прошлого года на 18,9 %. Так, за 8 месяцев 2021 г. в адрес припортовой станции Новороссийск отправлено 21,7 млн т экспортных грузов (+ 3,1 %), Вышестеблиевская (порт Тамань) – 16,9 млн т (в 2 раза больше), Туапсе – 10 млн т (– 4,6 %), Грушевая – 4,1 млн т (+ 5,7 %). В структуре экспортного грузопотока дороги доля угля составила 31,4 %, нефти – 30,5 %, черных металлов – 13,2 %, зерна – 9,1 %, удобрений – 4,5 %, железной руды – 4,4 % [1, 2].

Актуальность проблемы исследования

Несмотря на положительные тенденции роста объемов грузоперевозок в адрес портов АЧБ, были и остаются проблемы ограничения пропускных способностей железнодорожных линий: 1) при специализации направлений дороги на пассажирское и грузовое движения возникают барьерные участки, требующие реконструкции; 2) необходимо совершенствование дорожного плана формирования поездов и подбора судовых партий; 3) требуется повышение уровня маршрутизации и производительности портового подъемно-транспортного оборудования и др. [3, 4]. Поэтому, несомненно, актуальной является задача поиска эффективных решений в управлении инфраструктурно-технологическим взаимодействием в системе «железнодорожная станция – порт».

Методы формализации инфраструктурно-технологического взаимодействия в припортовой железнодорожной транспортной системе

В управлении транспортными объектами и потоками традиционно используются научные методы, основанные на линейном и динамическом программировании, теории массового обслуживания, теории надежности, теории графов, теории вероятностей, имитационном моделировании; применяются программно-целевой и балансовый методы в экономико-математических моделях, а также новые интуитивные и логистические методы на основе нейросетевого подхода и нечеткой логики. Это обосновано значительной сложностью обследуемых транспортных систем, частой невозможностью учета совместного влияния противоречивых внешних и внутренних факторов.

Анализ отечественных и зарубежных научных работ [5–12] свидетельствует о необходимости дальнейших исследований по поиску эффективных форм транспортного взаимодействия на основе новой парадигмы – цифровизации логических решений в управлении. При формировании транспортных моделей часто возникают многовариантные решения по последовательности организации цепи доставки груза, которые могут быть подкреплены соответствующими нейронечеткими алгоритмами. В связи с этим увеличивается научный интерес по применению положений теории размытых (нечетких) множеств в решении транспортных задач, использующих принципы нечеткой логики.

Актуализация временной параметризации транспортно-технологических процессов

Организация транспортных процессов, связанных с передачей подвижного состава через устройства обслуживания железнодорожной станции (порта) имеет жесткую регламентацию, определенную технологическими процессами, инструкциями, правилами и т. п. Но одна и та же модель сложного транспортного объекта (процесса) при различных параметрах эксплуатации может интерпретироваться и восприниматься по-разному, давая иногда противоречивые результаты. В транспортной системе взаимодействия человека и материальных, информационных, цифровых объектов часто наблюдаются вариативность управленческих решений и необходимость выполнения логически обоснованных действий, которые являются по сути нечеткими, учитывающими возможные сопутствующие события как параллельного, так и противоположного действия.

В соответствии с [13] нечеткое множество означает, что некий исследуемый элемент принадлежит подмножеству, но только несколько неопределенным образом, решаемым введением понятия взвешенной принадлежности. Например, инфраструктурный элемент путевого развития или последовательность времен транспортных событий для конкретных условий эксплуатации может принадлежать подмножеству транспортных процессов в большей или меньшей степени, и, следовательно, возможно применение понятия нечеткого подмножества.

В качестве универсальной оценки степени эффективности инфраструктурно-технологического взаимодействия в системе «припортовая станция – порт» может быть принята временная параметризация с позиций аксиоматики станционных транспортно-технологических процессов (АСТТП) при распределении вагонопотоков. Данный подход позволяет определить логическую спецификацию транспортных процессов и степень участия в них элементов транспортных объектов посредством модельных схем станций (МСС), которые предназначены для анализа состоятельности управленческих решений, логической оценки последствий предпринимаемых действий и диагностики ситуаций транспортного процесса [14, 15].

Рассмотрим исходные данные задачи распределения припортовых вагонопотоков с позиций временной параметризации [14]: s_k – количество технологических блоков МСС транспортного объекта ($k = 1, 2, \ldots, v$); h_r – количество технологических операций по варианту обслуживания ($r = 1, 2, \ldots, z$); $\tilde{\mathrm{A}}_{kr} = \{(t_{kr} | \mu_{\tilde{\mathrm{A}}}(t_{kr}))\}$ – технология работы блоков объекта и его продолжительность (аксиомата $\tilde{\mathrm{A}}_{kr}$ в нечетком функциональном представлении, $\mu_{\tilde{\mathrm{A}}}(t_{kr})$ – степень (доля) принадлежности t_{kr} в $\tilde{\mathrm{A}}_{kr}$); a_i – количество транспортных средств (грузовых поездов, передач вагонов, автомобилей, судов), прибывающих в транспортную систему за расчетный период времени ($i = 1, 2, \ldots, n$); b_j – количество транспортных средств, которые могут быть переработаны припортовой системой ($j = 1, 2, \ldots, m$) при условии максимального обеспечения всех грузовых фронтов и минимального времени простоя подвижного состава.

В работе [14] описаны подходы к решению данной транспортной задачи в открытом (I) и закрытом (II) виде.

(I). Все прибывающие транспортные средства могут быть переработаны в системе без сверхнормативных простоев и отставления от движения, выполняется равенство $\sum_{i=1}^{m} a_i = \sum_{j=1}^{n} b_j$. Формируется конечное множество вариантов взаимодействия $\tilde{\mathrm{A}}(\tilde{S})$ технологических блоков $\tilde{s}_k$ МСС транспортного объекта (железнодорожной станции, порта), обеспечивающих рациональный вариант организации транспортных процессов. Запись вида

$$\tilde{\mathrm{A}}_{1r}(\tilde{S}) = \\ = \{(t_{1r} | 0,2), (t_{2r} | 0), (t_{3r} | 0,5), \\ (t_{4r} | 1), \ldots, (t_{kr} | \theta_{kr})\} \to \min$$

включает набор последовательности блоков МСС для варианта организации АСТТП и их времен

занятия с учетом логического решения по использованию при общем минимуме времени простоя транспортного средства в системе. Тогда целевая функция $\tilde{A}(\tilde{S}) = \min_{i,j,k,r}\{t_{ij}, \tilde{A}_{kr} \mid \mu_{\tilde{A}}(\tilde{s}_k)\}$, где $\mu_{\tilde{A}}(\tilde{s}_k)$ – доля использования технологического блока $\tilde{s}_k$ МСС в последовательности блоков управления АСТТП нечеткого подмножества $\tilde{A}_{ij}$, принимает значения в диапазоне от 0 до 1.

(II). Если не предусмотрено выполнение условия баланса, то $\sum_{i=1}^{n} a_i < \sum_{j=1}^{m} b_j$ или $\sum_{i=1}^{n} a_i > \sum_{j=1}^{m} b_j$. Неравенство означает, что суммарные возможности приема транспортных средств с грузами назначением в систему «припортовая станция – порт» превышают ее перерабатывающую способность или наоборот.

Пусть x_{ij} – количество транспортных средств (поездов, судов, автомобилей) по варианту организации транспортных процессов (с ограничением $x_{ij} \geq 0$), которые могут быть направлены с k-го модуля объекта (станции, порта) на k^*-й модуль грузового фронта (причал порта) в множестве $\tilde{A}(\tilde{S})$ допустимых вариантов организации АСТТП транспортных процессов (x_{ij}) при таких условиях:

а) все запланированные к подаче в порт транспортные средства должны быть организованы и выполнены;

б) суммарное количество передаваемых в порт транспортных средств не должно быть больше, чем то, которое может быть переработано по условию $\sum_{i=1}^{n} x_{ij} = a_i$, $\sum_{j=1}^{m} x_{ij} \leq b_j$.

Приведем технологические ограничения, отражающие интересы участников транспортировки грузов в припортовой системе:

– приоритет вагонов (автомобилей) при подаче под погрузку–выгрузку на грузовой фронт (причал) порта определяется согласованным решением перевозчика и грузополучателя (порта);

– интересы грузополучателей (клиентов) не влияют на последовательность операций в аксиоматах транспортных процессов;

– приоритет аксиомат транспортных процессов может быть изменен путем экономического регулирования в рамках договорных отношений, что отражает экономические выгоды сторон-участников транспортировки грузов в припортовой системе.

Целевые функции времени простоя имеют следующий вид:

1 – для транспортной единицы $T_1 = \max_{i,j} \times \{t_{ij} \operatorname{sgn} x_{ij}\}$. Значения x_{ij} представляют собой количество транспортных единиц, направляемых в систему «железнодорожная станция – порт»; T_1 – время последней максимальной по времени суммы аксиомат транспортного процесса для всего объема работы с транспортными единицами в рассматриваемом варианте управления перевозками (x_{ij}), т. е. общее время простоя подвижной единицы в системе организации перевозок;

2 – для варианта транспортного процесса АСТТП время занятия модуля. Логическое количество модулей МСС и технологических операций, формализуемые нечеткими функциональными представлениями при выполнении максимальных объемов работы, равно

$$T_2 = \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m}\sum_{k=1}^{v}\sum_{r=1}^{z}\{t_{ij}, \tilde{A}_{kr} \mid \mu_{\tilde{A}}(\tilde{s}_k)\} \cdot \min.$$

Лучшим является вариант, при котором суммарное время занятия всех модулей транспортной системы по варианту аксиомат транспортной работы, посредством которых реализуется вариант организации перевозок, не превышает время всех возможных вариантов аксиомат транспортных процессов, посредством которых реализуется данная работа.

Принципы теории нечетких множеств при формализации инфраструктурно-технологического взаимодействия

В соответствии с разработанной авторской методикой [14, 15] были разработаны транспортно-технологическая и модельная схемы припортовой станции. На основе анализа технико-распорядительных актов (ТРА), технологических

процессов работы 13 припортовых станций АЧБ построена обобщенная матрица связей инфраструктурных объектов (*k*-х модулей МСС, получено всего 22 инфраструктурных элемента) и *r*-х технологических операций (получено всего 23) с вероятностями их использования V_{kr}, которые регламентируют ($V_{kr} = 1$), допускают ($0 < V_{kr} < 1$) или исключают ($V_{kr} = 0$) связи технологических операций и путевого развития припортовой станции (порта) при выполнении конкретной операции. На первом этапе принято, что V_{kr}, находящееся в пределе $0 < V_{kr} < 1$, принято равным 0,5 (½). В последнем столбце матрицы определена априорная вероятность использования объекта инфраструктуры среди всех занятых или его важность в специализации для той или иной операции по формуле $V_{kr}^{\text{ср}} = \dfrac{\sum_k \sum_r V_{kr}}{s_k}$, где s_k – количество применяемых инфраструктурных элементов (модулей) при выполнении данной операции.

В дальнейшем вероятности использования модулей МСС при организации вариантов АСТТП определяются логическим формированием последовательности управленческих структур для конкретных станций и условий эксплуатации. Принимаются все возможные значения V_{kr} в интервале от 0 до 1. Например, вероятность использования $V_{kr}^{\text{ср}} > 0,8$ имеют инфраструктурные объекты (парки) для технологических операций по прибытию–отправлению грузового и пассажирского (пригородного) поезда, посадке–высадке пассажиров, расформированию (формированию) состава (группы вагонов), погрузке (выгрузке) вагонов, заезду (выезду) маневрового (поездного) локомотива, прицепке (отцепке) маневрового (поездного) локомотива, экипировке маневровых (поездных) локомотивов и др. Получено, что наибольшая плотность вероятностей приходится на количество модулей МСС припортовой станции, равное 4–5, при вероятности использования 0,75–0,90.

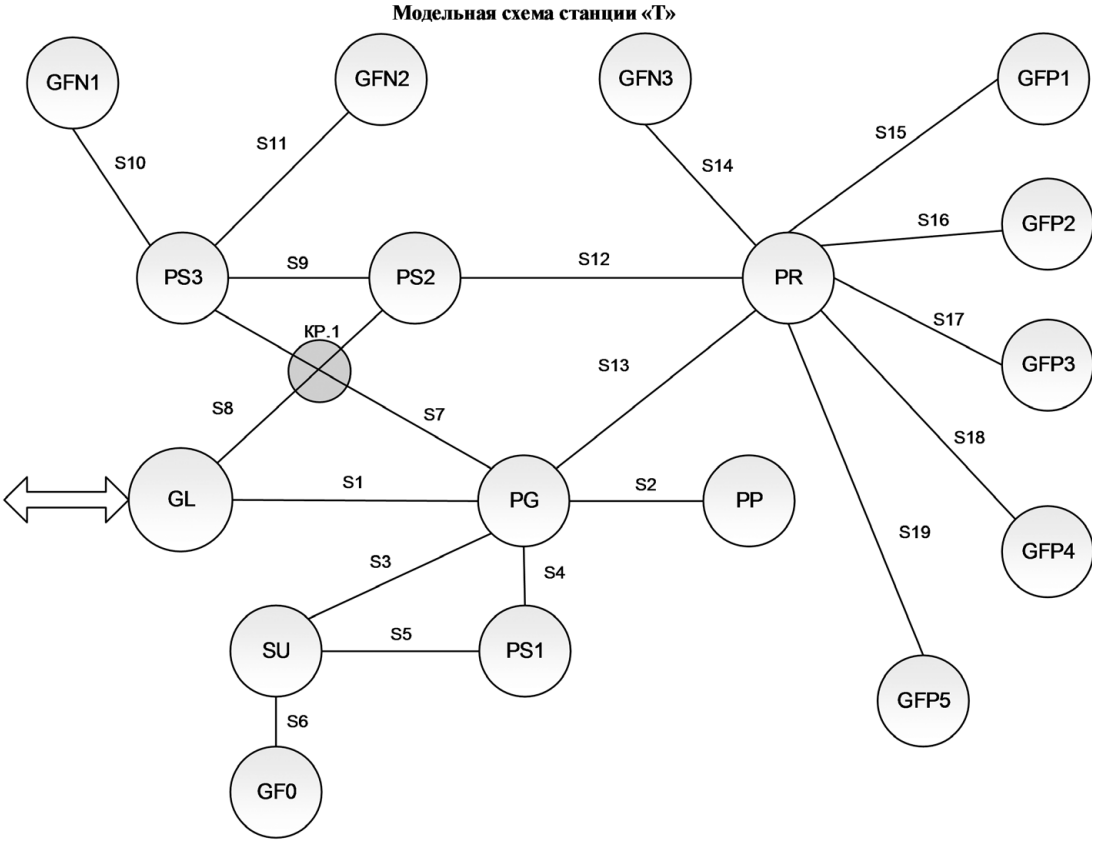


Рис. 1. Модельная схема припортовой станции «Т» (обозначения см. в табл. 1)

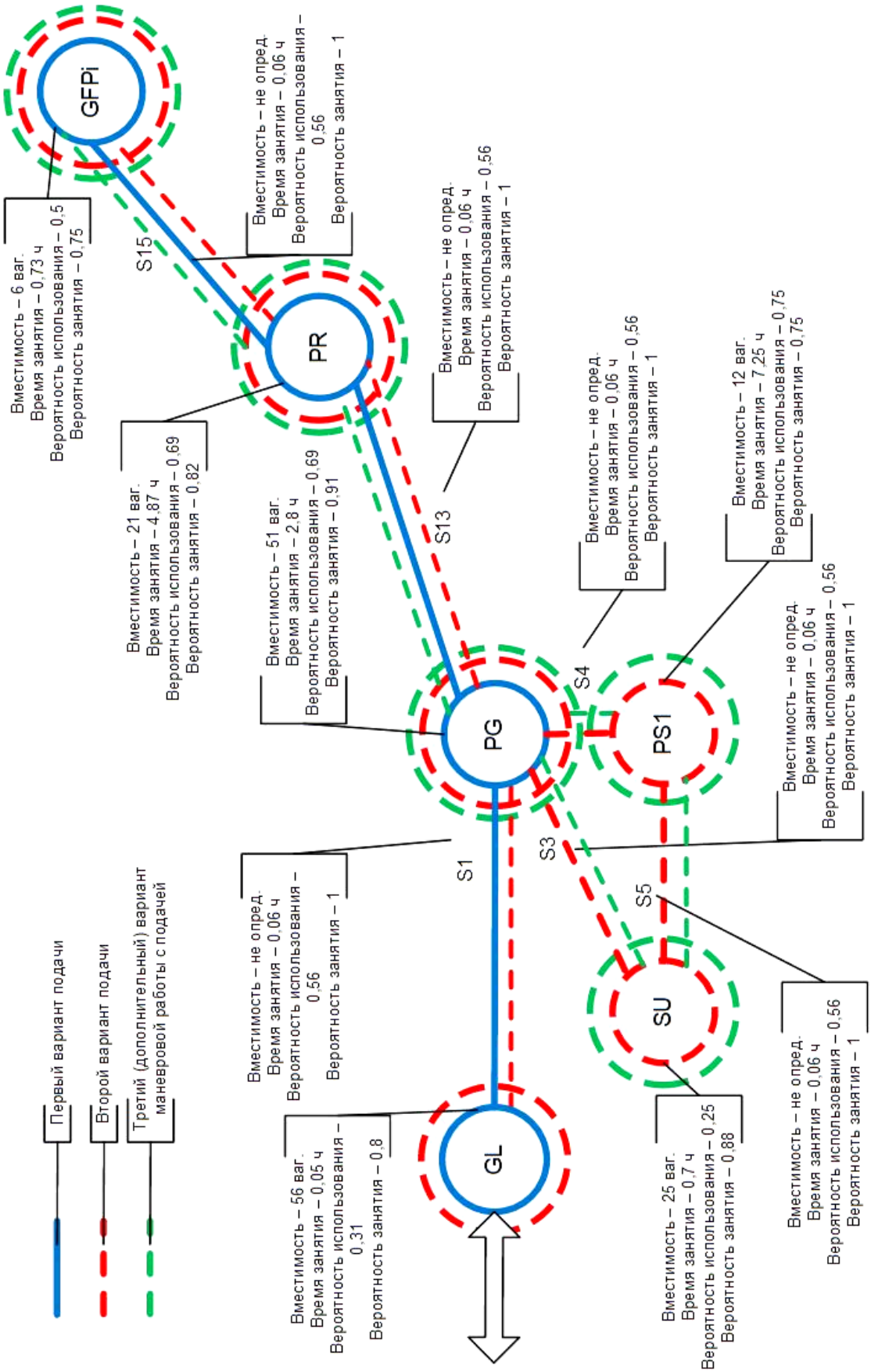


Рис. 2. Пример асиомат станционных транспортных процессов

ТАБЛИЦА 1. Матрица связей основных технологических операций и инфраструктурных элементов припортовой станции «Т»

Технологические операции	GL	PP	PG	PS1	PS2	PS3	PR	SU	GF0	GFN1	GFN2	GFN3	GFP1	GFP2	GFP3	GFP4	GFP5	Si
1. Прием отправ. пасс. (пригород.) поезда, Т1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
2. Прием (отправ.) грузового поезда, Т2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3. Прием (отправ.) грузового маршрута, Т3	1	0	1	1/2	1/2	1/2	1/2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
4. Посадка (высадка) пассажиров, Т4	1	0	1	1/2	1/2	1/2	1/2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
5. Прием (выдача) багажа, Т5	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6. Прицепка (отцепка) грузовых (пасс.) вагонов, Т6	0	1/2	1	1	1	1	1	0	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1
7. Заезд (выезд) ман. (поезд.) локомотива, Т7	1/2	1	1	1	1	1	1	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1
8. Прицепка (отцепка) ман. (поезд.) локомотива, Т8	0	0	1/2	1	1	1	1/2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
9. Подача-уборка (перестановка) состава (групп), Т9	0	0	1/2	1/2	1/2	1/2	1	0	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	0
10. Технический осмотр состава (группы вагонов), Т10	0	1	1	1/2	1/2	1/2	1/2	0	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	0
11. Коммерческий осмотр состава (группы вагонов), Т11	0	0	1	1/2	1/2	1/2	1	0	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	0
12. Расформирование (формирование) состава (групп), Т12	0	0	0	1/2	1/2	1/2	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
13. Прием (сдача) состава (группы) вагонов, Т13	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
14. Погрузка-выгрузка (слив-налив) вагонов, Т14	1/2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
20. Расстановка (сборка) вагонов, Т15	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
21. Заключительные операции по погрузке-выгрузке вагонов, Т16	0	1	1	1	1	1	1	0	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	0
Сумма технологических операций, Σ=16	5	9	11	12	12	12	11	4	10	10	10	10	10	10	10	10	10	9
Вероятность использования модуля, *P* м	0,31	0,56	0,69	0,75	0,75	0,75	0,69	0,25	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,56
Вероятность загрузки модуля, *P* загр. ср.	0,8	0,94	0,91	0,75	0,75	0,75	0,82	0,88	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	1
Резерв свободности модуля, *R* п, %	20	6	9	25	25	25	18	12	30	30	30	30	30	30	30	30	30	0
Время занятия модуля, *t* зан. ч	0,05	4,4	2,8	7,25	2,9	5,5	2,9	0,7	9,45	11,83	8,45	5,5	0,79	0,7	0,8	4	0,7	0,05
Энтропия модуля, *H*	0,17	0,05	0,08	0,21	0,21	0,21	0,16	0,11	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0
Относительная организация модуля, *R*	0,83	0,95	0,92	0,79	0,79	0,21	0,84	0,89	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	1

Для оценки вариантов АСТТП, их структур и логических последовательностей блоков предлагается применять методы нечетких функциональных представлений, рассмотренные на примере припортовой станции «Т». Модельная схема припортовой станции «Т» (рис. 1) выполнена на основе транспортно-технологической схемы. В табл. 1 для данной станции приведены значения вероятностных взаимодействий основных технологических операций (всего 16) и станционных инфраструктурных элементов (всего 18). Определены вероятности использования и загрузки модулей, времена занятия, энтропия и относительная организация модулей МСС.

На рис. 2 представлен пример аксиомат транспортных процессов для трех вариантов обслуживания причалов порта.

Модельная схема транспортного процесса для трех вариантов имеет вид

$$\tilde{A}_{kr} = \{GL \leftrightarrow PG \leftrightarrow \mu_{\tilde{A}}(SU) \leftrightarrow \mu_{\tilde{A}}(PS1) \leftrightarrow \\ \leftrightarrow \mu_{\tilde{A}}(PG) \leftrightarrow PR \leftrightarrow \mu_{\tilde{A}}(GFP)_k\},$$

где $\mu_{\tilde{A}}(SU), \mu_{\tilde{A}}(PS1)$ и т. д. – обозначение модулей, частичная степень использования которых определена логическими условиями организации транспортного процесса.

Описание АСТТП

Первый вариант транспортной работы (синий цвет, сплошная линия) предусматривает, что грузовой поезд (маршрут) прибывает с перегона GL и принимается в грузовой парк PG. После обработки в PG вагоны следуют в районный парк PR, а затем под выгрузку (погрузку) на причалы порта GFP и обратно. В данной АСТТП вагонопоток следует со станции в порт и обратно без дополнительных технологических операций.

Второй вариант транспортной работы (красный цвет, штриховая линия) предусматривает расформирование и формирование грузового поезда на путях парка сортировочного парка PS1. При этом грузовой поезд прибывает с перегона GL и принимается в грузовой парк PG для обработки, затем вагоны расформировываются двумя группами на сортировочном устройстве SU. С сортировочного устройства SU вагоны первой группы переставляются на пути сортировочного парка PS1 (затем вторая половина). С путей парка PS1 через соединительные пути и парк PG (в нем операции не выполняются) вагоны подаются на пути районного парка PR. Для начала расчетов принято, что вагоны с вероятностью использования 0,5 (½) могут подаваться на грузовые причалы порта GFP, минуя районный парк PR, с вероятностью 0,5 (½) – на пути районного парка PR, а потом группами – на грузовые фронты порта GFP, где находятся в течение известного технологического времени выгрузки–погрузки. Затем все повторяется в обратном порядке. Вагонопоток делится на части, причем каждая часть распыляется на несколько грузовых причалов порта.

Третий вариант транспортной работы (зеленый цвет, штриховая линия) предусматривает, что вагонопоток дополнительно сортируется (делится на части), причем каждая часть распыляется на несколько грузополучателей, одним из которых является порт.

Таким порядком формируются остальные АСТТП, связанные с выполнением операций по приему–отправлению пассажирских поездов, перестановке вагонов между грузовыми фронтами, заезду–выезду маневровых локомотивов и др. В табл. 2 представлены основные логические последовательности АСТТП для рассматриваемого примера транспортной работы припортовой станции «Т».

Для отражения логических ситуаций в управлении взаимодействием станции и порта необходимо систематизировать (нормировать) параметры АСТТП и разработать способ отображения ситуации. Параметризация модели методами теории нечетких множеств (ТНМ) может являться средством логического обоснования для расчета продолжительности АСТТП по вариантам обслуживания в системе, что позволяет выявлять причины задержек вагонов и повышать эффективность работы припортовой системы в целом.

ТАБЛИЦА 2. Ведомость аксиомат АСТТП припортовой станции «Т»

Аксиомата АСТТП	Модельная схема АСТТП	Общее время АСТТП[2], ч	
		min	max
АСТТП1	$\{GL \leftrightarrow PG \leftrightarrow PSl \leftrightarrow \mu_{\tilde{A}}(SU) \leftrightarrow GFO\}$	30,07	31,47
АСТТП2	$\{GL \leftrightarrow PG \leftrightarrow \mu_{\tilde{A}}(SU) \leftrightarrow \mu_{\tilde{A}}(PSl) \leftrightarrow\leftrightarrow \mu_{\tilde{A}}(SU) \leftrightarrow GFO\}$	15,75	24,40
АСТТП3	$\{GL \leftrightarrow \mu_{\tilde{A}}(PG) \leftrightarrow PO \leftrightarrow \mu_{\tilde{A}}(BO)\}$	4,57	5,38
АСТТП4	$\{GL\overleftarrow{кр.}\ PS2 \leftrightarrow PS3 \leftrightarrow \mu_{\tilde{A}}(GFN)_k\}$	25,71	29,09
АСТТП5	$\{GL \leftrightarrow PG \leftrightarrow \mu_{\tilde{A}}(SU) \leftrightarrow PSl \leftrightarrow\leftrightarrow \mu_{\tilde{A}}(PG)\overleftarrow{кр.}^{1}\ PS3 \leftrightarrow\leftrightarrow \mu_{\tilde{A}}(GFN)_k\}$	24,41	31,29
АСТТП6	$\{GL \leftrightarrow PG \leftrightarrow PR \leftrightarrow \mu_{\tilde{A}}(GFP)_k\}$	12,56	15,86
АСТТП7	$\{GL \leftrightarrow PG \leftrightarrow SU \leftrightarrow PSl \leftrightarrow PG \leftrightarrow PR \leftrightarrow\leftrightarrow \mu_{\tilde{A}}(GFP)_k\}$	34,30	37,90
АСТТП8	$\{GL \leftrightarrow PG \leftrightarrow \mu_{\tilde{A}}(SU) \leftrightarrow \mu_{\tilde{A}}(PSl) \leftrightarrow\leftrightarrow \mu_{\tilde{A}}(PG) \leftrightarrow \mu_{\tilde{A}}(PR) \leftrightarrow\leftrightarrow \leftrightarrow\leftrightarrow \mu_{\tilde{A}}(GFP)_k\}$	7,12	24,10
АСТТП9	$\{GL\overleftarrow{кр.}\ PS2 \leftrightarrow PR \leftrightarrow \mu_{\tilde{A}}(GFP)_k\}$	12,76	16,06
АСТТП10	$\{\mu_{\tilde{A}}(GFN)_k \leftrightarrow \mu_{\tilde{A}}(PS3) \leftrightarrow \mu_{\tilde{A}}(PS2) \leftrightarrow\leftrightarrow \mu_{\tilde{A}}(PR) \leftrightarrow \mu_{\tilde{A}}(GFP)_k\}$	0,24	27,40
АСТТП11	$\{\mu_{\tilde{A}}(GFO)_k \leftrightarrow \mu_{\tilde{A}}(SU) \leftrightarrow \mu_{\tilde{A}}(PSl) \leftrightarrow\leftrightarrow \mu_{\tilde{A}}(PG) \leftrightarrow \mu_{\tilde{A}}(PR) \leftrightarrow\leftrightarrow \leftrightarrow\leftrightarrow \mu_{\tilde{A}}(GFP)_k\}$	0,30	27,40
АСТТП12	$\{\mu_{\tilde{A}}(GFO)_k \leftrightarrow \mu_{\tilde{A}}(SU) \leftrightarrow \mu_{\tilde{A}}(PSl) \leftrightarrow\leftrightarrow \mu_{\tilde{A}}(PG)\overleftarrow{кр.}\ PS3 \leftrightarrow\leftrightarrow \leftrightarrow\leftrightarrow \mu_{\tilde{A}}(GFN)_k\}$	0,30	37,83
АСТТП13	$\{\mu_{\tilde{A}}(PG) \leftrightarrow \mu_{\tilde{A}}(SU) \leftrightarrow \mu_{\tilde{A}}(PSl) \leftrightarrow\leftrightarrow \mu_{\tilde{A}}(PG)\overleftarrow{кр.}\ PS3 \leftrightarrow PS2 \leftrightarrow \leftrightarrow \mu_{\tilde{A}}(PR) \leftrightarrow \mu_{\tilde{A}}(PG)\}$	0,42	28,08

[1] Ограничивающее пропускную способность пересечение путей.

[2] Расчет времен выполнен без учета непроизводительных простоев.

Рассмотрим упорядоченные наборы времен АСТТП из k по r значений:

$$\text{АСТТП}_1 = (t_1^1, t_2^1, t_3^1, \ldots, t_k^1) \wedge$$
$$\wedge\ \text{АСТТП}_2 = (t_1^2, t_2^2, t_3^2, \ldots, t_k^2) \wedge$$
$$\wedge\ \text{АСТТП}_3 = (t_1^3, t_2^3, t_3^3, \ldots, t_k^3) \wedge \ldots \wedge$$
$$\wedge \ldots \wedge \text{АСТТП}_r = (t_1^r, t_2^r, t_3^r, \ldots, t_k^r).$$

С данными множествами выполнимы операции включения, равенства, дополнения, пересечения, объединения, позволяющие выбирать рациональные параметры АСТТП.

Для оценки нечеткости составляющих компонентов АСТТП применима энтропия системы относительно значений вероятностей использования модулей ($p_1, p_2, \ldots, p_r$). Известны условия выполнения транспортных процессов и вероятности загрузки модулей АСТТП, тогда энтропия технологических операций для инфраструктурного элемента равна

$$H(p_1, p_2, \ldots, p_r) = -\sum_{r=1}^{z} p_r \cdot \ln p_r .$$

Степень беспорядка компонентов АСТТП находится между $H = 0$ (минимально) и $H = 1$ (максимально).

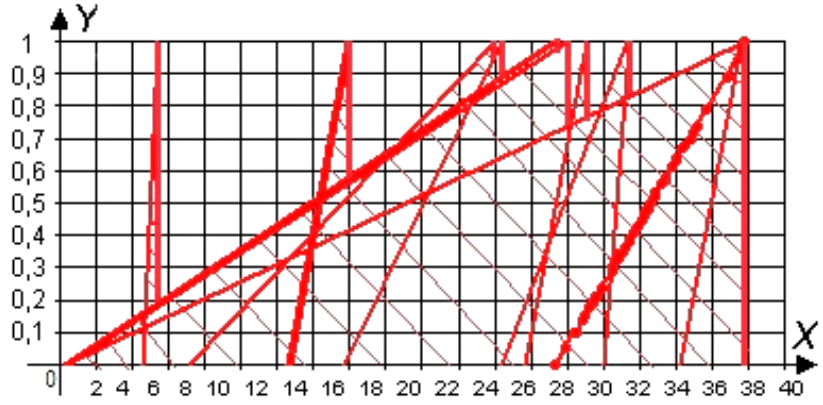


Рис. 3. Диаграмма принадлежности набора времен АСТТП нечетким подмножествам $\tilde{A}_{kr}$

Для оценки энтропии по нечеткости подмножества модулей МСС станции или составляющих времен АСТТП используется формула [13]

$$H(\mu_{\tilde{A}}(\tilde{s}_1),\mu_{\tilde{A}}(\tilde{s}_2),\ldots,\mu_{\tilde{A}}(\tilde{s}_k)) = \\ = -\frac{1}{\ln k}\sum_{k=1}^{v}\mu_{\tilde{A}}(\tilde{s}_k)\cdot\ln\mu_{\tilde{A}}(\tilde{s}_k)$$

или по нечеткости времен транспортных процессов

$$H(\mu_{\tilde{A}}(\tilde{t}_1),\mu_{\tilde{A}}(\tilde{t}_2),\ldots,\mu_{\tilde{A}}(\tilde{t}_r)) = \\ = -\frac{1}{\ln z}\sum_{r=1}^{z}\mu_{\tilde{A}}(\tilde{t}_r)\cdot\ln\mu_{\tilde{A}}(\tilde{t}_r).$$

Из-за значительного объема расчетов перебор значений вероятностей использования блоков МСС с шагом 0,1 при логической постановке последовательности АСТТП и расчетом времен производится в авторской программе системы аналитического компьютерного вычисления Maple. Например, по АСТТП7–АСТТП10 обслуживания причалов порта получено более 60 значений времен (от 7,1 до 37,9 ч). По формуле $\theta = \frac{t_{kr} - t_{kr}^{\min}}{t_{kr}^{\max} - t_{kr}^{\min}}$ определяются отклонения значений времен от крайних результатов.

На рис. 3 представлена диаграмма принадлежности набора времен вариантов АСТТП1–АСТТП13 для станции «Т» и заштрихованы нечеткие подмножества областей $\tilde{A}_{kr}$ (диаграммы Вьенна–Эйлера). По оси ординат откладываются доли отклонения времен или вероятностей выполнения транспортного процесса $\mu_{\tilde{A}}(t)$, а на оси абсцисс – значения соответствующих времен АСТТПr – t_k^r. Графики имеют линейную зависимость, так как продолжительность АСТТП определяется по сумме времен последовательностей использования модулей в их логическом сочетании и условий эксплуатации.

В дальнейших исследованиях для оценки нечетких подмножеств величин использования модулей (отклонений времен АСТТП) возможно применение понятия линейного расстояния (обобщенное расстояние Хемминга [13]), определяемого по формуле

$$d(\tilde{A}_{11},\tilde{A}_{k1}) = \sum_{k=1}^{v}\left|\mu_{\tilde{A}_{11}}(\tilde{t}_1) - \mu_{\tilde{A}_{k1}}(\tilde{t}_k)\right|.$$

Посредством обобщенного расстояния Хемминга находится линейный индекс нечеткости подмножеств составляющих величин АСТТП.

Заключение

В современных условиях эксплуатации железнодорожного транспорта необходима эффективная и экономически обоснованная система управления грузоперевозками на основе детального анализа технологии с учетом рационального использования инфраструктуры и новых принципов интеллектуализации транспортных

процессов. Выявлена особенность применения методов теории нечетких множеств для оценки эффективности работы системы «железнодорожная станция – порт», что позволяет производить параметризацию процессов транспортировки с нечеткой логической формулировкой временных критериев.

Библиографический список

1. Транспорт России: Всерос. транспорт. еженедельная информ.-аналит. газета. – URL: http://www.transportrussia.ru (дата обращения: 04.09.2021).

2. Ассоциация морских портов России. – URL: http://www.morport.com/rus (дата обращения: 20.09.2021).

3. Бородин А. Ф. Рациональное соотношение вместимости путей станций и вагонных парков с учетом увеличения доли приватных вагонов / А. Ф. Бородин, Е. А. Сотников // Железнодорожный транспорт. – 2011. – № 3. – С. 8–19.

4. Рыбин П. К. Модели учета неопределенности в задаче планирования подвода поездов к припортовым станциям / П. К. Рыбин, Р. В. Горин // Russian Journal of Logistics & Transport Management. – 2019. – Vol. 4. – N 1. – P. 5–18.

5. Combes F. Inventory theory, mode choice and network structure in freight transport / F. Combes, L. A. Tavasszy // European Journal of Transport and Infrastructure Research. – 2016. – N 16 (1). – P. 38–52.

6. Kolesnikov M. V. Efficient and secure logistics transportation system / M. V. Kolesnikov, N. N. Lyabakh, E. A. Mamaev, M. V. Bakalov // VIII International Scientific Conference Transport of Siberia. – 2020. – IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – Vol. 918. – https://doi. org/10.1088/1757-899X/918/1/012031

7. Chislov O. N. Modelling of the rail freight traffic by the method of economic-geographical delimitation in the region of the South-Easter Coast of the Baltic Sea / O. N. Chislov, V. A. Bogachev, V. M. Zadorozhniy et al. // Transport problems. – 2019. – Vol. 14. – N 2. – P. 77–87.

8. Саймон Д. Алгоритмы эволюционной оптимизации / Д. Саймон; пер. с англ. А. В. Логунова. – М.: ДМК Пресс, 2020. – 1002 с.

9. Tian W. A generalized interval fuzzy mixed integer programming model for a multimodal transportation problem under uncertainty / W. Tian, C. Cao // Engineering Optimization. – 2017. – Vol. 49. – Iss. 3. – P. 481–498.

10. Prachi A. Multi-choice stochastic transportation problem involving logistic distribution / A. Prachi, G. Talari // Advances and Applications in Mathematical Sciences. – 2018. – Vol. 18. – Iss. 1. – P. 45–58.

11. Положишников В. Б. О применении искусственных нейронных сетей на железнодорожном транспорте / В. Б. Положишников, В. А. Акманов, С. Н. Томащенко, Т. В. Шипунов // Железнодорожный транспорт. – 2019. – № 3. – С. 33–36.

12. Ivaldi M. Subadditivity tests for network separation with an application to US Railroads / M. Ivaldi, G. McCullough. – CEPR, 2004. – URL: https://ssrn.com/abstract=528542 (дата обращения: 12.09.2019).

13. Кофман А. Введение в теорию нечетких множеств / А. Кофман; пер. с фр. В. Б. Кузьмина. – М.: Радио и связь, 1982. – 432 с.

14. Числов О. Н. Методы управления параметрами грузо- и вагонопотоков припортовых транспортно-технологических систем: модели и алгоритмы: монография / О. Н. Числов, В. М. Задорожний, А. С. Кравец, Д. С. Безусов. – Ростов-н./Д.: Ростов. гос. ун-т путей сообщения, 2020. – 251 с.

15. Числов О. Н. Аксиоматика транспортных процессов припортовых грузовых станций / О. Н. Числов, В. В. Ильичева, Д. С. Безусов // Вестник транспорта Поволжья. – 2017. – № 6. – С. 73–81.

Дата поступления: 16.09.2021
Решение о публикации: 28.09.2021

Контактная информация:
ЧИСЛОВ Олег Николаевич – д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой; o_chislov@mail.ru
БЕЗУСОВ Данил Сергеевич – ст. преподаватель; iren306@yandex.ru

The principles of the theory of fuzzy sets in the formalization of infrastructural and technological interaction of the port railway transport system *

O. N. Chislov [1,2], **D. S. Bezusov** [2]

[1] Scientific and Technological University (NTU) "Sirius", 1, Olimpiyskiy pr., Sochi, 354340, Russian Federation
[2] Rostov State Transport University, 2, pl. Rostov Strelkovogo Polka Narodnogo Opolchenia, Rostov-on-Don, 344038, Russian Federation

For citation: Chislov O. N., Bezusov D. S. The principles of the theory of fuzzy sets in the formalization of infrastructural and technological interaction of the port railway transport system. *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2021, vol. 18, iss. 4, pp. 578–590. (In Russian)
DOI: 10.20295/1815-588X-2021-4-578-590

Summary

Objective: Formulating proposals for improving the indicators of infrastructural and technological interaction when assessing multivariate management decisions in the regional railway system on the example of the "port station – port" system. **Methods:** Drawing on the analysis of publications in the given research area, a modification of the methods of the theory of fuzzy sets and the theory of probability was applied to select and formalize the most important transport and technological processes of port stations, taking into account possible stochastic phenomena in the management of the interaction between the station and the port. **Results:** The theoretical substantiation of the degree of belonging of the axiom of station transport and technological processes to certain conditions of interaction between the station and the port, the relationship of their association and inclusion is obtained. A matrix of links between the main technological operations and infrastructural elements for a specific port station has been developed. An example is presented and the axioms of transport processes of options for servicing port berths are described. Approaches to the assessment of logical situations and fuzziness of subsets of parameters of transport processes in the control of the interaction between the station and the port are formulated. In the environment of the analytical computing system, the time parameters of the options for organizing transport processes are determined. **Practical importance:** The visualization of the fuzzy organization of transport sub-processes was performed, the degree of logical correspondence between the axiom of station transport and technological processes and their entropy were assessed, a diagram of the membership of a set of times of transport process variants was constructed, which allows taking into account poorly formalized processes in managing the operation of the "port station – port" system and, in the future, reduce local cars inactivity in the system.

Keywords: Railway infrastructure, port railway station, port, analytical modeling, station model scheme, theory of fuzzy sets, fuzzy subsets, probability theory, entropy, axioms of station transport and technological processes, local cars inactivity, software package.

References

1. *Transport Rossii.* Vserossiyskaya transportnaya yezhenedel'naya informatsionno-analiticheskaya gazeta [*Transport of Russia.* All-Russian transport weekly information and analytical newspaper]. Available at: http://www.transportrussia.ru (accessed: September 04, 2021).

* The work was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research, NTU "Sirius", JSC "Russian Railways" and the Educational Foundation "Talant and Success" (project N 20-38-51014).

2. *Assotsiatsiya morskikh portov Rossii* [*Association of Russian Seaports*]. Available at: http://www.morport.com/rus (accessed: September 20, 2021). (In Russian)

3. Borodin A.F. & Sotnikov Ye.A. Ratsional'noye sootnosheniye vmestimosti putey stantsiy i vagonnykh parkov s uchetom uvelicheniya doli privatnykh vagonov [Rational ratio of the capacity of tracks of stations and car parks taking into account the increase in the share of private cars]. *Zheleznodorozhnyy transport* [*Railway transport*], 2011, no. 3, pp. 8–19. (In Russian)

4. Rybin P.K. & Gorin R.V. Modeli ucheta neopredelennosti v zadache plani-rovaniya podvoda poyezdov k priportovym stantsiyam [Models for accounting for uncertainty in the problem of planning the approach of trains to port stations]. *Russian Journal of Logistics & Transport Management*, 2019, vol. 4, no. 1, pp. 5–18. (In Russian)

5. Combes F. & Tavasszy L.A. Inventory theory, mode choice and network structure in freight transport. *European Journal of Transport and Infrastructure Research*, 2016, no. 16 (1), pp. 38–52.

6. Kolesnikov M.V., Lyabakh N.N., Mamaev E.A. & Bakalov M.V. Efficient and secure logistics transportation system. *VIII International Scientific Conference Transport of Siberia, 2020. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 918.
https://doi. org/10.1088/1757-899X/918/1/012031

7. Chislov O.N., Bogachev V.A., Zadorozhniy V.M. et al. Modelling of the rail freight traffic by the method of economic-geographical delimitation in the region of the South-Easter Coast of the Baltic Sea. *Transport problems*, 2019, vol. 14, no. 2, pp. 77–87.

8. Saymon D. *Algoritmy evolyutsionnoy optimizatsii* [*Algorithms of evolutionary optimization*]. Transl. from English by A.V. Logunov. Moscow, DMK Press Publ., 2020, 1002 p. (In Russian)

9. Tian W. & Cao C. A generalized interval fuzzy mixed integer programming model for a multimodal transportation problem under uncertainty. *Engineering Optimization*, 2017, vol. 49, iss. 3, pp. 481–498.

10. Prachi A. & Talari G. Multi-choice stochastic transportation problem involving logistic distribution. *Advances and Applications in Mathematical Sciences*, 2018, vol. 18, iss. 1, pp. 45–58.

11. Polozhishnikov V.B., Akmanov V.A., Tomashchenko S.N. & Shipunov T.V. O primenenii iskusstvennykh neyronnykh setey na zheleznodorozhnom transporte [On the use of artificial neural networks in railway transport]. *Zheleznodorozhnyy transport* [*Railway transport*], 2019, no. 3, pp. 33–36. (In Russian)

12. Ivaldi M. & McCullough G. *Subadditivity tests for network separation with an application to US Railroads*. CEPR, 2004. Available at: https://ssrn.com/abstract=528542 (accessed: September 12, 2019).

13. Kofman A. *Vvedeniye v teoriyu nechetkikh mnozhestv* [*Introduction to the theory of fuzzy sets*]. Transl. from French by V.B. Kuzmin. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1982, 432 p. (In Russian)

14. Chislov O.N., Zadorozhniy V.M., Kravets A.S. & Bezusov D.S. *Metody upravleniya parametrami gruzo- i vagonopotokov priportovykh transportno-tekhnologicheskikh sistem: modeli i algoritmy* [*Methods of controlling the parameters of freight and car traffic of port transport-technological systems: models and algorithms*]. Rostov-on-Don, RGUPS [Rostov State Transport University] Publ., 2020, 251 p. (In Russian)

15. Chislov O.N., Il'icheva V.V. & Bezusov D.S. Aksiomatika transportnykh protsessov priportovykh gruzovykh stantsiy [Axiomatics of transport processes of port cargo stations]. *Vestnik transporta Povolzh'ya* [*Volga Transport Bulletin*], 2017, no. 6, pp. 73–81. (In Russian)

Received: September 16, 2021
Accepted: September 28, 2021

Author's information:
Oleg N. CHISLOV – D. Sci. in Engineering, Professor, Head of the Department;
o_chislov@mail.ru
Danil S. BESUSOV – Senior Lecturer;
iren306@yandex.ru

УДК 656.072-05

Пути повышения эффективности капитальных вложений в инфраструктуру с целью ее адаптации для обеспечения доступной среды

Т. М. Шманёв [1,2], **В. И. Ульяницкая** [2], **И. В. Ванюшин** [2], **М. С. Пухова** [1,2], **А. Ю. Ситников** [1,2]

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

[2] Октябрьская региональная служба развития пассажирских сообщений и предоставления доступа к инфраструктуре, Российская Федерация, 191036, Санкт-Петербург, Невский пр., 85, корп. Д

Для цитирования: *Шманёв Т. М., Ульяницкая В. И., Ванюшин И. В., Пухова М. С., Ситников А. Ю.* Пути повышения эффективности капитальных вложений в инфраструктуру с целью ее адаптации для обеспечения доступной среды // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2021. – Т. 18. – Вып. 4. – С. 591–600.
DOI: 10.20295/1815-588X-2021-4-591-600

Аннотация

Цель: Формирование единого подхода и адаптации объектов инфраструктуры сквозь призму рационального использования капитальных средств и через принцип сравнительного преимущества, основанный на альтернативной стоимости. **Методы:** Применяются основные инструменты анализа и управления, принцип сравнительного преимущества, динамические изменения, схемы графических моделей, описывающих алгоритмы или процессы, и др. **Результаты:** Проведен анализ возможных путей вложения капитальных средств при итоговой сопоставимости условий и сумм, потраченных на адаптацию основных функциональных зон и элементов инфраструктуры с учетом принципов «универсального дизайна» и «разумного приспособления». **Практическая значимость:** Предложенная модель является динамической и подходит в качестве критерия эффективности вложений как по отдельным инвестиционным проектам, так и по инвестиционным программам на полном жизненном цикле, включая эксплуатационную стадию.

Ключевые слова: Пассажир, маломобильные группы населения, пассажирский комплекс, универсальный дизайн, альтернативная стоимость, капитальные вложения.

Введение

Основополагающим международным актом, отражающим отношение мирового сообщества к маломобильным группам населения (МГН), является принятая 13 декабря 2006 г. Генеральной Ассамблеей ООН Конвенция о правах инвалидов. Она устанавливает, что государства-участники принимают надлежащие меры для обеспечения инвалидам наравне с другими доступа к физическому окружению, транспорту, информации и связи, а также к другим объектам и услугам, открытым или предоставляемым для населения [1]. Однако в Российской Федерации данный вопрос приобрел особую значимость только в последние десятилетия.

Текущие обязательства подтолкнули компанию ОАО «РЖД» рассматривать вопрос адаптации объектов инфраструктуры сквозь призму рационального использования капитальных средств, минимизировав проблемы управления качеством предоставляемых услуг, тем самым

обеспечив клиентоориентированность компании через повышение индекса удовлетворенности всех участников перевозочного процесса [2–5].

Одним из главных условий для реализации намеченного является организация унифицированного дизайна пространства (прилегающих территорий инфраструктуры ОАО «РЖД» и муниципальной), лежащего в основе общей концепции стратегического развития и цифровизации инфраструктуры, но пассажирский транспорт имеет не только экономическую составляющую, но и социальные обязательства перед населением, так как наряду с высоким качеством услуг должен обеспечиваться достаточно низкий уровень цен на услуги, доступный любой категории пассажира, в том числе и МГН [6].

Доступность среды в итоге должна охватить все аспекты на «пути клиента» от удобства пользования услугами, эргономичности, комфорта до минимизации существующих интерьерных, физических и временных барьеров. Все это закладывается при проектировании в начале жизненного цикла объекта, когда моделируются варианты маршрута, через возможность применения метода «бесшовного» пути клиента в независимости от категории пассажира.

В статье будет рассмотрена проблема формирования окружающего пространства без барьеров за счет обеспечения единого подхода к проектированию и рациональному использованию капитальных вложений в инфраструктуру с целью ее адаптации для обеспечения «доступной среды».

Эффективность вложения капитальных средств

Приводя расширительное толкование понятия МГН, мы не ограничиваемся группой инвалидов, но и включаем пассажиров, которых в силу внешних и внутренних факторов можно отнести к маломобильным [7]:

– инвалиды с поражением опорно-двигательного аппарата (включая инвалидов, использующих кресла-коляски);

– инвалиды с недостатками зрения и слуха;

– лица преклонного возраста (60 лет и старше);

– временно нетрудоспособные;

– беременные женщины;

– люди с детскими колясками;

– дети дошкольного возраста;

– пожилые люди;

– родители с маленькими детьми;

– маленькие дети;

– люди маленького или высокого роста;

– люди с повышенной массой тела;

– люди с тележками для перевозки багажа/грузов;

– люди с временными травмами;

– люди, не знающие русский/местный язык.

Условие доступности должно выполняться для всех пользователей независимо от роста, фигуры, подвижности и пр. По статистике доля маломобильных людей составляет до 41 % от общей численности населения любого города, из них: 10,7 % – это инвалиды всех категорий; 16,3 % – люди пожилого возраста, не признанные инвалидами; 6,2 % – люди с временной утратой трудоспособности, с багажом, другие группы населения, имеющие ограничения в мобильности; 7,8 % – дети в возрасте до 4-х лет в сопровождении взрослого человека трудоспособного возраста. Учитывая эти данные, можно обеспечить среду, в которой комфортно будут себя ощущать все категории населения: как категории «деловых людей» без багажа, так и потребители с ограниченной мобильностью [8, 9].

Определим два основных пути реализации концепции создания универсальной безбарьерной среды: адаптация при новом строительстве и разумное приспособление имеющейся инфраструктуры. Однако значительная часть требуемых структурных изменений должна основываться на реальной оценке текущего положения дел и возможных капитальных вложений. Выбор решения характеризуется «временем движения» денежных средств внутри компании, что позволяет системе учитывать долгосрочную перспективу эксплуатации, а также изменения в существующие процессы и инфраструктуру.

Временная эффективность будет достигаться путем организации компенсирующих мероприятий, а выработка долгосрочной стратегии будет основываться на непосредственной форме товарного обращения, превращения денег в товар и обратного превращения товара в новые деньги (рис. 1) [10], выполняя тем самым условия капитализации потока будущих доходов в конечную величину.

С течением времени производственный потенциал объектов может расширяться в результате накопления новых ресурсов и изобретения новых способов их использования [11]. В силу отмеченных выше обстоятельств, организация пространства на объектах транспортной инфраструктуры представляется комплексной задачей, решение которой связано не только с техническими изменениями, но и с обеспечением удовлетворенности пассажиров, предоставлением транспортных услуг в том объеме и в таком виде, которые бы отвечали потребностям и формировали позитивное отношение пассажиров к железнодорожному транспорту [6].

Доступность объектов транспортной инфраструктуры должна обеспечиваться путем адаптации основных функциональных зон и элементов зданий и сооружений с учетом двух принципов. Первый принцип – «универсальный пространственный дизайн» – применяется при проектировании и строительстве новых объектов, а также позволяет сформировать беспрепятственный доступ МГН к зданиям и сооружениям, обеспечивает безопасность их эксплуатации без необходимости последующего переустройства и приспособления. Он основывается на действующих нормативных документах и основных требованиях Конвенции ООН к обеспечению доступности объектов всеми категориями МГН, которые обязательно учитываются при проектировании нового объекта и закладываются в долгосрочные программы по «доступной среде». Все это дает возможность на всех этапах жизненного цикла объекта (концепция, техническое задание, проектно-сметная документация, экспертиза) отслеживать правильность применяемых технических решений и соответствие спецификации реабилитационного оборудования, контролировать освоение вложенных денежных средств [12–14].

Для обеспечения «доступной среды» во всех отраслях жизнедеятельности МГН необходимо приведение объектов к нормативным требованиям и как следствие вложение больших инвестиций. Причем зачастую выделенный на определенный период бюджет не пропорционален количеству объектов, требующих адаптации для обслуживания МГН, что, в свою очередь, приводит к значительному увеличению сроков реализации намеченных программ. Чтобы сократить временные рамки, особенно в условиях ограниченных ресурсов, можно использовать второй принцип сравнительного преимущества («разумного приспособления»).

Принцип сравнительного преимущества легко применим на объектах инфраструктуры, основанный на понятии альтернативной стоимости. Рассмотрим два примера вложения капитальных средств как двух отдельных производственных единиц, обозначим их А (станция Петрозаводск) и В (станция Выборг). Под производственной

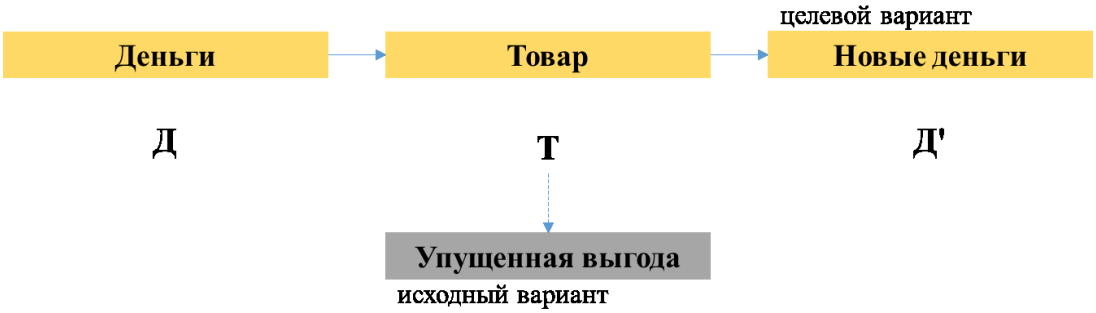


Рис. 1. Цикл товарного обращения капитала

Рис. 2. Принцип сравнительного преимущества вложения капитальных средств

единицей понимаем обособленное и специализируемое оборудование для МГН, каждая из которых выполняет работу, но не одинаково хорошо. Производственная единица А обладает сравнительным преимуществом, тогда как производственные возможности единицы В имеют наименьшую альтернативную стоимость и будут отнесены к понятию «упущенной выгоды» [15–17]. Упрощенная версия принципа сравнительного преимущества кругооборота денежных средств для рассматриваемой модели реализации системы представлена на рис. 2.

Рассмотрим подробнее результат вложения капитальных средств в производственную единицу А – железнодорожный вокзал Петрозаводск. В 2020 г. введен в эксплуатацию современный многофункциональный пешеходный мост длиной 64 м. Объект является переходным, так как относится к комплексным. Источники финансирования – инвестиционная программа 2019 г. в сумме более 600 млн руб. Данная сумма обоснована производственными расходами, исходя из целесообразности, рациональности, эффективности при проектировании нового объекта, а именно организации «универсального пространственного дизайна». Отличительная черта пешеходного моста – оптимальное разделение по всей длине пешеходной зоны на две части (транзитная и для обслуживания пассажиров). Кроме того, мост снабжен четырьмя лифтами, которые адаптированы для всех категорий МГН (грузоподъемность каждого 1000 кг).

Таким образом, система фокусирования на предпроекте еще на стадии планирования инфраструктурной составляющей станции Петрозаводск стала фактически возобновляемой и практически безотходной в производственной цепочке в долгосрочной перспективе. Тем самым обособленное и специализируемое оборудование выполняет функции гибкого предоставления услуг, поддерживая больше функций и возможностей для пассажиров и клиентов не только компании ОАО «РЖД», но и части городской среды, составляя эффективные вложения капитальных средств (рис. 3, *а*).

Как пример нерационального использования капитальных вложений, принятое в 2010 г. в рамках модернизации вокзального комплекса на железнодорожной станции Выборг, приведем решение по обустройству подъемной платформы для перемещения только инвалидов с коляской и сопровождающих лиц, что не обеспечивает равные условия применения данного продукта для всех категорий МГН (рис. 3, *б*). В рамках модернизации данного вокзального комплекса было заложено финансирование в размере более 200 млн руб. Однако принимаемые во внимание производственные мощности далеки от первоначальной задачи обеспечения безбарьерной среды. В результате оборудование простаивает и не работает на пассажира (см. рис. 1).

При этом если сравнивать стоимость денег с учетом фактора времени, то с 2010 г. накопленный индекс цен превысил 150 % в отдельных

а

б

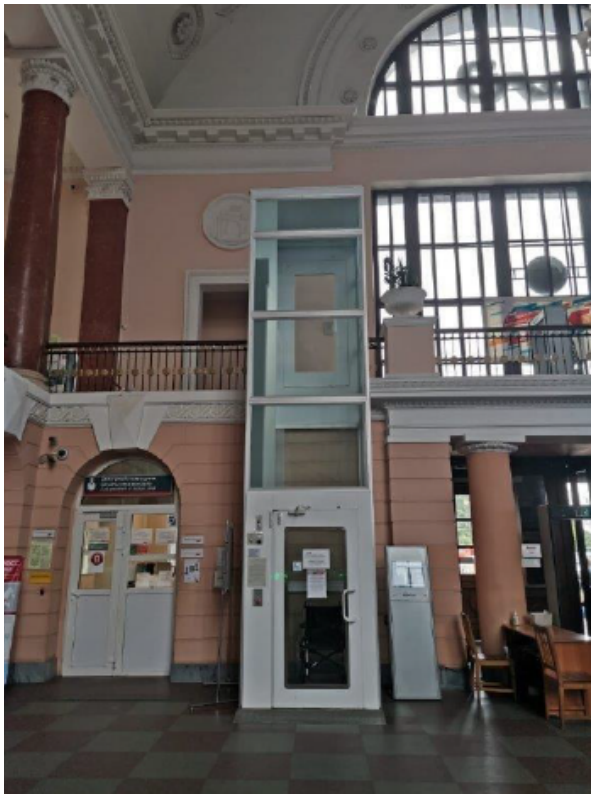


Рис. 3. Фотографии унифицированных объектов на вокзальных комплексах:
а – пешеходный мост станции Петрозаводск;
б – подъемная платформа станции Выборг

категориях, а в номинальных ценах товары подорожали в среднем в 1,5 раза [18]. Опираясь на прошлые значения инфляции, стоимость вложений в пересчете на текущее время на этот объект составила бы примерно 368 млн руб., причем характеристики объекта также остались бы не

а

б

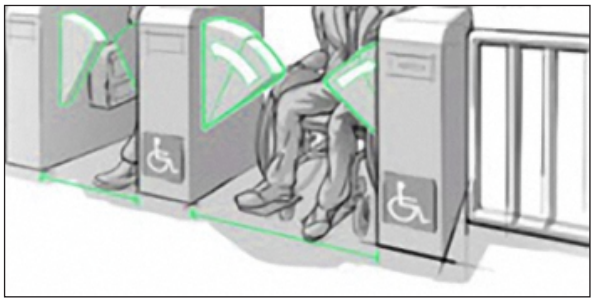


Рис. 4. Примеры «универсального дизайна» и «разумного приспособления»:
а – организация входного пространства;
б – турникетные линейки

востребованы. В любом случае, если рассматривать вопрос о перепланировке и переквалификации внутреннего интерьера вокзального комплекса станции Выборг с учетом «универсального дизайна», затраты капитальных вложений возрастут на порядок (+60–70 %), что говорит о потерянных выгодах и отсутствии отдачи на результат при первоначальной модернизации объекта.

Сравнив два варианта вложения капитальных средств, мы пришли к выводу, что итоговую сопоставимость условий и сумм, потраченных на адаптацию основных функциональных зон и элементов инфраструктуры, с учетом принципов «универсального дизайна» и «разумного приспособления» (рис. 4) лучше рассчитывать из многофункциональных решений, потратив при этом разово больше денег и для более широкой аудитории, чем делать акцент на узкопрофильном и специальном оборудовании.

Разномасштабные вложения в инвестиционные программы, капитальные вложения, титулы на реконструкцию требуют рациональное использование денежных средств на начальном этапе нового строительства или адаптацию текущей инфраструктуры, чтобы при создании безбарьерной среды исключить рост стоимости последующей реконструкции, модернизации от первоначальной стоимости, который больше на 8–12 %.

Заключение

В основу реализации любого принципа заложен критерий оценки повышения экономической эффективности капитальных вложений, который достигается путем сокращения продолжительности строительства, улучшения качества строительных и монтажных работ, в результате чего уменьшаются затраты на переделки и главное создаются лучшие условия для эксплуатации построенных объектов и снижаются эксплуатационные затраты [19–21]. Одним из решений по поэтапному повышению эффективности использования капитальных вложений, доходности и отдачи на результат будет принцип сравнительного преимущества и учета альтернативной стоимости объектов как при строительстве, так и при модернизации. Данная модель является динамической и подходит в качестве критерия эффективности вложений и по отдельным проектам, и по инвестиционным программам на полном жизненном цикле, включая эксплуатационную стадию [22]. При этом для окончательной оценки по применению того или иного технического решения, направленного на адаптацию объекта для обслуживания МГН и подтверждения его целесообразности, необходимо определить сравнительную эффективность капитальных вложений, задача которой – обоснование выбора наиболее рационального варианта капитальных вложений.

Разработка основных принципов формирования объемно-пространственной среды, исходя из имеющихся финансовых ресурсов, должна опираться на экономическую результативность социально-экономической системы и выбираться на основе максимума достигаемого социального результата и повышения индекса удовлетворенности клиента.

Библиографический список

1. Федеральный закон от 03.05.2012 г. № 46-ФЗ. «О ратификации Конвенции о правах инвалидов» // Собрание законодательства РФ. – 2012. – № 46. – Ст. 2280.

2. Покровская О. Д. Терминалистика – организация и управление в транспортных узлах // О. Д. Покровская, Е. К. Коровяковский // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2016. – Т. 13. – Вып. 4 (49). – С. 509–520.

3. Покровская О. Д. Клиентоориентированность и цифровизация терминально-логистической деятельности / О. Д. Покровская // Железнодорожный транспорт. – 2019. – № 5. – С. 9–16.

4. Голомолзин В. Г. Характеристика и роль терминальной сети транспортного узла в организации контейнерных поездов / В. Г. Голомолзин, О. Д. Покровская // Железнодорожный транспорт. – 2021. – № 2. – С. 16–21.

5. Покровская О. Д. Предложения по повышению клиентоориентированности логистического бизнеса холдинга «РЖД» / О. Д. Покровская // Вестник транспорта. – 2021. – № 3. – С. 22–30.

6. Гудков В. А. Качество пассажирских перевозок: возможность исследования методами социологии: учеб. пособие / В. А. Гудков, М. М. Бочкарева, Н. В. Дулина, Н. А. Овчар. – Волгоград: Волгоград. гос. техн. ун-т, 2008. – 163 с.

7. Шманёв Т. М. Условия соответствия требованиям обеспечения доступности транспортных объектов ОАО «РЖД» через промежуточные решения и принятие компенсирующих мер для обслуживания маломобильных групп населения, в том числе инвалидов / Т. М. Шманёв, В. И. Ульяницкая, М. С. Пухова, П. С. Панов, А. Ю. Ситников // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2021. – Т. 18. – Вып. 3. – С. 340–352.

8. Копылова Е. В. Особенности обслуживания маломобильных пассажиров на железнодорожном транспорте: учеб. пособие / Е. В. Копылова, Е. Б. Куликова, М. Ю. Левшукова. – М.: РУТ (МИИТ), 2018. – 140 с.

9. Радыгина Е. Г. Создание безбарьерной среды в средствах размещения для гостей с ограниченными возможностями / Е. Г. Радыгина // Концепт. – 2014. – № 5. – С. 56–60. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/sozdanie-bezbariernoy-sredy-v-sredstvah-razmescheniya-dlya-gostey-s-ogranichennymi-vozmozhnostyami (дата обращения: 23.09.2021).

10. Егоров Д. Г. Об «особости» капитализма / Д. Г. Егоров, Н. А. Ярмолич // МНИЖ. – 2021. – № 5–4 (107). – С. 10–12. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/ob-ososbosti-kapitalizma (дата обращения: 21.09.2021).

11. Долан Э. Дж. Микроэкономика / Э. Дж. Долан, Д. Е. Линдсей; пер. с англ. В. В. Лукашевича и др. – СПб.: СПб ОРКЕСТР, 1994. – 447 с.

12. Байков Н. М. Доступность среды жизнедеятельности для инвалидов как объект общественного мнения / Н. М. Байков, О. Е. Мачкарина // Власть и управление на Востоке России. – 2017. – № 1 (78). – С. 77–84. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/dostupnost-sredy-zhiznedeyatelnosti-dlya-invalidov-kak-obekt-obschestvennogo-mneniya (дата обращения: 20.09.2021).

13. Наберушкина Э. К. Перспективы создания доступной среды / Э. К. Наберушкина // Вестник СГТУ. – 2017. – № 1. – С. 205–208. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/perspektivy-sozdaniya-dostupnoy-sredy (дата обращения: 21.09.2021).

14. Катернюк А. В. Оптимизация затрат на привлечение клиентов как фактор конкурентоспособности / А. В. Катернюк // Вестник РЭА им. Г. В. Плеханова. – 2019. – № 6 (108). – С. 172–182. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/optimizatsiya-zatrat-na-privlechenie-klientov-kak-fa ktor-konkurentosposobnosti (дата обращения: 23.09.2021).

15. Ахмедов Б. Альтернативная стоимость кризиса: ранжирование стран СНГ по масштабу потерь от кризиса / Б. Ахмедов // Кавказ и глобализация. – 2010. – № 3–4. – С. 89–101. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/alternativnaya-stoimost-krizisa-ranzhirovanie-stran-sng-po-masshtabu-poter-ot-krizisa (дата обращения: 20.09.2021).

16. Шапиро Н. А. Теория предпринимательства и оценочные практики / Н. А. Шапиро, К. В. Перехожева // Экономика и экологический менеджмент. – 2018. – № 2. – С. 66–74. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/teoriya-predprinimatelstva-i-otsenochnye-praktiki (дата обращения: 23.09.2021).

17. Кадыров Р. А. Методические аспекты экономического обоснования, оценки и выбора строительных проектов на альтернативной основе / Р. А. Кадыров, В. Б. Мелехин // Вестник евразийской науки. – 2018. – № 1. – 15 с. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/metodicheskie-aspekty-ekonomicheskogo-obosnovaniya-otsenki-i-vybora-stroitelnyh-proektov-na-alternativnoy-osnove (дата обращения: 23.09.2021).

18. Инфляция в России. – М.: Федерал. служба гос. (Росстат). – 2021. – URL: https://rosstat.gov.ru/ps/inflation (дата обращения: 21.09.2021).

19. Чукаев А. Н. Организационно-экономические аспекты совершенствования инструментария повышения эффективности региональных инвестиционных проектов / А. Н. Чукаев // Инновации и инвестиции. – 2019. – № 8. – С. 27–31. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/organizatsionno-ekonomicheskie-aspekty-sovershenstvovaniya-instrumentariya-povysheniya-effektivnosti-regionalnyh-investitsionnyh (дата обращения: 23.09.2021).

20. Бучаев Я. Г. Методы экономического анализа альтернативных вариантов нововведений / Я. Г. Бучаев, М. М. Гаджиев // Научно-технические ведомости СПБГПУ. Экономические науки. – 2019. – № 1 (139). – С. 193–199. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/metody-ekonomicheskogo-analiza-alternativnyh-variantov-novovvedeniy (дата обращения: 23.09.2021).

21. Рубан В. А. Развитие системы оценки эффективности государственного управления в РФ / В. А. Рубан, М. О. Литвиненко // Вестник БГУ. Экономика и менеджмент. – 2018. – № 3. – С. 61–66. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/razvitie-sistemy-otsenki-effektivnosti-gosudarstvennogo-upravleniya-v-rossiyskoy-federatsii (дата обращения: 23.09.2021).

22. Смирнова Е. Ю. Выбор критериев для мониторинга окупаемости капитальных вложений на полном жизненном цикле инвестиционного проекта / Е. Ю. Смирнова // Тез. докл. на XXI Апрельской междунар. науч. конференции по проблемам развития экономики и общества. – М., 2020. – 5 с. – URL: https://events-files-bpm.hse.ru/files/2CF37678-

375C-4EFA-BF91-478C55B67E09/LyfeCycleCapex.docx (дата обращения: 20.09.2021).

Дата поступления: 24.09.2021
Решение о публикации: 25.10.2021

Контактная информация:
ШМАНЁВ Тимофей Михайлович – канд. техн. наук, доц.; l_shmanev@orw.rzd, t.schmaniov@yandex.ru
УЛЬЯНИЦКАЯ Виктория Игоревна – l_UlyanitskayaVI@orw.rzd, ulyanickaya_viktoriya@mail.ru
ВАНЮШИН Игорь Валерьевич – igor.vanyushin@yandex.ru
ПУХОВА Марина Сергеевна – l_PuhovaMS@orw.rzd, marinka96puhova@gmail.com
СИТНИКОВ Алексей Юрьевич – aysitnikov@inbox.ru

Ways of improving the efficiency of capital investments into the infrastructure in order to adapt it to ensure accessible environment

T. M. Shmanyov [1,2], V. I. Ulyanitskaya [2], I. V. Vanyushin [2], M. S. Pukhova [1,2], A. Yu. Sitnikov [1,2]

[1] Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation
[2] Octyabrskaya Regional Service for the Development of Passenger Services and Providing Access to Infrastructure, 85, bld. D, Nevsky pr., Saint Petersburg, 191036, Russian Federation

For citation: Shmanyov T. M., Ulyanitskaya V. I., Vanyushin I. V., Pukhova M. S., Sitnikov A. Yu. Ways of improving the efficiency of capital investments into the infrastructure in order to adapt it to ensure accessible environment. *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2021, vol. 18, iss. 4, pp. 591–600. DOI: 10.20295/1815-588X-2021-4-591-600

Summary

Objective: Formation of a unified approach and adaptation of infrastructure facilities through the prism of rational use of capital funds and through the principle of comparative advantage based on opportunity cost. **Methods:** The main tools of analysis and management, the principle of comparative advantage, dynamic changes, schemes graphical models describing algorithms or processes, etc. are applied. **Results:** An analysis of possible ways of capital investment is carried out, with the final comparability of the conditions and amounts spent on the adaptation of the main functional areas and infrastructure elements, taking into account the principles of "universal design" and "reasonable adaptation". **Practical importance:** The proposed model is dynamic and can be applied as a criterion for the effectiveness of investments, both for individual investment projects and for investment programs in the full life cycle, including the operational stage.

Keywords: Passenger, people with limited mobility, passenger complex, universal design, opportunity cost, capital investments.

References

1. *Federal'nyy zakon ot 03.05.2012 g. no. 46-FZ. "O ratifikatsii Konventsii o pravakh invalidov"* [*Federal Law of May 03.2012 N 46-FZ.* "On Ratification of the Convention on the Rights of Persons with Disabilities"]. *Sobraniye zakonodatel'stva RF* [*Collection of legislation of the Russian Federation*], 2012, no. 46, st. 2280. (In Russian)

2. Pokrovskaya O. D. & Korovyakovsky E. K. Terminalistika – organizatsiya i upravleniye v transportnykh uzlakh [Terminalistics – organization and management in transport hubs]. *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2016, vol. 13, no. 4 (49), pp. 509–520.

3. Pokrovskaya O. D. Kliyentooriyentirovannost' i tsifrovizatsiya terminal'no-logisticheskoy deyatel'nosti [Customer focus and digitalization of terminal and logistics activities]. *Zheleznodorozhnyi transport* [*Railway Transport*], 2019, no. 5, pp. 9–16. (In Russian)

4. Golomolzin V. G. & Pokrovskaya O. D. Kharakteristika i rol' terminal'noy seti transportnogo uzla v organizatsii konteynernykh poyezdov [Characteristics and role of the terminal network of a transport hub in the organization of container trains]. *Zheleznodorozhnyi transport* [*Railway Transport*], 2021, no. 2, pp. 16–21. (In Russian)

5. Pokrovskaya O. D. Predlozheniya po povysheniyu kliyentooriyentirovannosti logisticheskogo biznesa kholdinga "RZHD" [Proposals to improve the customer focus of the logistics business of the Russian Railways holding]. *Vestnik transporta* [*Transport herald*], 2021, no. 3, pp. 22–30. (In Russian)

6. Gudkov V. A., Bochkareva M. M., Dulina N. V. & Ovchar N. A. *Kachestvo passazhirskikh perevozok: vozmozhnost' issledovaniya metodami sotsiologii*. Uchebnoye posobiye [*The quality of passenger transportation: the possibility of research by methods of sociology*. Tutorial]. Volgograd, VolgGTU [Volgograd State Technical University] Publ., 2008, 163 p. (In Russian)

7. Shmanov T. M., Ul'yanitskaya V. I., Pukhova M. S., Panov P. S. & Sitnikov A. Yu. Usloviya sootvetstviya trebovaniyam obespecheniya dostupnosti transportnykh ob"yektov OAO "RZHD" cherez promezhutochnyye resheniya i prinyatiye kompensiruyushchikh mer dlya obsluzhivaniya malomobil'nykh grupp naseleniya, v tom chisle invalidov [Conditions for compliance with the requirements for ensuring the accessibility of transport facilities of Russian Railways through interim solutions and the adoption of compensatory measures to serve people with limited mobility, including people with disabilities]. *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2021, vol. 18, iss. 3, pp. 340–352. (In Russian)

8. Kopylova E. V., Kulikova E. B. & Levshukova M. Yu. *Osobennosti obsluzhivaniya malomobil'nykh passazhirov na zheleznodorozhnom transporte*. Uchebnoye posobiye [*Features of service for passengers with limited mobility on railway transport*. Tutorial]. Moscow, MIIT [Russian University of Transport] Publ., 2018, 140 p. (In Russian)

9. Radygina E. G. Sozdaniye bezbar'yernoy sredy v sredstvakh razmeshcheniya dlya gostey s ogranichennymi vozmozhnostyami [Creation of a barrier-free environment in accommodation facilities for guests with disabilities]. *Kontsept* [*Concept*], 2014, no. 5, pp. 56–60. Available at: https://cyberleninka.ru/article/n/sozdanie-bezbariernoy-sredy-v-sredstvah-razmescheniya-dlya-gostey-s-ogranichennymi-vozmozhnostyami (accessed: September 23, 2021). (In Russian)

10. Egorov D. G. & Yarmolich N. A. Ob "osobosti" kapitalizma [On the peculiarity of capitalism]. *MNIZ* [*International research journal*], 2021, no. 5–4 (107), pp. 10–12. Available at: https://cyberleninka.ru/article/n/ob-osobosti-kapitalizma (accessed: September 21, 2021). (In Russian)

11. Dolan E. J. & Lindsay D. E. *Mikroekonomika* [*Microeconomics*]. Transl. from English by V. V. Lukashevich and at al. Saint Petersburg, SPb ORCHESTRA Publ., 1994, 447 p. (In Russian)

12. Baykov N. M. & Machkarina O. E. Dostupnost' sredy zhiznedeyatel'nosti dlya invalidov kak ob"yekt obshchestvennogo mneniya [Accessibility of the living environment for disabled people as an object of public opinion]. *Vlast' i upravleniye na Vostoke Rossii* [*Power and governance in the East of Russia*], 2017, no. 1 (78), pp. 77–84. Available at: https://cyberleninka.ru/article/n/dostupnost-sredy-zhiznedeyatelnosti-dlya-invalidov-kak-obekt-obschestvennogo-mneniya (accessed: September 20, 2021). (In Russian)

13. Naberushkina E. K. Perspektivy sozdaniya dostupnoy sredy [Prospects for the creation of an accessible environment]. *Vestnik SGTU* [*Saratov State Technical University Bulletin*], 2017, no. 1, pp. 205–208. Available at: https://cyberleninka.ru/article/n/perspektivy-sozdaniya-dostupnoy-sredy (accessed: September 21, 2021). (In Russian)

14. Katernyuk A. V. Optimizatsiya zatrat na privlecheniye kliyentov kak faktor konkurentosposobnosti [Optimization of customer acquisition costs as a factor of competitiveness]. *Vestnik REA im. G. V. Plekhanova* [*Plekhanov Russian University of Economics Bulletin*], 2019, no. 6 (108), pp. 172–182. Available at: https://cyberleninka.ru/article/n/optimizatsiya-zatrat-na-privleche-

nie-klientov-kak-faktor-konkurentosposobnosti (accessed: September 23, 2021). (In Russian)

15. Akhmedov B. Al'ternativnaya stoimost' krizisa: ranzhirovaniye stran SNG po masshtabu poter' ot krizisa [Opportunity cost of the crisis: ranking the CIS countries by the scale of losses from the crisis]. *Kavkaz i globalizatsiya* [*The Caucasus & Globalization*], 2010, no. 3–4, pp. 89–101. Available at: https://cyberleninka.ru/article/n/alternativnaya-stoimost-krizisa-ranzhirovanie-stran-sng-po-masshtabu-poter-ot-krizisa (accessed: September 20, 2021). (In Russian)

16. Shapiro N. A. & Perekhozheva K. V. Teoriya predprinimatel'stva i otsenochnyye praktiki [Entrepreneurship theory and evaluation practices]. *Ekonomika i ekologicheskiy menedzhment* [*Economics and Environmental Management*], 2018, no. 2, pp. 66–74. Available at: https://cyberleninka.ru/article/n/teoriya-predprinimatelstva-i-otsenochnye-praktiki (accessed: September 23, 2021). (In Russian)

17. Kadyrov R. A. & Melekhin V. B. Metodicheskiye aspekty ekonomicheskogo obosnovaniya, otsenki i vybora stroitel'nykh proyektov na al'ternativnoy osnove [Methodical aspects of economic justification, assessment and selection of construction projects on an alternative basis]. *Vestnik yevraziyskoy nauki* [*Bulletin of Eurasian Science*], 2018, no. 1, 15 p. Available at: https://cyberleninka.ru/article/n/metodicheskie-aspekty-ekonomicheskogo-obosnovaniya-otsenki-i-vybora-stroitelnyh-proektov-na-alternativnoy-osnove (accessed: September 23, 2021). (In Russian)

18. *Inflyatsiya v Rossii* [*Inflation in Russia*]. Moscow: Federal. sluzhba gos. (Rosstat) Publ., 2021. Available at: https://rosstat.gov.ru/ps/inflation (accessed: September 21, 2021). (In Russian)

19. Chukaev A. N. Organizatsionno-ekonomicheskiye aspekty sovershenstvovaniya instrumentariya povysheniya effektivnosti regional'nykh investitsionnykh proyektov [Organizational and economic aspects of improving the tools for increasing the efficiency of regional investment projects]. *Innovatsii i investitsii* [*Innovations and investments*], 2019, no. 8, pp. 27–31. Available at: https://cyberleninka.ru/article/n/organizatsionno-ekonomicheskie-aspekty-sovershenstvovaniya-instrumentariya-povysheniya-effektivnosti-regionalnyh-investitsionnyh (accessed: September 23, 2021). (In Russian)

20. Buchaev Ya. G. & Gadzhiev M. M. Metody ekonomicheskogo analiza al'ternativnykh variantov novovvedeniy [Methods of economic analysis of alternative options for innovations]. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPBGPU. Ekonomicheskiye nauki* [*Scientific and technical journal of Saint Petersburg Polytechnic University of Peter the Great. Economic sciences*], 2019, no. 1 (139), pp. 193–199. Available at: https://cyberleninka.ru/article/n/metody-ekonomicheskogo-analiza-alternativnyh-variantov-novovvedeniy (accessed: September 23, 2021). (In Russian)

21. Ruban V. A. & Litvinenko M. O. Razvitiye sistemy otsenki effektivnosti gosudarstvennogo upravleniya v RF [Development of a system for assessing the effectiveness of public administration in the Russian Federation]. *Vestnik BGU. Ekonomika i menedzhment* [*Buryat State University Bulletin. Economics and Management*], 2018, no. 3, pp. 61–66. Available at: https://cyberleninka.ru/article/n/razvitie-sistemy-otsenki-effektivnosti-gosudarstvennogo-upravleniya-v-rossiyskoy-federatsii (accessed: September 23, 2021). (In Russian)

22. Smirnova E. Yu. Vubor kriteriev dliya monitoringa okupaemosti kapital'nych vlozheniyi na polnom zhisnennom tsikle investitsionnogo proekta [Choice of a criteriors for monitoring repaying of capital investigations on the full living cycle of investicional project]. *Tezisy dokladov na XXI Aprel'skoy mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii po problemam razvitiya ekonomiki i obshchestva* [*Abstracts of the XXI April International Scientific Conference on the Development of Economy and Society*]. Moscow, 2020, 5 p. Available at: https://events-files-bpm.hse.ru/files/2CF37678-375C-4EFA-BF91-478-C55B67E09/LyfeCycleCapex.docx (accessed: September 20, 2021). (In Russian)

Received: September 24, 2021
Accepted: October 25, 2021

Author's information:
Timofey M. SHMANYOV – PhD in Engineering, Associate Professor; l_shmanev@orw.ru, t.schmaniov@yandex.ru
Victoria I. ULYANITSKAYA – l_UlyanitskayaVI@orw.ru, ulyanickaya_viktoriya@mail.ru
Igor V. VANYUSHIN – igor.vanyushin@yandex.ru
Marina S. PUKHOVA – l_PuhovaMS@orw.ru, marinka96puhova@gmail.com
Alexey Yu. SITNIKOV – aysitnikov@inbox.ru

УДК 620.92

Оценка возможности применения альтернативных источников электрической энергии для питания собственных нужд тяговых подстанций дистанции электроснабжения на примере ЭЧЭ–20 «Броневая»

И. А. Терёхин [1], **А. Ю. Балакин** [2]

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

[2] Балтийская дистанция электроснабжения, Октябрьская дирекция по энергообеспечению, ОАО «Российские железные дороги», Российская Федерация, 198205, Санкт-Петербург, пос. Станционный, 1

Для цитирования: *Терёхин И. А., Балакин А. Ю.* Оценка возможности применения альтернативных источников электрической энергии для питания собственных нужд тяговых подстанций дистанции электроснабжения на примере ЭЧЭ-20 «Броневая» // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2021. – Т. 18. – Вып. 4. – С. 601–610.
DOI: 10.20295/1815-588X-2021-4-601-610

Аннотация

Цель: Оценка возможности применения альтернативных источников электрической энергии для питания собственных нужд тяговых подстанций дистанции электроснабжения на примере ЭЧЭ-20 «Броневая». **Методы:** Используется альтернативная энергетика на железных дорогах. **Результаты:** Выбрано оборудование и спроектирована солнечная электростанция, рассчитаны экономическая эффективность от внедрения альтернативного источника энергии и срок ее окупаемости. **Практическая значимость:** Спроектированный альтернативный источник электрической энергии позволяет повысить показатели энергетической эффективности производственных процессов железнодорожного транспорта.

Ключевые слова: Альтернативная энергетика, солнечная энергетика, тяговая подстанция, собственные нужды, железнодорожный транспорт, солнечная панель, инвертор, выработка энергии.

Введение

Современный железнодорожный транспорт в России является крупным потребителем топливно-энергетических ресурсов (ТЭР). Потребление электрической энергии в ОАО «РЖД» составляет около 4,8 % от объема выработки в России, дизельного топлива – 3,4 % от объема производства, мазута и угля – по 0,5 % от объема производства и потребления соответственно, природного газа – 0,1 % от объема потребления. Доля затрат на ТЭР в общих эксплуатационных расходах ОАО «РЖД» стабильно высокая – примерно 19 %. При этом около 85 % затрат приходится на тягу поездов и 15 % – на нетяговые нужды [1].

Задача повышения показателей энергетической эффективности основных бизнес-процессов ОАО «РЖД», в том числе за счет совершенствования научных и методологических принципов организации ресурсосберегающих производственных систем на железнодорожном транспорте, отражена в Энергетической стратегии ОАО «РЖД» на период до 2010 г. и на перспективу до 2030 г. [2]. Стратегии развития железнодорожного транспорта в Российской Фе-

дерации до 2030 г. [3], Транспортной стратегии Российской Федерации на период до 2030 г. [4] и в других распорядительных документах железнодорожной отрасли (см. [5–14]).

Цель данной работы – повышение показателей энергетической эффективности производственных процессов железнодорожного транспорта за счет внедрения альтернативного источника электрической энергии для питания собственных нужд тяговых подстанций дистанции электроснабжения. Для оценки возможности применения возобновляемого источника энергии выбрана тяговая подстанция ЭЧЭ-20 «Броневая» Балтийской дистанции электроснабжения Октябрьской дирекции инфраструктуры.

Применение альтернативной энергетики на железных дорогах

Альтернативная энергетика используется на железных дорогах, несмотря на то, что они относятся к наиболее экологически эффективным видам транспорта в мире.

Россия является одним из лидеров по протяженности железнодорожных путей, из которых более 40 000 км электрифицированы. С целью снижения потребления электроэнергии и улучшения экологии необходимо повсеместное внедрение альтернативных источников энергии на железных дорогах. Эксплуатация существующих систем, основанных на ВИЭ, хорошо себя зарекомендовала на железнодорожном транспорте России.

В настоящее время на отечественных железных дорогах альтернативная энергетика представлена:

– гибридной солнечной электростанцией на базе фотоэлектрических модулей на крыше здания вокзала Анапы. Солнечные модули установлены на 800 м^2 кровли крыши вокзала, а мощность солнечной электростанции составляет 70 кВт;

– комбинированной электростанцией, оборудованной солнечными панелями и ветрогенераторами, на железнодорожной станции Мысовая в Республике Бурятия;

– сетевой солнечной электростанцией на станции Светлоград Северо-Кавказской железной дороги;

– рельсосмазывателями, оснащенными солнечными панелями;

– геотермальным обогревом постов электрической централизации, вокзалов станций, а также стрелочных переводов.

Применение альтернативных источников энергии для питания собственных нужд тяговой подстанции ЭЧЭ-20 «Броневая»

Тяговая подстанция ЭЧЭ-20 «Броневая» расположена в Московском районе Санкт-Петербурга между Балтийским вокзалом и железнодорожной станцией «Броневая».

В табл. 1 представлены потребители собственных нужд шкафов № 19 и 25, указана их мощность.

Среднемесячный расход электроэнергии на собственные нужды составляет 10 713 кВт·ч. При этом расход электроэнергии максимален в зимний период и минимален в летний. Повышенный расход электроэнергии зимой связан с потребностью в обогреве помещений тяговых подстанций, выключателей и ячеек управления, а также с уменьшением светового дня и потребности продолжительного использования освещения – среднемесячный расход на устройства сигнализации, централизации и блокировки – 17 026 кВт·ч.

В качестве альтернативного источника для питания собственных нужд тяговой подстанции «Броневая» выбрана солнечная электростанция.

Так как питание собственных нужд тяговой подстанции изначально предусматривает резерв, то нет необходимости в автономности питания от альтернативного источника электрической энергии. Поэтому проектируемая солнечная электростанция будет сетевого типа. Это

ТАБЛИЦА 1. Потребители отходящих фидеров шкафов СН № 19 и 25

Потребитель	Потребляемая мощность, кВт
Шкаф СН № 19	
Обдув понизительных (тяговых) трансформаторов	17,8
Аварийное освещение подстанции	2
Отопление помещения аккумуляторной подстанции	4
Питание шкафа постоянного тока	10
Подогрев приводов выключателей ОРУ 110 кВ	5
Подогрев приводов разъединителей ОРУ-110 кВ	2
Питание двигателей разъединителей ОРУ-110 кВ	6
Подогрев приводов выключателей ВГТ-110 ОРУ-110 кВ	5
Питание двигателей приводов выключателей ВГТ-110 ОРУ-110 кВ	3
Питание приводов линейных разъединителей	0,6
Питание аппаратуры управления приводами секционных разъединителей	1
Подогрев приводов секционных разъединителей	1
Питание пожарной и охранной сигнализационных установок	0,5
Питание аппаратуры ЭДС и ПС	0,5
Питание АЗФИ	1
Суммарная мощность потребителей	59,4
Шкаф СН № 25	
Насос для откачки воды	10
Отопление машинного зала	50
Отопление щитовой подстанции	15
Подогрев заслонки	2,5
Управление приводами заслонки вентилятора	0,5
Отопление вспомогательных помещений	20
Питание приточно-вытяжной вентиляции	2
Подогрев выключателей ОРУ-27,5 кВ	6
Подогрев шкафов зажимов	10
Освещение территории подстанции	22
Освещение здания подстанции	10
Питание шкафа РПН	0,75
Суммарная мощность потребителей	148,75

Примечание: ОРУ – открытое распределительное устройство, ВГТ – выключатель газовый колонковый, ЭДС – энергодиспетчерская связь, ПС – постанционная связь, АЗФИ – интегральные микросхемы защитной аппаратуры, РПН – устройство регулирования под нагрузкой.

позволит частично или полностью замещать потребление электрической энергии из внешней электросети. К тому же в сетевой электростанции отсутствуют аккумуляторы, благодаря чему коэффициент полезного действия всей системы гораздо выше, чем у автономной солнечной электростанции с аккумуляторными батареями, а стоимость самой установки ниже.

Солнечными модулями для электростанции служат модули HVL-290/HJT мощностью 290 Вт.

Инвертор для солнечной электростанции выбирается с тем условием, что его выходное напряжение должно составлять 380 В для питания шин СН. Отличным решением станет сетевой солнечный трехфазный инвертор SOFAR 40000TL со встроенными контроллерами MPPT. Также в комплект оборудования солнечной электростанции входят:

– комплект для крепления трех солнечных модулей;

– устройство защит от импульсных перенапряжений (УЗИП) постоянного тока;

– автомат защиты постоянного тока;

– УЗИП переменного тока;

– коннектор MC430A;

– кабель солнечный сечением 4 мм^2.

Солнечные модули электростанции будут располагаться на крыше здания тяговой подстанции, для чего используются специально для этого предназначенные комплекты крепления (рис. 1).

Ряды солнечных модулей рекомендуется размещать друг за другом на расстоянии в 1,6 раз больше, чем их высота (рис. 2). Тогда, учитывая размеры крыши здания тяговой подстанции, возможна установка 48 рядов солнечных панелей по три модуля в каждом ряду.

При последовательной схеме соединения солнечные модули соединяются друг с другом разными полюсами, а полюса «+» и «–» крайних панелей из блока подключаются к инвертору. Схема подключения к инвертору 8 блоков по 18 панелей изображена на рис. 3, полная схема солнечной электростанции с подключением к внешней сети – на рис. 4.

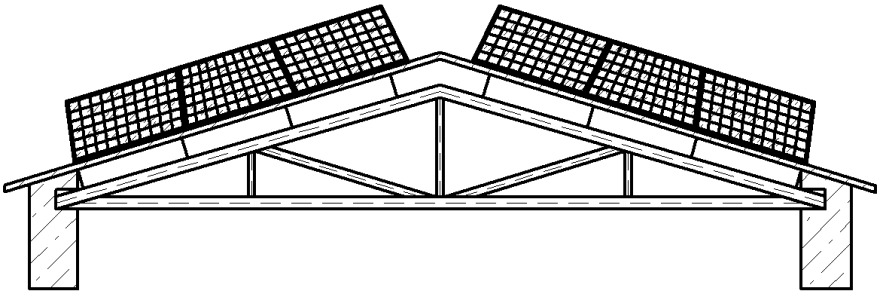


Рис. 1. Схема расположения солнечных модулей на крыше (с торца)

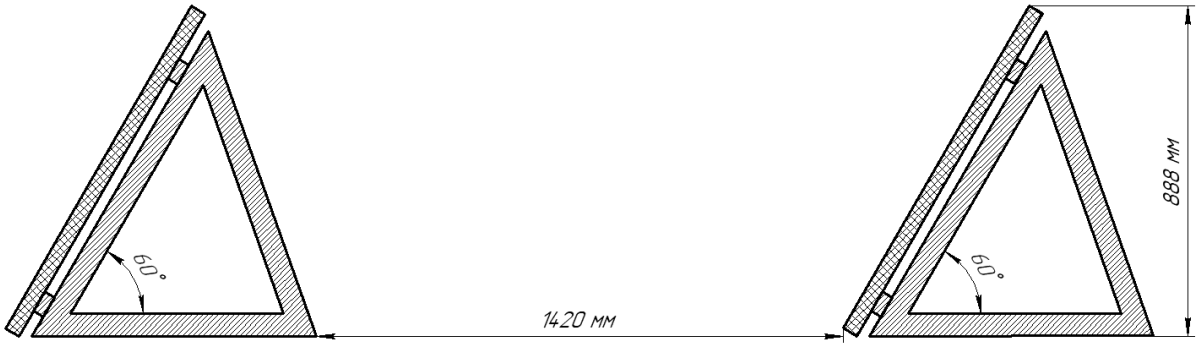


Рис. 2. Расположение рядов солнечных модулей

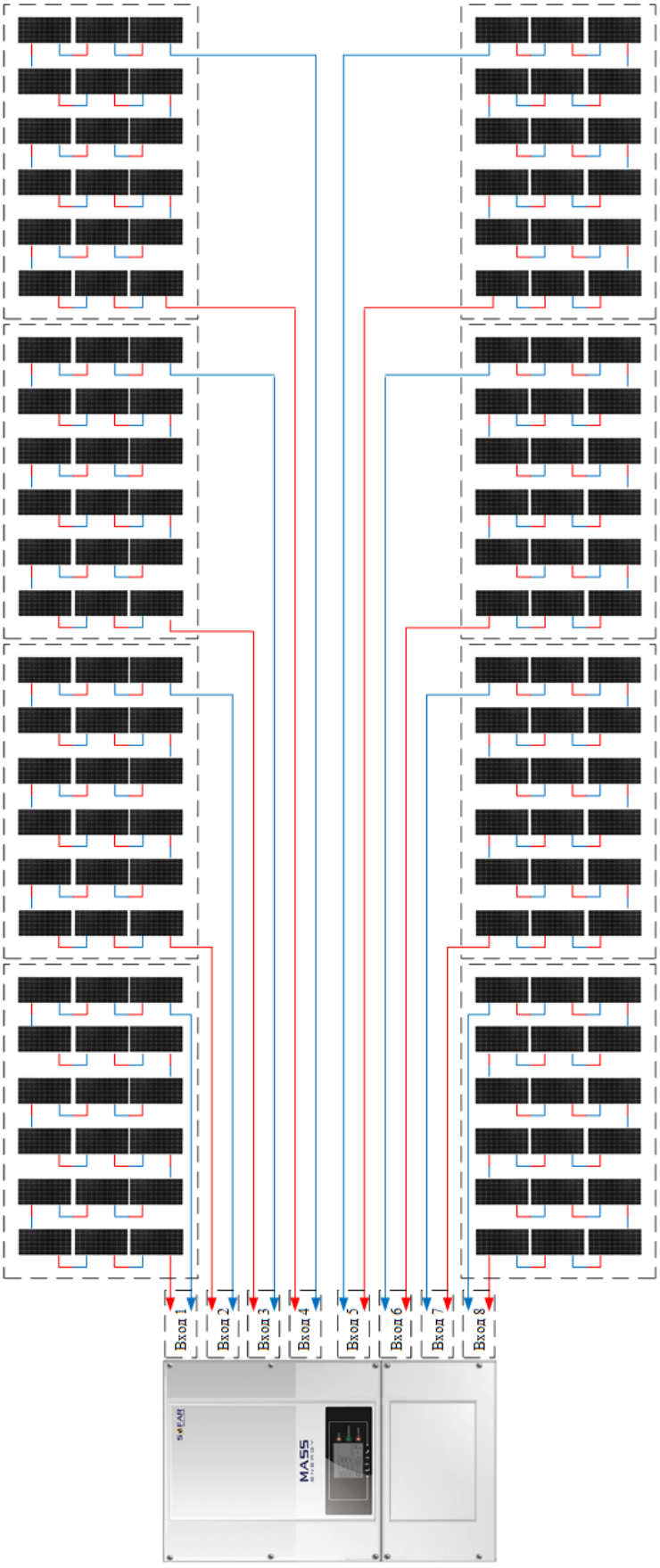


Рис. 3. Схема подключения к инвертору 8 блоков по 18 солнечных панелей

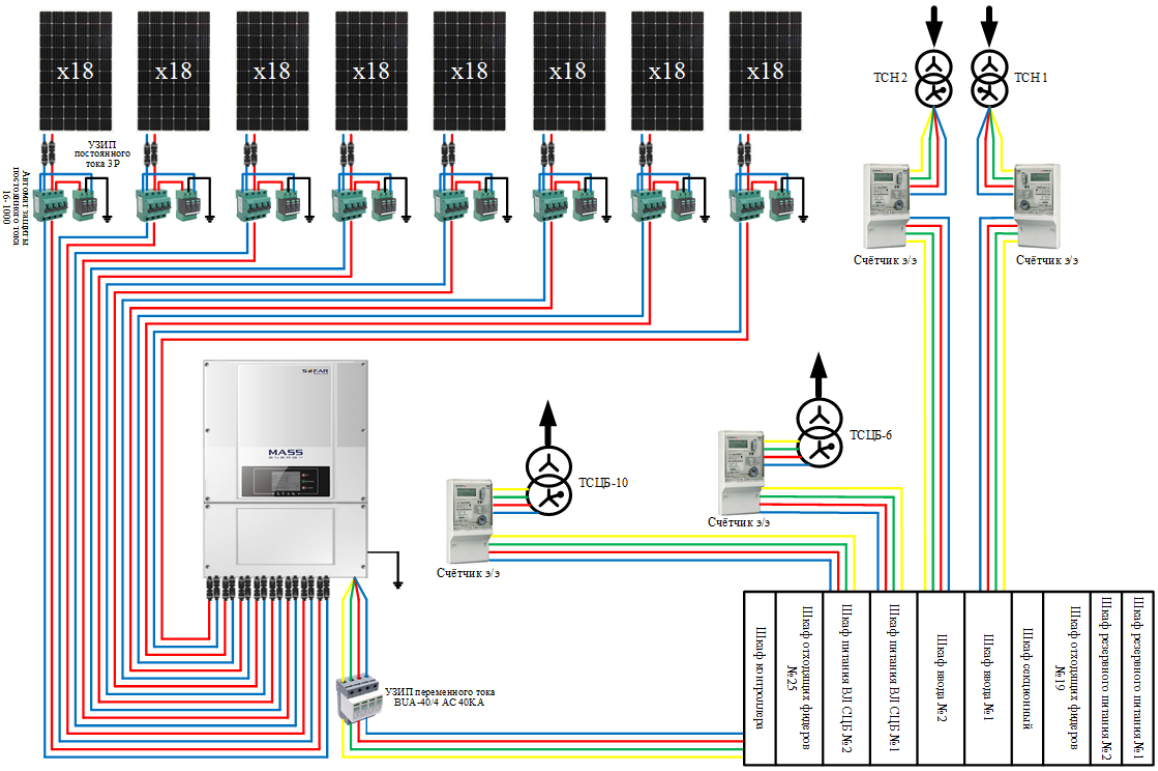


Рис. 4. Полная схема солнечной электростанции с подключением к внешней сети

Выработка электрической энергии от солнечных панелей производится с помощью online-калькулятора на сайте компании «RealSolar» [5]. Результаты online-расчета выработки электроэнергии от солнечной электростанции мощностью 41 760 Вт в условиях Санкт-Петербурга сведены в табл. 2. Из нее следует, что среднегодовая выработка электроэнергии от этой электростанции составит 48 820 кВт·ч.

График выработки электроэнергии изображен на рис. 5.

Видно, что спроектированный альтернативный источник электрической энергии в виде солнечной электростанции мощностью 41 760 Вт имеет выработку 48 820 кВт·ч в среднем за год. При этом максимальная выработка за месяц наблюдается в июле (6586,57 кВт·ч), а минимальная – в декабре (1058,03 кВт·ч). Среднемесячная выработка электроэнергии не превышает потребления СН подстанции, а в летний период значения потребления собственных нужд с вычетом СЦБ максимально приближены к величине выработки.

Суммарные капиталовложения в строительство альтернативного источника электрической энергии для питания собственных нужд составят 2 320 886 руб.

Заключение

С целью повышения показателей энергетической эффективности производственных процессов железнодорожного транспорта был спроектирован альтернативный источник электрической энергии в виде сетевой солнечной электростанции из 144 солнечных модулей и трехфазного инвертора для питания собственных нужд тяговой подстанции ЭЧЭ-20 «Броневая» Балтийской дистанции электроснабжения. Местом установки солнечных модулей была выбрана крыша здания подстанции.

Мощность солнечной электростанции составила 41 760 Вт, а прогнозируемая среднегодовая выработка электроэнергии – 48 820 кВт·ч, что в итоге дает 285 743 руб. среднегодовой эконо-

ТАБЛИЦА 2. Выработка электроэнергии от солнечной электростанции

Месяц	Выработка в день (в среднем), кВт·ч	Выработка в месяц (в среднем), кВт·ч
Январь	47,09	1459,79
Февраль	86,83	2518,07
Март	151,3	4690,3
Апрель	181,21	6536,3
Май	196,12	6079,72
Июнь	208,36	6250,8
Июль	212,47	6586,57
Август	184,03	5704,93
Сентябрь	141,7	4251
Октябрь	93,31	2892,61
Ноябрь	63,07	1892,1
Декабрь	34,13	1058,03

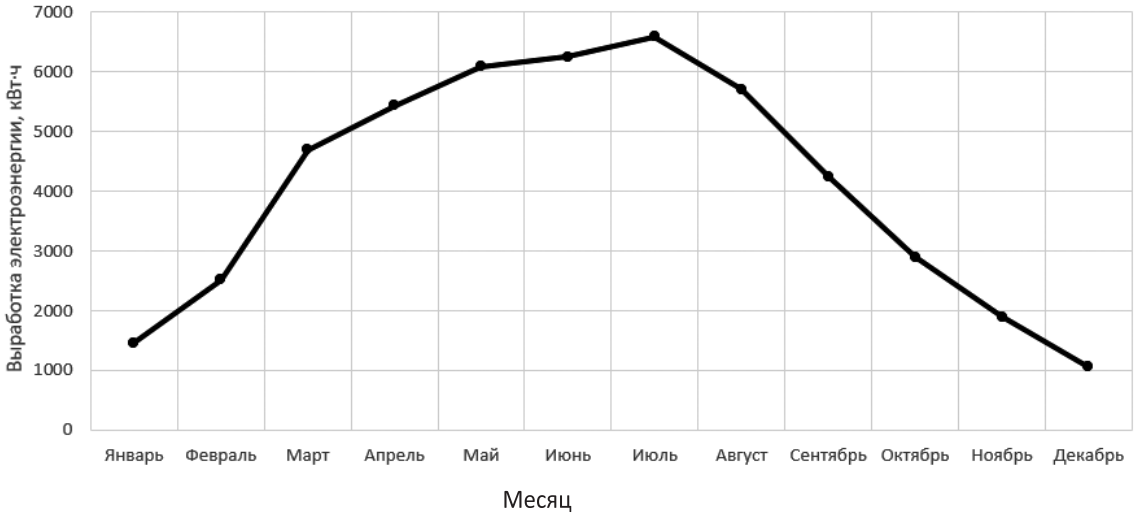


Рис. 5. График выработки электроэнергии от солнечной электростанции

мической эффективности от внедрения альтернативного источника энергии.

Определено, что срок окупаемости капиталовложений на установку солнечной электростанции равен чуть более 8 лет, что при сроке службы таких установок в 25 лет является хорошим показателем.

Библиографический список

1. Энергетическая стратегия ОАО «РЖД» на период до 2010 г. и на перспективу до 2030 г. № 269 р. – М.: ОАО «РЖД», 2008. – 76 с.

2. Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 г. – Утв. Распоряжением Правительства Российской Федерации от 17 июня 2008 г. № 877-р. – URL: http://government.ru/docs/19759 (дата обращения: 15.10.2021).

3. Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 г. – Утв. Распоряжением Правительства Российской Федерации от 22 ноября 2008 г. № 1734р. – URL: https://mintrans.gov.ru/documents/3/109 (дата обращения: 15.10.2021).

4. Гапанович В. А. Энергетическая стратегия и электрификация российских железных дорог / В. А. Гапанович, С. Н. Епифанцев, В. А. Овсейчук; под ред. Г. П. Кутового. – М.: Эко-Пресс, 2012. – 196 с.

5. Ефимов В. В. Требования к оформлению текстовой документации: учеб.-метод. пособие / В. В. Ефимов. – СПб.: ПГУПС, 2014. – 46 с.

6. Комяков А. А. Методология организации ресурсосберегающих производственных систем на железнодорожном транспорте: докт. дисс., специальность: 05.02.22 / А. А. Комяков. – Омск: ОмГУПС, 2020. – 406 с.

7. ГОСТ Р 54531–2011. Нетрадиционные технологии. Возобновляемые и альтернативные источники энергии. – Принят и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 28 ноября 2011 г. № 610-ст. – М.: Федерал. агентство по техн. регулированию и метрологии, 2011. – 54 с.

8. ГОСТ Р 52104–2003. Ресурсосбережение. Термины и определения. – Принят и введен в действие Постановлением Госстандарта России от 3 июля 2003 г. № 235-ст. – М.: Госстандарт РФ, 2003. – 87 с.

9. ГОСТ Р 51594–2000. Нетрадиционная энергетика. Солнечная энергетика. – Принят и введен в действие Постановлением Госстандарта России от 21 апреля 2000 г. № 119-ст. – М.: Госстандарт РФ, 2000. – 64 с.

10. ГОСТ Р 51597–2000. Нетрадиционная энергетика. Модули солнечные фотоэлектрические. – Принят и введен в действие Постановлением Госстандарта России от 21 апреля 2000 г. № 122-ст. – М.: Госстандарт РФ, 2000. – 83 с.

11. Аналитический центр Ember. – URL: http://ember-climate.org (дата обращения: 12.06.2021).

12. Гольденберг В. Возобновляемая энергия на железнодорожном транспорте / В. Гольденберг // Наука и техника. – 2016. – № 982.

13. Гольденберг В. Возобновляемые источники энергии и ее экономия на железнодорожном транспорте. Тенденция развития / В. Гольденберг, Ф. Гольденберг // Бюл. ОСЖД. – 2016. – № 1. – С. 25–36.

14. Пигольцина Г. Б. Ресурсы солнечной радиации Ленинградской области / Г. Б. Пигольцина. Журн. Общество. Среда. Развитие. – СПб.: ООО «Центр науч.-информ. технологий Астерион», 2005. – С. 88–99.

15. Онлайн-калькулятор расчета солнечной электростанции компании «RealSolar» – URL: https://realsolar.ru/on-line-calc/. (дата обращения: 12.06.2021).

Дата поступления: 18.11.2021
Решение о публикации: 22.11.2021

Контактная информация:
ТЕРЁХИН Илья Александрович – канд. техн. наук, доц.; Terekhin@pgups.ru
БАЛАКИН Александр Юрьевич – инженер 1-й категории по эксплуатации контактной сети Балтийской дистанции электроснабжения Октябрьской дирекции по энергообеспечению; alex.balak98@gmail.com

Evaluation of the possibility of using alternative sources of electrical energy to power auxiliaries of traction substations of power supply divisions on the example of ECHE–20 "Bronevaya"

I. A. Terekhin [1], **A. Yu. Balakin** [2]

[1] Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation
[2] Baltic power supply division, Oktyabrskaya Directorate for Power Supply, JSC Russian Railways, 1, pos. Stantsionnyy, Saint Petersburg, 198205, Russian Federation

For citation: Terekhin I. A., Balakin A. Yu. Evaluation of the possibility of using alternative sources of electrical energy to power auxiliaries of traction substations of power supply divisions on the example

of ECHE-20 “Bronevaya”. *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2021, vol. 18, iss. 4, pp. 601–610. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2021-4-601-610

Summary

Objective: To assess the possibility of using alternative sources of electrical energy to power auxiliaries of traction substations of power supply divisions on the example of ECHE-20 “Bronevaya”. **Methods:** Alternative energy is used on the railways. **Results:** Equipment was selected and a solar power plant was designed, economic efficiency from the introduction of an alternative energy source and its payback period were calculated. **Practical importance:** The designed alternative source of electrical energy makes it possible to increase the energy efficiency indicators of production processes of railway transport.

Keywords: Alternative energy, solar energy, traction substations of power supply divisions, railway transport, solar pavement, invector, output of energy.

References

1. *Energeticheskaya strategiya OAO “RZHD” na period do 2010 g. i na perspektivu do 2030 g. no. 269r.* [*Energy strategy of Russian Railways for the period up to 2010 and for the long term up to 2030 N 269r*]. Moscow, OAO “RZHD” [JSC “Russian Railways”] Publ., 2008, 76 p. (In Russian)

2. *Strategiya razvitiya zheleznodorozhnogo transporta v Rossiyskoy Federatsii do 2030 g.* Utv. rasporyazheniyem Pravitel’stva Rossiyskoy Federatsii ot 17 iyunya 2008 g. no. 877-r [*Strategy for the development of railway transport in the Russian Federation until 2030.* Appr. by order of the Government of the Russian Federation of June 17, 2008 N 877-r]. Available at: http://government.ru/docs/19759 (accessed: October 15, 2021). (In Russian)

3. *Transportnaya strategiya Rossiyskoy Federatsii na period do 2030 g.* Utv. rasporyazheniyem Pravitel’stva Rossiyskoy Federatsii ot 22 noyabrya 2008 g. no. 1734-r [*Transport strategy of the Russian Federation for the period up to 2030.* Appr. by order of the Government of the Russian Federation of November 22, 2008 N 1734-r]. Available at: https://mintrans.gov.ru/documents/3/109 (accessed: October 15, 2021). (In Russian)

4. Gapanovich V.A., Epifantsev S.N. & Ovseichuk V.A. *Energeticheskaya strategiya i elektrifikatsiya rossiyskikh zheleznykh dorog* [*Energy strategy and electrification of Russian railways*]. Ed. by G.P. Kutovoy. Moscow, Eco-Press Publ., 2012, 196 p. (In Russian)

5. Efimov V.V. *Trebovaniya k oformleniyu tekstovoy dokumentatsii.* Uchebno-metodicheskoye posobiye [*Requirements for the design of text documentation.* Study guide]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2014, 46 p. (In Russian)

6. Komyakov A.A. *Metodologiya organizatsii resursosberegayushchikh proizvodstvennykh sistem na zheleznodorozhnom transporte* [*Methodology of organizing resource-saving production systems in railway transport*]. D. Sci. in Engineering dissertation. Omsk, OmGUPS [Omsk State Transport University] Publ., 2020, 406 p. (In Russian)

7. *GOST R 54531–2011. Netraditsionnyye tekhnologii. Vozobnovlyayemyye i al’ternativnyye istochniki energii*. Prinyat i vveden v deystviye Prikazom Federal’nogo agentstva po tekhnicheskomu regulirovaniyu i metrologii ot 28 noyabrya 2011 g. no. 610-st [*GOST R 54531–2011. Unconventional technologies. Renewable and alternative energy sources*. Adopted and put into effect by the Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology dated November 28, 2011 N 610-st]. Moscow, Federal’noye agentstvo po tekhnicheskomu zegulirovaniyu i metrologii [Federal Agency for Technical Regulation and Metrology] Publ., 2011, 54 p. (In Russian)

8. *GOST R 52104–2003. Resursosberezheniye. Terminy i opredeleniya*. Prinyat i vveden v deystviye Postanovleniyem Gosstandarta Rossii ot 03 iyulya 2003 g. no. 235-st [*GOST R 52104–2003. Resource saving. Terms and Definitions*. Adopted and put into effect by the Resolution of the Gosstandart of Russia dated July 03, 2003 N 235-st]. Moscow, Gosstandart RF Publ., 2003, 87 p. (In Russian)

9. *GOST R 51594–2000. Netraditsionnaya energetika. Solnechnaya energetika*. Prinyat i vveden v deystviye Postanovleniyem Gosstandarta Rossii ot 21 aprelya 2000 g. no. 119-st [*GOST R 51594–2000. Unconventional*

energy. Solar energy. Adopted and put into effect by the Resolution of the Gosstandart of Russia dated April 21, 2000 N 119-st]. Moscow, Gosstandart RF Publ., 2000, 64 p. (In Russian)

10. *GOST R 51597–2000. Netraditsionnaya energetika. Moduli solnechnyye fotoelektricheskiye*. Prinyat i vveden v deystviye postanovleniyem Gosstandarta Rossii ot 21 aprelya 2000 g. no. 122-st [*GOST R 51597–2000. Unconventional energy. Solar photovoltaic modules*. Adopted and put into effect by the Resolution of the Gosstandart of Russia dated April 21, 2000 N 122-st]. Moscow, Gosstandart RF Publ., 2000, 83 p. (In Russian)

11. *Analiticheskiy tsentr Ember* [*Ember Analytical Centre*]. Available at: http://ember-climate.org/ (accessed: June 12, 2021) (In Russian)

12. Goldenberg V. Vozobnovlyayemaya energiya na zheleznodorozhnom transporte [Renewable energy in railway transport]. *Nauka i tekhnika* [*Science and technology*], 2016, no. 982 (In Russian)

13. Goldenberg V. & Goldenberg F. Vozobnovlyayemyye istochniki energii i yeye ekonomiya na zheleznodorozhnom transporte. Tendentsiya razvitiya [Renewable energy sources and its economy in railway transport. Development trend]. *Byulleten OSZhD* [*Bulletin of OSJD (Organization for Cooperation between Railways)*], 2016, no. 1, pp. 25–36. (In Russian)

14. Pigoltsina G. B. Resursy solnechnoy radiatsii Leningradskoy oblasti [Resources of solar radiation of Leningrad region]. Journal "Society. Environment. Development". Saint Petersburg, OOO "Centre of scientific and information technologies Asterion" Publ., 2005, pp. 88–99. (In Russian)

15. *Onlayn-kal'kulyator rascheta solnechnoy elektrostantsii kompanii "RealSolar"* [*Online calculator for calculating a solar power plant company "RealSolar"*]. Available at: https://realsolar.ru/on-line-calc/ (accessed: June 12, 2021). (In Russian)

Received: November 18, 2021
Accepted: November 22, 2021

Author's information:
Iliya A. TEREKHIN – PhD in Engineering, Associate Professor; Terekhin@pgups.ru
Alexander Yu. BALAKIN – category 1 Engineer for the operation of the overhead system of the Baltic Power Supply Division Oktyabrskaya Directorate for Power Supply; alex.balak98@gmail.com

СОДЕРЖАНИЕ ЖУРНАЛА «ИЗВЕСТИЯ ПГУПС» ЗА 2021 ГОД

ПРОБЛЕМАТИКА ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

А. А. Воробьев, А. М. Будюкин, В. Г. Кондратенко. Анализ современных технических решений, применяемых в конструкциях низкопольных трамвайных вагонов	18, 1	7–15
А. Б. Гайипов. Влияние погрешностей и ошибок измерения на частоту отцепок вагонов во внеплановый ремонт на железных дорогах Республики Узбекистан	18,4	507–514
А. Б. Гайипов, Е. А. Наркизова, Т. М. Белгородцева. Разработка уточненной методики расчета баланса колесных пар и оценка потребности в колесах и осях для вагонного парка Республики Узбекистан	18,3	319–334
В. В. Галов, В. А. Башмаков, А. В. Григорьев. Оценка ресурса при соударении вагонов-цистерн современных конструкций производства АО «Рузхиммаш»	18,2	159–168
К. Е. Ковалев, А. В. Новичихин. Развитие научно-технических основ повышения эффективности функционирования транспортной системы при взаимодействии интенсивных и малодеятельных линий	18,2	169–176
В. В. Костенко, Д. Е. Богданович. О внесении изменений в расчетные формулы потребного числа приемоотправочных путей в парках технических станций	18,1	16–24
С. В. Кротов, Д. П. Кононов, Е. В. Пакулина. Напряженное состояние в контакте колеса и рельса при наличии скольжения и сцепления	18,2	177–187
М. Ю. Обухов, Н. П. Калинин. Снижение затрат на топливно-энергетические ресурсы за счет использования гибридного моторвагонного подвижного состава	18,1	25–33
О. Д. Покровская. Особенности продвижения блок-трейн и контейнерных поездов по терминальной сети Санкт-Петербургского узла	18,1	34–51
О. Д. Покровская, А. В. Сугоровский, И. В. Рыбакова, М. А. Марченко, М. В. Шевердова. Особенности организации работы станции и железнодорожного вокзального комплекса при пуске «Аэроэкспресса»	18,4	515–527
А. В. Саидова, В. И. Федорова, Ю. Б. Житков, И. В. Федоров, А. Н. Гришаев. Оценка износа колес грузовых вагонов при существующих нормативах выпуска трехэлементных тележек с осевой нагрузкой 23,5 тс из ремонта	18,1	52–61

В. Н. Смирнов, А. В. Ланг, Н. А. Лабутин. Влияние неровностей пути на вертикальные ускорения вагонов при высокоскоростном движении поездов по мосту 18,3 335–339

А. Г. Филиппов, С. С. Смирнов, Д. В. Язев, И. П. Александров. Определение потребных размеров движения пригородных поездов с учетом суточной и внутрисуточной неравномерностей распределения пассажиропотока 18,4 528–536

В. В. Широкова, Н. А. Кузьмина, Г. В. Санькова. Исследование влияния пропуска тяжеловесных поездов на пропускную и провозную способности железнодорожных участков 18,4 537–545

Т. М. Шманёв, В. И. Ульяницкая, М. С. Пухова. Повышение эффективности работы в пассажирском комплексе Октябрьской железной дороги за счет использования алгоритма принятия решений с помощью аналитических инструментов качества 18,2 188–200

Т. М. Шманёв, В. И. Ульяницкая, М. С. Пухова, П. С. Панов, А. Ю. Ситников. Условия соответствия требованиям обеспечения доступности транспортных объектов ОАО «РЖД» через промежуточные решения и принятие компенсирующих мер обслуживания для маломобильных групп населения, в том числе инвалидов 18,3 340–352

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ – ТРАНСПОРТУ

А. Г. Андриевский, Е. А. Чабан, В. В. Москвичев. Анализ нагруженности кожуха зубчатой передачи электровоза при условии ослабления затяжки болтов его крепления к тяговому двигателю 18,2 201–210

Ю. П. Бороненко, О. Д. Покровская, Т. С. Титова, Д. В. Шевченко. Результаты маркетингового исследования опций «умной» скоростной платформы 18,3 353–376

М. Я. Брынь, Д. Р. Баширова, А. Г. Багишян. Сравнительная оценка мобильного лазерного сканирования, аэрофотосъемки с беспилотной авиационной системы и съемки с комплексной дорожной лаборатории при выполнении диагностики автомобильных дорог 18,2 211–221

В. П. Быков, В. В. Быков, Г. И. Тихомиров. Междисциплинарность и концептуализация в учебном процессе на кафедре «Подъемно-транспортные, путевые и строительные машины» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I 18,3 377–384

А. А. Воробьев, Я. С. Ватулин, Д. Д. угли Каримов. Воздействие воздушного потока на аэродинамическое устройство для пантографа	18,4	453–459
Г. М. Грошев, А. Г. Котенко, Н. В. Климова, Н. Б. Федорова. Исследование характера процесса доставки партии контейнеров с тылового терминала в порт	18,3	385–392
Д. Ю. Дроголов, П. В. Соколов, А. С. Кушнирук. Оптимизация норм межремонтных пробегов тяговых электродвигателей локомотивов на основе результатов исследования распределения отказов на полигоне Дальневосточной железной дороги	18,3	393–401
О. И. Зайнитдинов. Конструирование съемного кузова с раздвигающимися боковыми стенами и крышей	18,1	62–71
И. Г. Киселев, Д. Н. Курилкин, М. А. Шрайбер. Тепловая модель асинхронного тягового электродвигателя тепловоза	18,4	460–468
А. Ф. Колос, К. И. Иванова. Упругие характеристики подрельсового основания безбалластного железнодорожного пути	18,4	468–479
А. М. Костроминов, Р. О. Ложкин. Влияние геоиндуцированных токов на дроссель-трансформаторы рельсовых цепей железнодорожной автоматики	18,2	222–228
А. Т. угли Лесов, В. О. Иващенко. Энергооптимизация режимов движения поезда на языке программы C#	18,4	480–490
В. Л. Лукичева, А. А. Привалов, Д. Д. Титов. Модель процесса доставки пакетов по каналу передачи данных в условиях компьютерных атак нарушителя	18,2	229–241
Г. И. Никифорова. Исследование логистической цепи доставки груза в условиях выбора транспортно-экспедиторской компании	18,4	491–498
Е. Я. Полякова, Б. О. Поляков, С. И. Дубинский. К вопросу об обледенении железнодорожного подвижного состава в условиях эксплуатации северного широтного хода	18,1	72–79
Д. И. Прохор, Н. В. Грачев. Оценка ресурса и характеристик изоляции тяговых двигателей локомотивов методом ускоренного теплового старения	18,1	80–94
В. Н. Смирнов, Л. К. Дьяченко. Предложения по проектированию пролётных строений мостовых сооружений эстакадного типа с учетом резонансных явлений на высокоскоростной магистрали Москва – Петербург	18,2	242–250

А. Е. Цаплин, Ж. О. Кувондиков. Анализ надежности узлов подвижного состава на основе эксплуатационных данных 18,2 251–260

А. И. Чудаков, В. О. Иващенко, А. П. Зеленченко, Н. В. Лысов. Оптимизация систем управления пригородных электропоездов 18,4 499–506

ОБЩЕТЕХНИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

Л. С. Блажко, А. А. Киселев, И. П. Киселев, А. В. Романов. О влиянии эквивалентной конусности колесной пары на напряженно-деформированное состояние рельса 18,2 261–272

Ю. П. Бороненко, О. И. Зайнитдинов. Выбор и анализ конструктивных решений основания съемного кузова 18,2 273–282

Ю. П. Бороненко, О. Д. Покровская, Т. С. Титова, Л. В. Цыганская, Д. Г. Бейн, С. В. Кондратенко. Анализ технических решений вагона-паллетовоза 18,1 95–120

Е. А. Буквина, Е. В. Зверева, Е. В. Фалеева, Р. А. Ешенко. Разработка методов обеспечения информационной безопасности децентрализованных баз данных 18,2 283–293

П. В. Великоруссов, М. М. Воронина, М. М. Шевченко. К истории вопроса проверки знаний обучающихся на примере Института инженеров путей сообщения 18,4 546–553

А. А. Воробьев, И. В. Федоров, Э. Ю. Чистяков, Т. Р. Абдуганиев, А. Е. Глухов. Расчет назначенного срока службы цельнокатаных колес железнодорожного подвижного состава по критерию надежности 18,1 121–131

П. В. Герасименко. Алгоритмы модифицированных индексов Хирша для формирования рейтингов преподавателей вуза по числу публикаций и их цитированиям 18,3 402–409

А. П. Зеленченко, А. А. Богдан, М. Ш. Шадмонходжаев. Источник питания для позиции безразборной диагностики подшипников 18,4 554–560

В. Н. Кавказский, Я. В. Мельник, А. П. Лейкин, А. В. Бенин, В. В. Бондаренко. Оценка технического состояния подземных сооружений крупнейшей гидроэлектростанции Северного Кавказа Чиркейской ГЭС 18,3 410–420

М. С. Коровина, С. К. Коровин. Распределенная система многопараметрического ежедневного контроля технического состояния рабочего оборудования мобильных подъемников с рабочими платформами мачтового типа 18,2 294–302

Е. К. Коровяковский, М. Б. Сабуров, Ш. Х. Султонов. Оценка факторов, влияющих на экспортный потенциал Республики Узбекистан	18,1	132–142
Ю. В. Креселюк. Анализ проблем механических редукторов транспортных систем и их решение с помощью магнитного датчика	18,4	561–570
В. А. Кручек, А. А. Горбачев, Р. А. Иванов. Методика диагностирования дизельных двигателей автомобильной техники по параметрам акустического сигнала	18,4	571–577
О. А. Продоус, Л. Д. Терехов, П. П. Якубчик, А. С. Черных. Техническое регулирование значений гидравлических параметров неновых металлических труб для продления периода их использования	18,3	421–427
В. И. Смирнов, Т. А. Кнопова, С. С. Майер. Некоторые проблемы оценки динамической трещиностойкости конструкционных сталей	18,3	428–435
В. В. Соляник. Совершенствование методики планирования работы сортировочной системы	18,3	436–446
Тан Чжуншэн. Проблемы безопасности, существующие в строительной отрасли Китая	18,1	143–152
И. А. Терёхин, А. Ю. Балакин. Оценка возможности применения альтернативных источников электрической энергии для питания собственных нужд тяговых подстанций дистанции электроснабжения на примере ЭЧЭ-20 «Броневая»	18,4	601–610
О. Н. Числов, Д. С. Безусов. Принципы теории нечетких множеств в формализации инфраструктурно-технологического взаимодействия припортовой железнодорожной транспортной системы	18,4	578–590
Т. М. Шманёв, В. И. Ульяницкая, И. В. Ванюшин, М. С. Пухова, А. Ю. Ситников. Пути повышения эффективности капитальных вложений в инфраструктуру с целью ее адаптации для обеспечения доступной среды	18,4	591–600
В. И. Штыков, А. Б. Пономарев, Ю. Г. Янко. О расчете размывающих скоростей при проектировании фильтрующих сооружений в связных грунтах	18,2	303–312