



ISSN 2223 – 9731 (Print)
ISSN 2713 – 2560 (Online)



ВЕСТНИК НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ИНСТИТУТА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА RUSSIAN RAILWAY SCIENCE JOURNAL

Том 83, №3. 2024

ISSN 2223-9731 (Print)

ISSN 2713-2560 (Online)

ВЕСТНИК
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ИНСТИТУТА
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА
(ВЕСТНИК ВНИИЖТ)

RUSSIAN RAILWAY SCIENCE JOURNAL
(VESTNIK VNIIZHT)

ТОМ 83, № 3. 2024

Учредитель:
АО «Научно-исследовательский
институт железнодорожного транспорта»

Адрес учредителя и редакции:
129626, Российская Федерация,
Москва, 3-я Мытищинская ул., 10
Тел.: +7 (495) 602-80-37, 602-81-10

Издатель:
Издательский дом «ИПП «КУНА»,
125167, Российская Федерация,
Москва, Ленинградский пр., д. 47, стр. 4
Тел. +7 (495) 795-02-97

Издается с 1942 г.
Периодичность: 4 номера в год
Подписной индекс: 70116
Свидетельство о регистрации
ПИ № ФС77-83067 от 11.04.2022

Founder:
Railway Research Institute

Founder and editorial address:
10, 3rd Mytishchinskaya St., Moscow, 129626,
Russian Federation
Tel.: +7 (495) 602 8037, 602 8110

Publisher:
JSC "IPP "KUNA",
47, bldg. 4, Leningradskiy Ave., Moscow, 125167,
Russian Federation. Tel.: +7 (495) 795 0297

Published since 1942
Periodicity: Quarterly
Subscription index: 70116
Registration Certificate
PI No. FS77-83067. 11.04.2022

www.journal-vniizht.ru
journal@vniizht.ru

© АО «ВНИИЖТ», 2024

Цель журнала «Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта» — публикация результатов передовых научных исследований в области совершенствования транспортных, информационных технологий и технических средств железнодорожного транспорта. Журнал адресован исследователям, аналитикам и практикам железнодорожной и машиностроительной отраслей, а также широкому кругу читателей, интересующихся проблемами развития железнодорожного транспорта.

Научный рецензируемый журнал «Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта» публикует оригинальные научные статьи, ранее не публиковавшиеся в других изданиях.

Журнал предоставляет открытый доступ к полным текстам публикаций, исходя из следующего принципа: открытый доступ к результатам исследований способствует увеличению глобального обмена знаниями.

«Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта» входит в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук по научным специальностям и соответствующим им отраслям науки:

- 2.5.2. Машиноведение (технические науки)
- 2.5.3. Трение и износ в машинах (технические науки)
- 2.6.1. Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов (технические науки)
- 2.6.17. Материаловедение (технические науки)
- 2.9.2. Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог (технические науки)
- 2.9.3. Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация (технические науки)
- 2.9.4. Управление процессами перевозок (технические науки)

ЖУРНАЛ ИНДЕКСИРУЕТСЯ И АРХИВИРУЕТСЯ В:

Российском индексе научного цитирования (РИНЦ)



Международной справочно-библиографической системе EBSCO



Китайской платформе наукометрических данных Baidu



Китайской платформе наукометрических данных
China National Knowledge Infrastructure



Международной реферативной базе Ulrichsweb Global Serials Directory



Международной базе открытых публикаций Google Академия



Международной электронно-библиотечной системе The European Library



Электронном каталоге научно-технической литературы ВИНТИ РАН



Международной базе Dimensions



ЖУРНАЛ ЯВЛЯЕТСЯ ЧЛЕНОМ

Директории журналов открытого доступа (DOAJ)



Агентства регистрации цифровых идентификаторов (CrossRef)



Материалы журнала доступны по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License



Право на оригинал-макет и оформление принадлежит учредителю журнала, авторское право на статьи – авторам

The aim of the Russian Railway Science Journal is to publish the results of research insights in the field of improving transport and information technologies and technical means of railway transport. The journal is addressed to researchers, analysts and practitioners of the railway and engineering industries, as well as to a wide range of readers interested in the problems of railway transport development.

The scientific peer-reviewed Russian Railway Science Journal publishes original scientific articles, which have not been previously published.

The journal provides direct open access to full text issues — open access to research results contributes to the increase of global knowledge sharing.

The Russian Railway Science Journal is included in the List of peer-reviewed scientific journals published by the Attestation Commission in which major research results from dissertations of Candidate of Science and Doctor of Science degrees are to be published. Scientific specialties and corresponding branches of science are:

- 2.5.2. Machine science (technical sciences)
- 2.5.3. Friction and wear in machines (technical sciences)
- 2.6.1. Metal science and heat treatment of metals and alloys (technical sciences)
- 2.6.17. Materials science (technical sciences)
- 2.9.2. Railway track, survey and design of railways (technical sciences)
- 2.9.3. Railway rolling stock, train traction and electrification (technical sciences)
- 2.9.4. Transportation process management (technical sciences)

THE JOURNAL IS INDEXED AND ARCHIVED IN:

Russian Science Citation Index



EBSCO Information Services



Baidu



China National Knowledge Infrastructure (CNKI)



Ulrichsweb Global Serials Directory



Google Scholar



The European Library



Russian Institute for Scientific and Technical Information (VINITI RAS)



Dimensions



THE JOURNAL IS A MEMBER OF

the Directory of Open Access Journals (DOAJ)



the Digital Object Identifier Registration Agency (CrossRef)



Journal materials are available under the Creative Commons Attribution 4.0 License



The right to the original layout and design belongs to the founder of the journal, the right of authorship to the articles belongs to the authors

Главный редактор

Косарев Александр Борисович, д-р техн. наук, проф., первый заместитель генерального директора АО «ВНИИЖТ», Москва, Российская Федерация, Author ID: 352781, <https://orcid.org/0000-0001-9684-036X>

Заместитель главного редактора

Карасев Михаил Николаевич, канд. юрид. наук, директор научно-образовательного центра, АО «ВНИИЖТ», Москва, Российская Федерация, Author ID: 337912, <https://orcid.org/0009-0008-5190-409X>

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Абдурахманов Одил Каландарович, д-р экон. наук, проф., ректор, Ташкентский государственный транспортный университет, Ташкент, Узбекистан, Author ID: 813993, <https://orcid.org/0009-0008-8033-4153>

Бессоненко Сергей Анатольевич, д-р техн. наук, доцент, СГУПС, Новосибирск, Российская Федерация, Author ID: 719058, <https://orcid.org/0000-0001-5782-1596>

Верескун Владимир Дмитриевич, д-р техн. наук, проф., ректор, РГУПС, Ростов-на-Дону, Российская Федерация, Author ID: 513710, <https://orcid.org/0000-0002-9547-8167>

Глюзберг Борис Эйнович, д-р техн. наук, проф., АО «ВНИИЖТ», Москва, Российская Федерация, Author ID: 298472, <https://orcid.org/0000-0003-2430-7894>

Гуламов Абдулазиз Абдуллаевич, д-р экон. наук, проф., проректор по учебной работе, Ташкентский государственный транспортный университет, Ташкент, Узбекистан, Author ID: 583321, <https://orcid.org/0000-0002-4702-7468>

Дунаев Олег Николаевич, д-р экон. наук, проф., МГИМО, Москва, Российская Федерация, Author ID: 315899, <https://orcid.org/0000-0002-0593-1029>

Ерофеев Михаил Николаевич, д-р техн. наук, проф., ИМАШ РАН, Москва, Российская Федерация, Author ID: 836604, <https://orcid.org/0000-0002-1048-3574>

Захаров Сергей Михайлович, д-р техн. наук, проф., АО «ВНИИЖТ», Москва, Российская Федерация, Author ID: 731500, <https://orcid.org/0000-0003-0077-8376>

Кудрявцев Сергей Анатольевич, член-корреспондент РААСН, д-р техн. наук, проф., ДВГУПС, Хабаровск, Российская Федерация, Author ID: 614674, <https://orcid.org/0000-0001-9438-5033>

Куммер Себастьян, д-р экономики, проф., Венский экономический университет, Институт транспорта и логистики, Вена, Австрия, <https://orcid.org/0000-0002-4840-5256>

Кучумов Владислав Алексеевич, д-р техн. наук, проф., АО «ВНИИЖТ», Москва, Российская Федерация, Author ID: 700131, <https://orcid.org/0000-0003-4025-4155>

Ли Сюэй, д-р наук, проф., Пекинский транспортный университет, Пекин, КНР

Мирошниченко Ольга Федоровна, д-р экон. наук, проф., АО «ВНИИЖТ», Москва, Российская Федерация, Author ID: 384947, <https://orcid.org/0000-0002-3049-5476>

Науменко Сергей Николаевич, д-р техн. наук, ученый секретарь, АО «ВНИИЖТ», Москва, Российская Федерация, Author ID: 722006, <https://orcid.org/0000-0002-6097-9375>

Овчаренко Сергей Михайлович, д-р техн. наук, доцент, ректор, ОмГУПС, Омск, Российская Федерация, Author ID: 211825, <https://orcid.org/0000-0002-2985-3934>

Савин Александр Владимирович, д-р техн. наук, доцент, директор научного центра, АО «ВНИИЖТ», Москва, Российская Федерация, Author ID: 426312, <https://orcid.org/0000-0002-5561-5454>

Сирина Нина Фридриховна, д-р техн. наук, доцент, УрГУПС, Екатеринбург, Российская Федерация, Author ID: 436265, <https://orcid.org/0000-0001-9691-5181>

Фёдоров Сергей Васильевич, д-р техн. наук, проф., КГТУ, Калининград, Российская Федерация, Author ID: 617155, <https://orcid.org/0000-0003-3104-9862>

Фокс-Рабинович Герман Симонович, д-р техн. наук, Университет Макмастера, Гамильтон, Канада, <https://orcid.org/0000-0002-0258-587X>

Шаумаров Саид Санатович, д-р техн. наук, проф., проректор по научной работе и инновациям, Ташкентский государственный транспортный университет, Ташкент, Узбекистан, Author ID: 914211, <https://orcid.org/0000-0001-8935-7513>

Шимановский Александр Олегович, д-р техн. наук, проф., Белорусский государственный университет транспорта, Гомель, Беларусь, Author ID: 481473, <https://orcid.org/0000-0001-8550-1725>

Шур Евгений Авелевич, д-р техн. наук, проф., АО «ВНИИЖТ», Москва, Российская Федерация, Author ID: 764128, <https://orcid.org/0000-0003-4248-195X>

Эсвельд Конрад, д-р техн. наук, проф. железнодорожной инженерии, Делфтский технологический университет, Делфт, Нидерланды

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Виноградов Сергей Александрович, председатель, канд. техн. наук, генеральный директор АО «ВНИИЖТ», Москва, Российская Федерация

Горячева Ирина Георгиевна, д-р физ.-мат. наук, проф., академик РАН, ИПМех РАН, Москва, Российская Федерация

Дынькин Борис Евгеньевич, д-р техн. наук, проф., почетный президент МАТУ АТР, РГУПС, Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Колесников Владимир Иванович, д-р техн. наук, проф., академик РАН, РГУПС, Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Липидус Борис Моисеевич, д-р экон. наук, проф., председатель Объединенного ученого совета ОАО «РЖД», Москва, Российская Федерация

Махутов Николай Андреевич, д-р техн. наук, проф., член-корреспондент РАН, ИМАШ РАН, Москва, Российская Федерация

Мачерет Дмитрий Александрович, д-р экон. наук, проф., АО «ВНИИЖТ», Москва, Российская Федерация

Мугинштейн Лев Александрович, д-р техн. наук, проф., АО «ВНИИЖТ», Москва, Российская Федерация

Назаров Олег Николаевич, канд. техн. наук, ОАО «РЖД», Москва, Российская Федерация

Розенберг Ефим Наумович, д-р техн. наук, проф., первый заместитель генерального директора АО «НИИАС», Москва, Российская Федерация

Смолянинов Александр Васильевич, д-р техн. наук, проф., УрГУПС, Екатеринбург, Российская Федерация

РЕДАКЦИЯ

Анохов Игорь Васильевич, начальник научно-издательского отдела,

Сиротенко Игорь Васильевич, научный редактор,

Редина Анна Эдуардовна, специалист,

Барашков Владислав Владимирович, руководитель группы дизайна

Поступившие в редакцию материалы не возвращаются. Гонорары не выплачиваются. Все статьи публикуются бесплатно.

Подписано к печати 23.09.2024. Формат бумаги 60×90 1/8. Офсетная печать. Усл. печ. л. 11,75. Тираж 300 экз. Заказ 169058. Цена свободная

Editor-in-Chief

Alexander B. Kosarev, Dr. Sci. (Eng.), Professor, First Deputy General Director of the Railway Research Institute, Moscow, Russian Federation, Author ID: 352781, <https://orcid.org/0000-0001-9684-036X>

Deputy Editor-in-Chief

Mikhail N. Karasev, Cand. Sci. (Jur.), Director of the Science and Education Center, Railway Research Institute, Moscow, Russian Federation, Author ID: 337912, <https://orcid.org/0009-0008-5190-409X>

EDITORIAL BOARD

Odil K. Abdurakhmanov, Dr. Sci. (Econ.), Professor, Rector of the Tashkent State Transport University, Tashkent, Uzbekistan, Author ID: 813993, <https://orcid.org/0009-0008-8033-4153>
Sergey A. Bessonenko, Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Siberian Transport University, Novosibirsk, Russian Federation, Author ID: 719058, <https://orcid.org/0000-0001-5782-1596>
Vladimir D. Vereskun, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Rector of the Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russian Federation, Author ID: 513710, <https://orcid.org/0000-0002-9547-8167>
Boris E. Glyzberg, Dr. Sci. (Econ.), Professor, Railway Research Institute, Moscow, Russian Federation, Author ID: 298472, <https://orcid.org/0000-0003-2430-7894>
Abdulaziz A. Gulamov, Dr. Sci. (Econ.), Professor, Vice Rector for Academic Affairs, Tashkent State Transport University, Tashkent, Uzbekistan, Author ID: 583321, <https://orcid.org/0000-0002-4702-7468>
Oleg N. Dunaev, Dr. Sci. (Econ.), Professor, Moscow State Institute of International Relations, Moscow, Russian Federation, Author ID: 315899, <https://orcid.org/0000-0002-0593-1029>
Mikhail N. Erofeev, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation, Author ID: 836604, <https://orcid.org/0000-0002-1048-3574>
Sergey M. Zakharov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Railway Research Institute, Moscow, Russian Federation, Author ID: 731500, <https://orcid.org/0000-0003-0077-8376>
Sergey A. Kudryavtsev, Corresponding member of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, Russian Federation, Author ID: 614674, <https://orcid.org/0000-0001-9438-5033>
Sebastian Kummer, Dr. Sci. (Econ.), Professor, Vienna University of Economics and Business, Vienna, Austria, <https://orcid.org/0000-0002-4840-5256>
Vladislav V. Kuchumov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Railway Research Institute, Moscow, Russian Federation, Author ID: 700131, <https://orcid.org/0000-0003-4025-4155>

Li Xuewei, Dr. Sci., Professor, Vice-President of the Engineering Union of China Transport System, Beijing Jiaotong University, China
Olga F. Miroshnichenko, Dr. Sci. (Econ.), Professor, Railway Research Institute, Moscow, Russian Federation, Author ID: 384947, <https://orcid.org/0000-0002-3049-5476>
Sergey N. Naumenko, Dr. Sci. (Eng.), Scientific Secretary, Railway Research Institute, Moscow, Russian Federation, Author ID: 722006, <https://orcid.org/0000-0002-6097-9375>
Sergey M. Ovcharenko, Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Rector of the Omsk State Transport University, Omsk, Russian Federation, Author ID: 211825, <https://orcid.org/0000-0002-2985-3934>
Alexander V. Savin, Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Director of the Scientific Center, Railway Research Institute, Moscow, Russian Federation, Author ID: 426312, <https://orcid.org/0000-0002-5561-5454>
Nina F. Sirina, Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Ural State University of Railway Transport, Ekaterinburg, Russian Federation, Author ID: 436265, <https://orcid.org/0000-0001-9691-5181>
Sergey V. Fedorov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russian Federation, Author ID: 617155, <https://orcid.org/0000-0003-3104-9862>
German S. Fox-Rabinovich, Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher of McMaster Engineering University, Hamilton, Ontario, Canada, <https://orcid.org/0000-0002-0258-587X>
Said S. Shaumarov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Vice Rector for Research and Innovation, Tashkent State Transport University, Uzbekistan, Tashkent, Author ID: 914211, <https://orcid.org/0000-0001-8935-7513>
Alexandr O. Shimanovsky, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Belarusian State University of Transport, Gomel, Belarus, Author ID: 481473, <https://orcid.org/0000-0001-8550-1725>
Evgeniy A. Schur, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Railway Research Institute, Moscow, Russian Federation, Author ID: 764128, <https://orcid.org/0000-0003-4248-195X>
Coenraad Esveld, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Delft Technical University, General Director of the "Esveld Consulting Services", Delft, Netherlands

EDITORIAL COUNCIL

Sergey A. Vinogradov, Chairman, Cand. Sci. (Eng.), General Director of the Railway Research Institute, Moscow, Russian Federation
Irina G. Goryacheva, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Professor, Academician of the RAS, Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Science, Moscow, Russian Federation
Boris E. Dynkin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Honored President of the IATU APC, Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russian Federation
Vladimir I. Kolesnikov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences, Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russian Federation
Boris M. Lapidus, Dr. Sci. (Econ.), Professor, Chairman of the Joint Scientific Council of the Russian Railways Company, Moscow, Russian Federation
Nikolay A. Makhutov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Corresponding Member of

the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation
Dmitriy A. Macheret, Dr. Sci. (Econ.), Professor, Railway Research Institute, Moscow, Russian Federation
Lev A. Muginshtein, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Railway Research Institute, Moscow, Russian Federation
Oleg N. Nazarov, Cand. Sci. (Eng.), Deputy Head of the Technical Policy Department, Russian Railways Company, Moscow, Russian Federation
Efim N. Rosenberg, Dr. Sci. (Eng.), Professor, First Deputy General Director of the Research and Design Institute for Information Technology, Signalling and Telecommunications in Railway Transportation, Moscow, Russian Federation
Alexander V. Smolyaninov, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Wagon Department, Ural State University of Railway Transport, Ekaterinburg, Russian Federation

EDITORIAL STAFF

Igor V. Anokhov, Head of the Scientific Publishing Department,
Igor V. Sirotenko, Scientific Editor,
Anna E. Redina, Specialist,
Vladislav V. Barashkov, Head of the Design Group

Received materials are not returned. Fees are not paid. All articles are published free of charge.

Signed to print on 23.09.2024. Format is 60×90 1/8. Offset printing. 11.75 printed sheets. 300 copies. Order No. 169058. Free price

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Расширение сферы применения стояночных башмаков
В. И. Маршев, И. Н. Воронин, Д. П. Марков 193–204

Обеспечение перевозочного процесса при нагрузках на стрелочные переводы, превышающих проектные и нормативные критерии
Б. Э. Глюзберг, М. И. Титаренко, П. В. Трегубчак 205–214

Текущее состояние и перспективы развития систем энергооптимального управления электровозами 2ЭС6
С. Г. Истомин, К. И. Доманов, А. П. Шатохин, И. Н. Денисов 215–229

УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССАМИ ПЕРЕВОЗОК

Переход к автоматизированным информационно-управляющим системам оперативного управления перевозочным процессом в сети ОАО «РЖД»: постановка задачи
М. И. Мехедов, Е. А. Сотников, П. С. Холодняк, С. В. Лобанов 231–247

Установление баланса тяговых ресурсов на основе анализа колебаний скоростей поездопотоков и величины потребных резервов тяги
Н. В. Корниенко, М. И. Мехедов, А. Г. Котенко 248–257

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

Планирование работы машинистов городского рельсового транспорта
А. В. Маркевич, В. Г. Сидоренко 259–269

Высокоточное позиционирование робототехнических комплексов на программных траекториях с использованием измерений спутниковых навигационных систем
С. В. Соколов, А. Л. Охотников, Д. В. Маршаков, И. В. Решетникова 270–277

CONTENTS

TECHNICAL MEANS OF RAILWAY TRANSPORT

Expanded scope of application of wheel stops

Vladimir I. Marshev, Igor N. Voronin, Dmitriy P. Markov 193–204

Ensuring transportation under turnout switches loads exceeding design and regulatory criteria

Boris E. Glyuzberg, Mikhail I. Titarenko, Pavel V. Tregubchak 205–214

Current state and prospects of development of energy-optimal control systems for 2ES6 electric locomotives

Stanislav G. Istomin, Kirill I. Domanov, Andrey P. Shatokhin, Il'ya N. Denisov 215–229

TRANSPORTATION PROCESS MANAGEMENT

Transition to automated information and control systems for the operational management of transportation in the Russian Railways network: terms of reference

Mikhail I. Mehedov, Evgeniy A. Sotnikov, Pavel S. Kholodnyak, Sergey V. Lobanov 231–247

Balancing traction resources based on fluctuations in train speeds and required traction reserves

Natalya V. Kornienko, Mikhail I. Mekhedov, Alexey G. Kotenko 248–257

AUTOMATION AND CONTROL OF TECHNOLOGICAL PROCESSES IN RAILWAY TRANSPORT

Urban railway driver scheduling

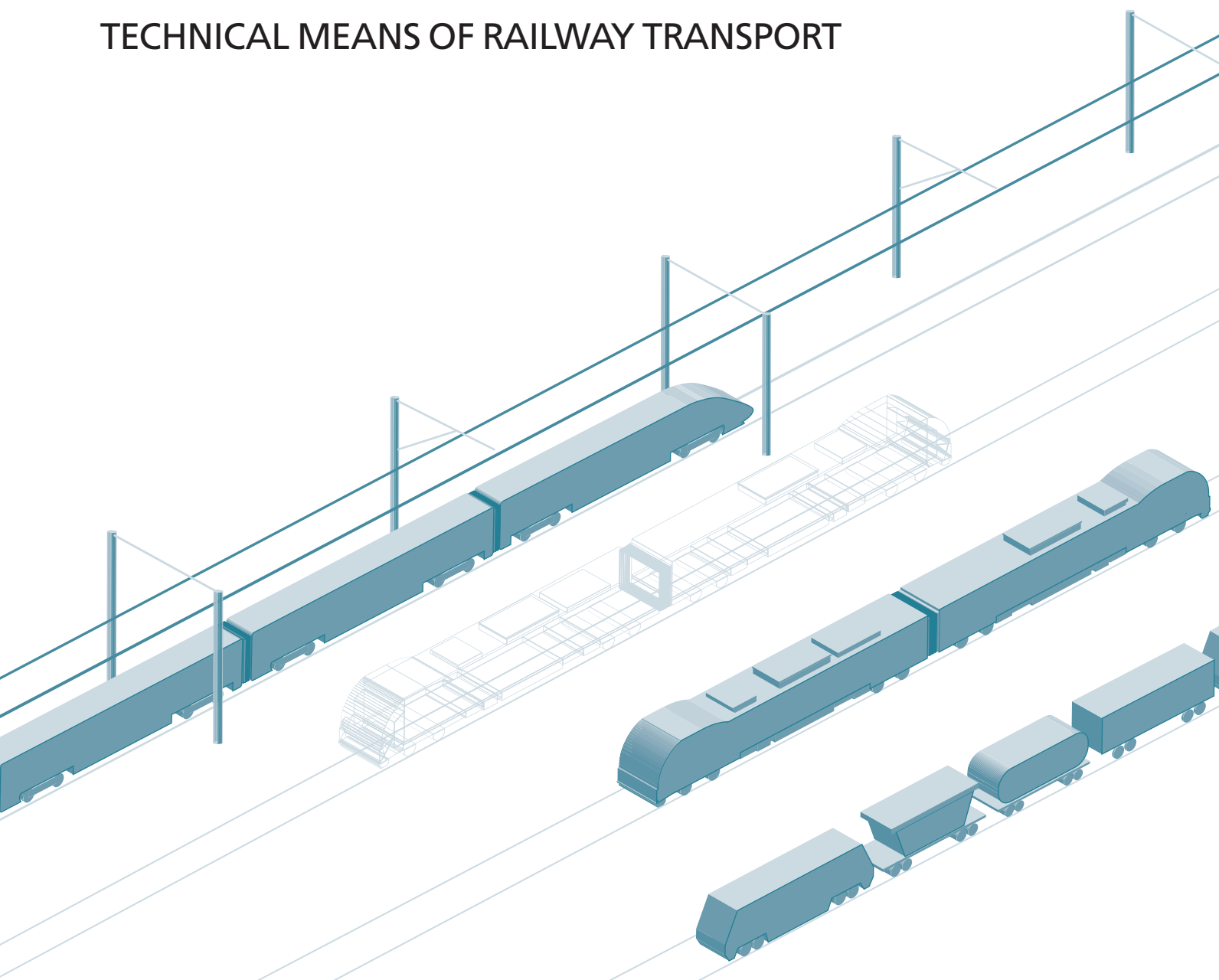
Agata V. Markevich, Valentina G. Sidorenko 259–269

High-precision positioning of robotic systems on programme trajectories using satellite navigation measurements

Sergey V. Sokolov, Andrey L. Okhotnikov, Daniil V. Marshakov, Irina V. Reshetnikova 270–277

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

TECHNICAL MEANS OF RAILWAY TRANSPORT



ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Оригинальная статья
УДК 625.143.2:656.22
EDN: <https://elibrary.ru/qewfre>



Расширение сферы применения стояночных башмаков

В. И. Маршев✉, И. Н. Воронин, Д. П. Марков

Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ),
Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассмотрена возможность оснащения подвижного состава новыми облегченными стояночными башмаками повышенной надежности, а также использования башмаков в возникающих на перегонах ситуациях, в том числе нештатных.

Материалы и методы. Выполнены натурные испытания с целью сравнения характеристик облегченных стояночных башмаков ТМ 37.10.2016 и тормозных горочных башмаков модели 8739.00. Определено тяговое усилие по перемещению состава из порожних и груженых вагонов, оборудованных башмаками.

Результаты. Выполнен анализ возможности закрепления стояночными башмаками железнодорожного подвижного состава на перегонах с различными уклонами и различным весом прицепного подвижного состава. Отработана методика аварийного вывода моторвагонного подвижного состава с заклиненной колесной парой с использованием тормозных стояночных башмаков с определением предельного пути скольжения заклиненной колесной пары в сравнении с горочными башмаками. Установлено, что для вывода электроподвижного состава с перегона при заклиненной колесной паре требуется в 4 раза больше стояночных башмаков, чем горочных.

Обсуждение и заключение. Показана принципиальная возможность замены на тяговом подвижном составе башмаков горочных 8739.00, используемых в настоящее время, на стояночные ТМ 37.10.2016. Тормозные характеристики стояночных башмаков отличаются от тормозных характеристик горочных только в короткий начальный период стирания покраски трущейся поверхности полоза стояночных башмаков. Поскольку башмаки, предназначенные для оснащения подвижного состава, предполагают экстренное использование, недопустимо окрашивать их трущуюся поверхность.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: локомотивы, моторвагонный подвижной состав, облегченные стояночные башмаки, тормозные характеристики, особенности применения на перегонах

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Маршев В. И., Воронин И. Н., Марков Д. П. Расширение сферы применения стояночных тормозных башмаков // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2024. Т. 83, № 3. С. 193–204.



TECHNICAL MEANS OF RAILWAY TRANSPORT

Original article

UDK 625.143.2:656.22

EDN: <https://elibrary.ru/qewfre>



Expanded scope of application of wheel stops

Vladimir I. Marshev✉, Igor N. Voronin, Dmitriy P. Markov

Railway Research Institute,
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The paper considers equipping rolling stock with new lightweight wheel stops of increased reliability, as well as the use of the drag shoes on space intervals, including abnormal situations.

Materials and methods. The authors performed field tests to compare the performance of lightweight wheel stops TM 37.10.2016 and hump drag shoes 8739.00. The paper determined the tractive force for moving a empty car train and loaded car train equipped with drag shoes.

Results. The paper analyses the securing of railway rolling stock with wheel stops on space intervals with different gradients and different weights of trailing rolling stock. The paper describes the developed methodology of emergency withdrawal of a multiple unit rolling stock with a wedged wheel pair using wheel stops and determines the ultimate sliding distance of the wedged wheel pair compared to the hump drag shoes. The paper established that withdrawing the electric rolling stock from the space interval with the wedged wheel pair requires 4 times more wheel stops than the hump drag shoes.

Discussion and conclusion. The authors shown that traction rolling stock permits the practical replacement of hump drag shoes 8739.00 currently in use with wheel stops TM 37.10.2016. The braking characteristics of wheel stops and hump drag shoes only differ during the short initial period of paint abrasion on the rubbing surface of the wheel stop skids. Since the drag shoes for rolling stock are intended for emergency, their rubbing surface must not be painted.

KEYWORDS: locomotives, multiple unit rolling stock, lightweight wheel stops, braking characteristics, peculiarities of application on hauls

FOR CITATION: Marshev V.I., Voronin I.N., Markov D.P. Expanded scope of application of wheel stops. *Russian Railway Science Journal*. 2024;83(3):193-204. (In Russ.).

Введение. Условия работы тормозных башмаков, предназначенных для закрепления составов (стояночные) и для торможения отцепов на сортировочных горках (горочные), существенно отличаются. До 1950 г. в стране производились стояночные и горочные башмаки, отличающиеся в основном весом¹. В 2014 г. было принято решение возобновить производство тормозных стояночных башмаков. В 2015 г. в АО «ВНИИЖТ» была разработана новая конструкция стояночных башмаков², и в 2016 г. были проведены полигонные [1], а затем эксплуатационные испытания опытной партии таких башмаков [2]. Испытания показали, что новые башмаки в 1,8 раза легче (вес одного составляет 4,1 кг вместо 7,4 кг) и надежнее горочных (только за 1 месяц было повреждено 16 горочных башмаков из 50, в основном вследствие перекатывания, что само по себе является нарушением безопасности движения, а все 50 стояночных закончили годовое испытание без повреждений). В процессе эксплуатации были выявлены отдельные недостатки, что способствовало внесению изменений в конструкцию и технические условия новых башмаков, повышающих их служебные характеристики.

В 2019 г. ФГУП «ПО «Октябрь»» (г. Каменск-Уральский) освоило производство стояночных башмаков по конструкторской документации (КД) ТМ 37.10.2016 и техническим условиям ТУ 3184-351-01124323-2017 (рис. 1), и в настоящее время ими оснащены уже многие станции. Эти башмаки разрабатывались по заказу Центральной дирекции управления движением ОАО «РЖД» и предназначались для закрепления составов на станционных путях.

Необходимо отметить, что после начала производства новых стояночных башмаков стали появляться предложения по их модернизации: облегчению веса³, увеличению удерживающей способности [3]. В процессе проектирования новых башмаков было рассмотрено, рассчитано и испытано много вариантов конструкции, среди которых были и приведенные в упомянутых патентах. Можно с уверенностью утверждать, что принятая к внедрению в производство конструкция обладает наименьшим весом при максимальной прочности и надежности.

В 2021 г. был поставлен вопрос о расширении сферы использования новых стояночных башмаков, изготавливаемых по конструкторской документации ТМ 37.10.2016 и техническим условиям ТУ 3184-351-01124323-2017, что потребовало проведения дополнительных испытаний. Цель настоящей работы — определить особенности и возможность применения стояночных башмаков не только на станционных путях, но и на перегонах, и дать рекомендации по оснащению ими локомотивов и моторвагонного подвижного состава.

Следует отметить, что, несмотря на большое количество приспособлений для закрепления подвижного состава на железнодорожных путях, тормозные башмаки не утратили своего значения и применяются практически во всех странах^{4,5} (рис. 2) [4]. Башмаки, применяемые для закрепления подвижного состава в других странах, значительно тяжелее стояночных башмаков по КД ТМ 37.10.2016 и техническим условиям ТУ 3184-351-01124323-2017. Так, вес башмака типа S-1 компании Nolan (рис. 2, а) составляет 23 кг, RS-1 — 7 кг (б), RS-2 — 14 кг (в). Укладка под колеса стоящего подвижного состава тормозных башмаков является наиболее простым и самым распространенным способом закрепления вагонов, а для хранения на подвижном составе и закрепления на перегонах башмаки являются единственно возможным средством. В других странах, например в Великобритании, тормозные башмаки также могут использоваться для вывода состава с поврежденными колесными парами [5].



Рис. 1. Стояночный башмак производства ФГУП «ПО «Октябрь»», 2018 г.

Fig. 1. Wheel stop made by FGUP PO Otktyabr, 2018

¹ Альбом типовых тормозных башмаков широкой и узкой колеи и приспособлений для их установки и сбрасывания / сост. ПКБ ЦП. М.: Главное управление движения МПС, 1959. 31 с.

² Патент № 173122 Российская Федерация, МПК В61К 7/20(2006.01), В61Н 7/10(2006.01). Башмак тормозной стояночный для закрепления составов на станционных путях: № 2017112774: заявл. 13.04.2017; опубл. 14.08.2017 / Марков Д. П., Воронин И. Н., Маршев В. И. 7 с.

³ Патент № 221013 Российская Федерация. Стояночный тормозной башмак: № 2023110822: заявл. 25.04.2023; опубл. 13.10.2023 / Левин В. А. 6 с.

⁴ Western Safety Products: Nolan [Электронный ресурс]. URL: <http://www.westernsafety.com/nolan2010/nolanpg3.html> (дата обращения: 05.04.2024).

⁵ Western Safety Products: Aldon [Электронный ресурс]. URL: <http://www.westernsafety.com/aldon2012/aldon2012pg5.html> (дата обращения: 05.04.2024).

Места хранения башмаков предусмотрены на электропоездах ЭД4М и ЭП20к (4 шт.). Башмаки могут быть без проблем заменены на новые стояночные, как и на новом пассажирском электровозе ЭП20. На электровозах ВЛ10 предусмотрены места хранения вместимостью до 40 башмаков. Количество загружаемых башмаков на грузовых локомотивах определяется профилем маршрута и массой состава и устанавливается начальником локомотивного депо. Все 40 горочных башмаков на электровозах ВЛ10 без проблем могут быть заменены на стояночные. Испытания показали, что стояночные башмаки

устанавливаются под колеса электроподвижного состава с теми же проблемами, как и у горочных (рис. 3).

Количество башмаков на электроподвижном составе и пассажирских электровозах невелико, поэтому удобство их применения при замене горочных башмаков на стояночные несущественно облегчается за счет снижения массы. На грузовом составе количество башмаков в несколько раз больше. При необходимости срочного закрепления тяжелого состава на большом уклоне время на закрепление снижается в несколько раз за счет того, что башмаки можно сбрасывать с локомотива и разносить по составу по 6–8 шт. за один раз

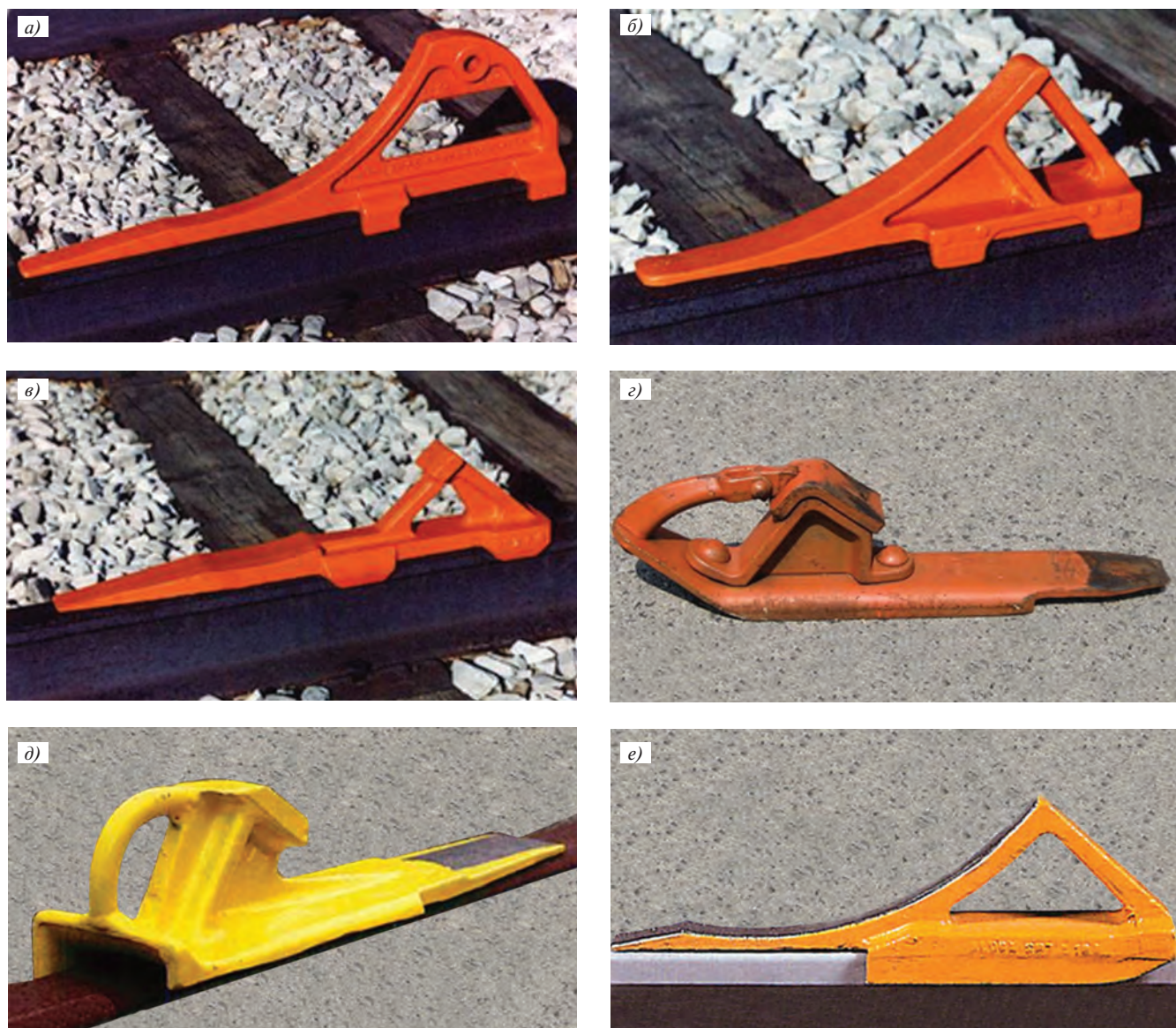


Рис. 2. Тормозные башмаки, применяемые для закрепления подвижного состава:

а, б, в — башмаки типа S-1, RS-1 и RS-2 компании Nolan; *г* — башмак типа LiBo2 компании Dittmann; *д, е* — башмаки типа S-86 и S-61 компании Aldon

Fig. 2. Drag shoes used for anchoring the rolling stock:

a, б, в — Nolan S-1, RS-1 and RS-2 drag shoes; *г* — Dittmann LiBo2 drag shoe; *д, е* — Aldon S-86 and S-61 drag shoes

(рис. 4). Необходимо отметить, что замена горочных башмаков на подвижном составе на новые стояночные повысит надежность закрепления (исключит перекаты колес через башмаки и возможность использования башмаков в диверсионных целях).

Испытания на Экспериментальном кольце АО «ВНИИЖТ» в зимнее время при сравнительно небольшой глубине снежного покрова показали, что закрепление грузового состава даже шестью горочными башмаками занимает 10 мин, а облегченными башмаками почти в 2 раза уменьшает время и работу, затрачиваемые на закрепление. На закрепление тяжелых грузовых составов на больших уклонах может потребоваться 18 и более башмаков. В зимнее время на перегонах при большой глубине снежного покрова такое закрепление тяжелыми горочными башмаками практически невыполнимо. В этих обстоятельствах стояночные башмаки не просто облегчают, но делают задачу закрепления состава выполнимой.

Сравнение удерживающей способности башмаков на перегонах. Задачей испытаний было определение влияния твердости полоза, окраски нижней поверхности полоза, погодных условий на удерживающую способность башмака. Большое влияние на закрепление железнодорожных составов станционными тормозными башмаками оказывает ветровая нагрузка [6]. Удерживающая способность башмаков оценивалась по тяговому усилию порожнего состава из пяти порожних грузовых вагонов с нагрузкой на ось 6,2 тс и груженого с нагрузкой на ось 23 тс. Схема измерения тягового усилия представлена на рис. 5.

Уход вагонов, как правило, связан с действием сжимающей силы, но динамометр в хвосте поезда установить нельзя из-за конструктивных особенностей автосцепки. Поэтому был выполнен анализ сдвига поезда путем его растяжения. Полученные результаты в случаях сжатия и растяжения существенно не различаются [7]. Для того чтобы сравнить силы трения на башмаках (рис. 5, поз. 2), они подкладывались под колеса первой оси первого вагона (поз. 1) в количестве двух единиц. Для измерения тягового усилия использовалось весоизмерительное устройство ТВЕУ-20Г с абсолютной погрешностью измерения 40 кг и диапазоном измерения 0–20 000 кг. На рис. 6 показано крепление упругого элемента силоизмерителя в автосцепках вагона и локомотива.

Результаты испытаний. На рис. 7, а, б приведены примеры диаграмм изменения тягового усилия при скольжении горочных башмаков по сухим рельсам и стояночных по мокрым. Нарастание силы тяги при экспериментах стремились осуществлять с постоянной скоростью, однако из-за наличия большого числа не поддающихся учету факторов диаграммы не повторялись в точности даже при пятикратном повторении на тех же башмаках и на том же участке.



Рис. 3. Установка стояночных башмаков под второе колесо первой тележки электровоза ВЛ10

Fig. 3. Installation of wheel stops under the second wheel of the first bogie of VL10 electric locomotive



Рис. 4. Возможность переноса стояночных башмаков: а — одновременно 6 шт.; б — удержание в одной руке четырех башмаков, при этом возможен перенос 8 шт.

Fig. 4. Transferability of wheel stops: а — 6 pieces at a time; б — holding four drag shoes in one hand, while carrying 8 pieces is possible

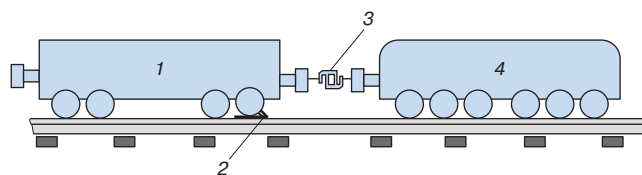


Рис. 5. Схема измерения тягового усилия: 1 — состав; 2 — тормозной башмак; 3 — упругий элемент весоизмерительного устройства ТВЕУ-20Г; 4 — локомотив

Fig. 5. Traction force measurement scheme: 1 — train; 2 — drag shoe; 3 — elastic element of the weighing device TVEU-20G; 4 — locomotive



Рис. 6. Весоизмерительное устройство ТВЕУ-20Г: крепление упругого элемента весоизмерительного устройства на автосцепках вагона и электровоза

Fig. 6. Weighing device TVEU-20G: fixing of the elastic element of the weighing device on the car and electric locomotive couplings

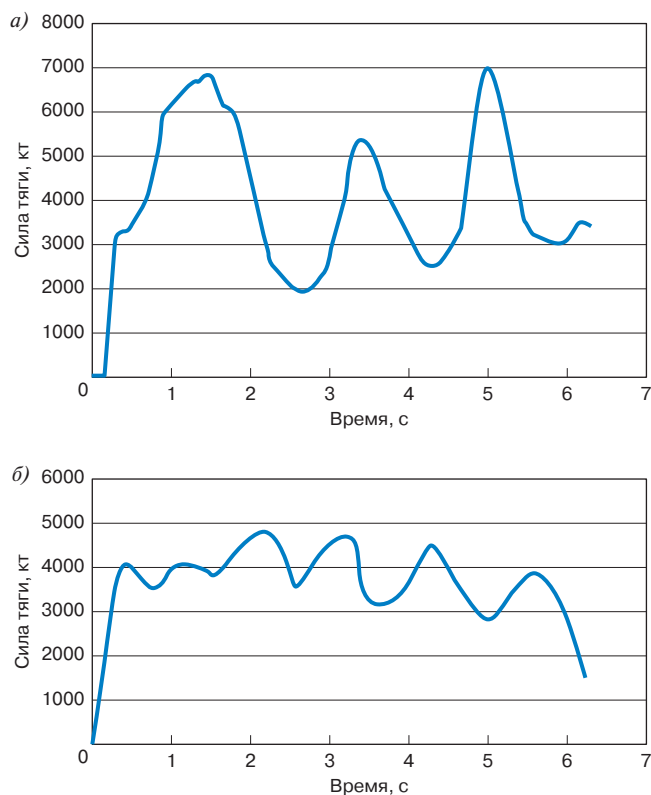


Рис. 7. Диаграммы изменения тягового усилия при скольжении горочного башмака по сухому рельсу (а) и при скольжении стояночного башмака по мокрому рельсу (б)

Fig. 7. Diagrams of traction force trends when the hump drag shoe slides on dry rail (a) and when the wheel stop slides on wet rail (b)

Наблюдаемые на графиках (рис. 7) колебания тягового усилия находятся в диапазоне от 1 до 2 Гц. Такие значения вероятнее всего соответствуют колебаниям вагона как единого целого [8].

Сила трения при скольжении колесной пары на башмаках нестабильна. Было проведено две серии испытаний с составом из пяти порожних вагонов с нагрузкой на ось 18 тс и с одним груженым вагоном с нагрузкой на ось 23 тс. Как видно из рис. 7, а, после достижения силы трения покоя и страгивания башмака с места вследствие малых жесткости и коэффициента демпфирования подвески колесной пары и тележки, а также деформативности межвагонного соединения возникают колебания тягового усилия. Эффект усиливается ввиду неодновременного проскальзывания колес колесной пары, что в экстремальных условиях может привести к сбросу башмака с рельса. Аналогичный характер изменения тягового усилия наблюдался и при всех остальных испытаниях, включая испытания на смазанных рельсах. Анализ видео и акустических записей на сортировочных горках и в парках формирования составов показывает, что колесные пары на башмаках скользят неравномерно с колебаниями различных частот от 10 до нескольких тысяч Гц.

Сила, обеспечивающая начало качения колес незакрепленного башмаками порожнего состава из пяти вагонов, была равна 0,5 тс, а нагрузка качения $\sim 0,3$ тс. Для одного груженого вагона эти величины равны соответственно 0,08 и 0,04 тс. В табл. 1 представлены максимальные и средние значения силы тяги состава из пяти порожних вагонов (каждое испытание повторялось 10 раз). В табл. 2 представлены максимальные и средние значения силы тяги при башмачном закреплении одного груженого вагона.

Окраска нижней поверхности полоза на сухих рельсах снижает коэффициент трения в 1,4–1,9 раза, а на мокрых и смазанных рельсах практически не меняет его. Краска сдирается с полоза на пути скольжения 2–3 м (рис. 8).

Тяговое усилие страгивания и скольжения и коэффициенты трения горочных и стояночных башмаков с неокрашенной контактной поверхностью полоза практически равны. В настоящее время окраска скользящей поверхности полоза прекращена. Таким образом, по удерживающей способности башмаки равноценны, но, учитывая возможность перекатывания колес через горочные башмаки при высоких коэффициентах трения, новые стояночные башмаки являются более надежными.

Закрепление подвижного состава на уклонах. Основная проблема закрепления при малых уклонах до 0,001 (1‰) связана с необходимостью двухстороннего закрепления подвижного состава. Испытания проводились на Экспериментальном кольце АО «ВНИИЖТ» в два этапа, сначала с пассажирскими вагонами, затем с грузовыми при температуре воздуха -12 °С. Составы устанавливались на участке с нулевым уклоном. На первом этапе испытывался состав из электровоза

Таблица 1

Сила тяги при башмачном закреплении состава из пяти порожних вагонов

Table 1

Traction force during five empty car train shoeing

Тип башмаков	Состояние рельсов	Сила тяги, тс		
		Максимальная	Средняя	Средняя за вычетом трения в буксах
Стояночные неокрашенные	Сухие	5,3	3,2	2,8
	Мокрые	4,9	2,8	2,5
	Смазка	3,1	1,0	0,7
Стояночные окрашенные	Сухие	4,5	2,3	2,0
	Мокрые	3,7	2,4	2,1
	Смазка	2,9	1,0	0,7

Таблица 2

Сила тяги при башмачном закреплении одного груженого вагона

Table 2

Traction force during loaded car shoeing

Тип башмаков	Состояние рельсов	Сила тяги, тс		
		Максимальная	Средняя	Средняя за вычетом трения в буксах
Стояночные неокрашенные	Сухие	6,3	4,4	4,4
	Мокрые	4,9	2,8	2,8
	Смазка	3,1	1,0	1,0
Стояночные окрашенные	Сухие	5,3	2,3	2,3
	Мокрые	5,8	3,8	3,8
	Смазка	3,1	0,7	0,7
Горочный	Сухие	6,2	4,5	4,5
	Мокрые	5,7	3,7	3,7
	Смазка	5,1	0,7	0,7

ЭП20 и пяти пассажирских вагонов, на втором — из электровоза ЭП20 и пяти грузовых вагонов. Испытывались сначала горочные башмаки, затем стояночные. Сначала подкладывался башмак под последнее колесо ближайшего к электровозу вагона, электровоз накатывал колесо на башмак и ставился на тормоза. Затем подкладывался второй башмак под вторую колесную пару первой тележки электровоза, электровоз снимался с тормозов, медленно накатывался на второй башмак. После того как тормоза отпускались, производилась попытка вынуть один из башмаков из-под колеса. Каждое испытание повторялось три раза. Если один из башмаков удавалось снять, то делалась попытка двухстороннего закрепления локомотива и двух, трех и т. д. вагонов, пока один из башмаков было невозможно снять с рельсов. Испытания показали следующие результаты:

Горочными башмаками можно закрепить с двух сторон состав из электровоза ЭП20 и четырех пассажирских вагонов или состав из электровоза ЭП20 и двух грузовых вагонов.

Стояночными башмаками можно закрепить с двух сторон состав из электровоза ЭП20 и трех пассажирских вагонов или состав из электровоза ЭП20 и двух грузовых вагонов.

Таким образом, в некоторых случаях стояночные башмаки позволят закрепить с двух сторон отцеп с меньшим количеством вагонов, но в целом двухстороннее закрепление одного — трех вагонов остается актуальной задачей, решить которую еще предстоит.

Испытания на электроподвижном и грузовом составах, на уклонах 0,009 и 0,017, в кривых от 400 до 205 м, в различную погоду при температуре от 0 до

-12 °С подтвердили сделанный ранее вывод, что при твердости стояночных башмаков в 2 раза больше горочных их коэффициенты трения равны и для закрепления различных составов требуется одинаковое количество башмаков.



Рис. 8. Сдираание краски с окрашенных полозьев стояночных башмаков:

a — краска, перенесенная на рельс; *б* — потертости на нижней плоскости полозьев

Fig. 8. Paint peeling off the painted wheel stops skids:

a — paint transferred to the rail; *б* — abrasion on the lower plane of the skids



Аварийный вывод моторвагонного подвижного состава с заклиненной колесной парой с использованием тормозных стояночных башмаков. Испытания проводились на участке кривой 400 м длиной 2 км в два этапа: сначала на сухих рельсах, а затем на рельсах, поливаемых маслом из бака, установленного на локомотиве. Сравнивались тормозные стояночные башмаки по КД ТМ 37.10.2016 и техническим условиям ТУ 3184-351-01124323-2017 с определением предельного пути скольжения поврежденной колесной пары с горочными башмаками по КД 8739.00 и ТУ 32-01124323-72-94. Температура воздуха при испытаниях составляла +2 °С. Были выделены 6 вагонов пригородного электропоезда ЭД4МК, включая секцию моторвагонного подвижного состава, и электровоз, а также 6 стояночных и 6 горочных башмаков. Башмаки подкладывались под оба колеса моторной колесной пары с нагрузкой на ось 18 тс, имитирующей заклинивание. Башмаки осматривались после прохождения 2 км. В процессе движения производилось наблюдение за обоими башмаками с периодической видеозаписью. При видимом повреждении одного из башмаков движение прекращалось. Пройденное расстояние измеряли по пикетам. Предполагалось, что испытания будут повторяться поочередно с горочными и стояночными башмаками при скоростях 3, 6 и 9 км/ч. Однако выдерживать постоянные скорости не удалось, состав периодически то разгонялся, то замедлялся. Поэтому испытания провели в двух интервалах скоростей: от 3 до 5 км/ч и от 6 до 9 км/ч. Состояние башмаков после прохода 2 км на сухих рельсах со скоростью 3–5 км/ч показано на рис. 9.

Испытания показали следующие результаты.

После прохождения 2 км износ горочных башмаков составил 2,3 мм. Толщина полозьев стояночных башмаков, напротив, увеличилась за счет перенесенного с рельса более мягкого металла. Навар металла, перенесенного на полз с рельса, зацепился за стык рельсов и стал причиной отрыва носка полоза стояночного башмака (рис. 9, *a*). Несмотря на меньший



Рис. 9. Полозья башмаков после скольжения со скоростью 3–5 км/ч на дистанции 2 км:

a — стояночных; *б* — горочных

Fig. 9. Drag shoes skids after sliding at 3–5 km/h over 2 km:

a — wheel stops; *б* — hump drag shoes

и даже отрицательный износ стояночных башмаков, навары, образующиеся на носке полоза, приводят к отрыву носков полоза при наезде на стык рельсов, что делает невозможным использование их на длинных дистанциях со скоростями менее 3–5 км/ч.

На рис. 10 показаны горочные башмаки после прохода 8 км со скоростью 3–5 км/ч.

После прохода 8 км башмаки были предельно изношены, и дальнейшая их эксплуатация могла привести к повреждению колес. Таким образом, дистанция 8 км при скорости от 3 до 5 км/ч является для горочных башмаков предельно допустимой.

На рельсах при скольжении башмаков видимых повреждений не обнаружено. После скольжения башмаков на рельсе были видны лишь пятна перенесенного с башмаков металла (рис. 11).

Увеличение скорости скольжения до 6–9 км/ч приводит к сильному разогреву полозьев башмаков и их пластической деформации. Уже после скольжения на дистанции 880 м полз стояночного башмака размягчился настолько, что колесо продавало его до рельса (рис. 12, а).

Полозья горочных башмаков после прохода 2 км со скоростью 6–9 км/ч были фактически уже предельно изношены. Таким образом, увеличение скорости менее чем в 2 раза привело к уменьшению пути скольжения до разрушения башмаков в 4 раза.

Испытания на смазанных рельсах. По опыту работы сортировочных горок известно, что смазка рельсов снижает износ и продлевает срок службы башмаков. Однако на больших дистанциях смазка не замедляет, а, напротив, ускоряет разрушение башмаков. Это, по-видимому, объясняется тем, что причиной изнашивания на больших дистанциях является не износ, а разогрев, размягчение металла и пластическая деформация полоза. Смазка улучшает теплопроводность, увеличивает нагрев полоза и способствует температурному размягчению металла.

На стояночных башмаках при испытаниях на смазанных рельсах со скоростью 3–5 км/ч навары не наблюдались, но полозья быстро нагрелись, размягчились и разрушились через 1,6 км (рис. 13).

Горочные башмаки при скольжении по смазанным рельсам 2 км получили износ такой же, как на не смазанных после прохода 4 км (рис. 14).

Стояночные башмаки на скорости 6–9 км/ч не испытывались, горочные башмаки уже после скольжения 1,9 км по смазанным рельсам со скоростью 6–9 км/ч получили предельные повреждения (рис. 15).

Таким образом, увеличение скорости в 2 раза в сочетании со смазкой рельсов уменьшает допустимую дистанцию скольжения горочных башмаков в 4 раза по сравнению со скольжением по сухим рельсам со скоростью 3–5 км/ч.



Рис. 10. Состояние горочных тормозных башмаков после скольжения 8 км под колесной парой с нагрузкой 18 тс со скоростью 3–5 км/ч

Fig. 10. Condition of hump drag shoes after sliding 8 km under a wheel pair with a load of 18 tf at 3–5 km/h



Рис. 11. Пятна металла, перенесенного на рельс с башмаков

Fig. 11. Stains of metal transferred to the rail from the drag shoes



Рис. 12. Полозья башмаков после скольжения со скоростью 6–9 км/ч: а — стояночных на дистанции 880 м; б — горочных на дистанции 2 км

Fig. 12. Drag shoes skids after sliding at 6–9 km/h: а — wheel stops at a distance of 880 m; б — hump drag shoes at a distance of 2 km



Рис. 13. Внешний вид стояночных башмаков после прохода 1,6 км по смазаным рельсам со скоростью 3–5 км/ч

Fig. 13. Appearance of wheel stops after travelling 1.6 km on greased rails at 3–5 km/h



Рис. 14. Внешний вид горочных башмаков после прохода 2 км со скоростью 2–4 км/ч

Fig. 14. Appearance of hump drag shoes after travelling 2 km at 2–4 km/h



Рис. 15. Внешний вид горочных башмаков после прохода 1,9 км по смазанным рельсам со скоростью 6–9 км/ч

Fig. 15. Appearance of hump drag shoes after travelling 1.9 km on greased rails at 6–9 km/h

Обсуждение и выводы. Анализ данных, полученных при испытаниях стояночных башмаков, показывает, что их можно успешно применять для закрепления подвижного состава на станционных путях и на перегонах. Это достигается путем разработки более совершенной, по сравнению с горочным башмаком,

конструкции и применения более прочного материала. Общие выводы по проведенной работе следующие:

1. Стояночные башмаки по удобству хранения и применения на локомотивах и моторвагонном подвижном составе не уступают горочным башмакам, а по весу и по безопасности превосходят последние. С одной стороны, башмаки удовлетворяют условиям работы женщин-машинистов, с другой (в случае необходимости) — есть возможность переноски сразу 6 и даже 8 башмаков.

2. Стояночные башмаки с неокрашенным полозом обладают такой же удерживающей способностью, как и горочные. Удерживающая способность окрашенных башмаков почти в 1,4 раза ниже. Стояночные башмаки, применяющиеся на локомотивах и моторвагонном подвижном составе, не прирабатываются, как горочные, поэтому должны поставляться с неокрашенной нижней поверхностью полоза.

3. Испытаниями установлено, что для удержания состава как стояночными тормозными башмаками, так и горочными башмаками необходимо аналогичное количество башмаков, следовательно сила трения между башмаком и рельсом одинаковая. Таким образом, стояночными тормозными башмаками можно закреплять подвижной состав в соответствии с нормой закрепления, рассчитанной по формуле, приведенной в Правилах технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации (ПТЭ), утвержденных приказом Министерства транспорта Российской Федерации от 23 июня 2022 г. № 250.

Стояночными тормозными башмаками и горочными башмаками, используемыми в качестве стояночных, можно закрепить с двух сторон подвижной состав, состоящий из трех и более единиц. При двухстороннем закреплении существующими башмаками состава, состоящего из трех и менее единиц, требуются дополнительные меры по предотвращению возможности их несанкционированного изъятия. Для решения этого вопроса предлагается создать для такого состава специальные башмаки с повышенной удерживающей способностью на обратном уклоне и внести в Приложение № 17 к ПТЭ изменение о возможности одностороннего закрепления составов на перегонах такими башмаками.

4. Вывод моторвагонного подвижного состава с заклиненной колесной парой на стояночных тормозных башмаках возможен, при этом максимальное значение пути скольжения колесной пары на башмаке на сухих рельсах до повреждения облегченных стояночных тормозных башмаков составляет 2100 м при скорости движения не более 3 км/ч. Значение пути скольжения при применении горочных башмаков при прочих равных условиях составляет 4000 м. С увеличением скорости расход башмаков увеличивается

в геометрической прогрессии. При этом смазка рельсов только ускоряет разрушение башмаков.

Прохождение стыков с приваренными рельсовыми соединителями допускается при расположении приваренного соединителя ниже поверхности катания рельса для облегченных стояночных башмаков — не менее чем на 22 мм, для горочных башмаков — не менее чем на 19,5 мм.

Проведенные исследования продемонстрировали принципиальную возможность замены используемых в настоящее время на тяговом подвижном составе башмаков горочных 8739.00 на стояночные ТМ 37.10.2016.

Финансирование: авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

Funding: the authors received no financial support for the research, authorship, and publication of this article.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах.

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest and no financial interests in any material discussed in this article.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Стояночные тормозные башмаки для закрепления подвижного состава на стационных путях. Полигонные испытания / Д. П. Марков [и др.] // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2016. Т. 75, № 5. С. 308–317. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2016-75-5-308-317>.

Markov D. P., Voronin I. N., Shipulin N. P., Marshev V. I., Sukhov A. V., Zabavina M. V., et al. Rail skates for fixing rolling stock on the station tracks. Ground tests. *Russian Railway Science Journal*. 2016;75(5):308-317. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2016-75-5-308-317>.

2. Стояночные тормозные башмаки. Эксплуатационные испытания / Д. П. Марков [и др.] // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2017. Т. 76, № 3. С. 153–158. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2017-76-3-153-158>.

Markov D. P., Voronin I. N., Shipulin N. P., Marshev V. I., Sukhov A. V., Guzanov V. V., et al. Parking brake shoes. Operational tests. *Russian Railway Science Journal*. 2017;76(3):153-158. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2017-76-3-153-158>.

3. Обрывагин А. В., Уракова Д. В. Совершенствование конструкции тормозного башмака // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте: материалы XVII науч. конф., посвящен. Дню российской науки. Омск, 2023. С. 469–473. EDN: <https://elibrary.ru/aqfkch>.

Obryagin A. V., Urakova D. V. Improvement of the drag shoe design. In: *Innovative Projects and Technologies in Education, Industry and Transport: sourcebook of XVII scientific conf., dedicated to the Day of Russian Science*. Omsk; 2023. p. 469–473. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/aqfkch>.

4. Review Neuartiger Radvorleger. *Der Eisenbahningenieur*. 2005;56(11):114.

5. *Ellis' British Railway Engineering Encyclopedia*. Lulu.com; 2006. 424 p.

6. Демьянчук О. В. Анализ влияния ветровой нагрузки на закрепление железнодорожных составов стационными тормозными

башмаками // Вестник Белорусского государственного университета транспорта: Наука и транспорт. 2021. № 2. С. 58–61. EDN: <https://elibrary.ru/sbhyro>.

Demyanchuk O. V. Analysing the anchoring of railway trains with station drag shoes under wind loads. *Vestnik Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta transporta: Nauka i transport*. 2021;(2):58-61. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/sbhyro>.

7. Шимановский А. О., Кузнецова М. Г., Демьянчук О. В. Компьютерное моделирование динамики взаимодействия колесных пар вагонов с тормозными башмаками // Механика машин, механизмов и материалов. 2021. № 4(57). С. 48–55. <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2021-4-57-48-55>.

Shimanovsky A. O., Kuznetsova M. G., Demyanchuk O. V. Computer modeling of interaction dynamics of the railway car wheelset with braking shoes. *Mechanics of Machines, Mechanisms and Materials*. 2021;(4):48-55. (In Russ.). <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2021-4-57-48-55>.

8. Шимановский А. О., Кузнецова М. Г., Демьянчук О. В. Динамика взаимодействия вагонов с тормозными башмаками // Транспорт шелкового пути. 2022. № 2. С. 38–45. EDN: <https://elibrary.ru/phfofj>.

Shimanovsky A. O., Kuznetsova M. G., Demyanchuk O. V. Wagons and drag shoes interaction dynamics. *Transport shelkovogo puti*. 2022;(2):38-45. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/phfofj>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Владимир Иванович МАРШЕВ,

канд. техн. наук, технический эксперт, Центр испытаний и моделирования, Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ, 129626, г. Москва, ул. 3-я Мытищинская, д. 10), Author ID: 854401, <https://orcid.org/0009-0009-6448-0991>

Игорь Николаевич ВОРОНИН,

технический эксперт, Центр испытаний и моделирования, Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ, 129626, г. Москва, ул. 3-я Мытищинская, д. 10), Author ID: 873989, <https://orcid.org/0009-0002-1236-6440>

Дмитрий Петрович МАРКОВ,

д-р техн. наук, научный консультант, Научно-консультационный центр, Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ, 129626, г. Москва, ул. 3-я Мытищинская, д. 10), Author ID: 680121, <https://orcid.org/0000-0001-7441-5178>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vladimir I. MARSHEV,

Cand. Sci. (Eng.), Technical Expert, Test and Simulation Centre, Railway Research Institute (129626, Moscow, 10, 3rd Mytishchinskaya St.), Author ID: 854401, <https://orcid.org/0009-0009-6448-0991>

Igor N. VORONIN,

Technical Expert, Test and Simulation Centre, Railway Research Institute (129626, Moscow, 10, 3rd Mytishchinskaya St.), Author ID: 873989, <https://orcid.org/0009-0002-1236-6440>

Dmitriy P. MARKOV,

Dr. Sci. (Eng.), Academic Advisor, Scientific Consulting Centre, Railway Research Institute (129626, Moscow, 10, 3rd Mytishchinskaya St.), Author ID: 680121, <https://orcid.org/0000-0001-7441-5178>

ВКЛАД АВТОРОВ

Владимир Иванович МАРШЕВ. Формулировка цели и методологии исследования, анализ опытных данных, описание результатов, выводы (40%).

Игорь Николаевич ВОРОНИН. Подготовка, организация и выполнение испытаний, анализ исходных данных, описание результатов, выводы (20%).

Дмитрий Петрович МАРКОВ. Научное сопровождение испытаний, анализ результатов, выводы, написание статьи (40%).

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Vladimir I. MARSHEV. Formulation of research objective and methodology, analysis of test data, description of results, conclusions (40%).

Igor N. VORONIN. Preparation, organisation and execution of trials, analysis of raw data, description of results, conclusions (20%).

Dmitriy P. MARKOV. Scientific support of the tests, analysis of results, conclusions, article writing (40%).

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The authors have read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию 15.04.2024, рецензия от первого рецензента получена 23.05.2024, рецензия от второго рецензента получена 28.06.2024, рецензия от третьего рецензента получена 02.07.2024, принята к публикации 19.08.2024.

The article was submitted 15.04.2024, first review received 23.05.2024, second review received 28.06.2024, third review received 02.07.2024, accepted for publication 19.08.2024.

ВНИМАНИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ!

ДОПОЛНИТЕЛЬНОЕ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ В АО «ВНИИЖТ»

Центр дополнительного образования (ЦДО) (лиц. № 2329 от 11.08.2016 г.) проводит повышение квалификации и профессиональную переподготовку слушателей по следующим направлениям:

- Анализ, моделирование бизнес-архитектуры и бизнес-процессов, использование процессного подхода в управлении организацией (для руководителей и специалистов)
- Проектирование, изготовление и приемка сварных конструкций железнодорожного подвижного состава, управление качеством в сварке рельсов, проведение аудита сварочного производства
- Построение энергосберегающих графиков движения поездов с использованием автоматизированной системы АПК ЭЛЬБРУС
- Изучение технологии транспортных процессов
- Транспортная логистика
- Изучение принципов построения и функционирования автоматизированной системы контроля за работой специального подвижного состава
- Изучение устройств, диагностики и средств контроля состояния железнодорожного пути
- Эксплуатация, техническое обслуживание и ремонт подвижного состава и устройств электроснабжения

Программы обучения могут быть разработаны по инициативе заказчика с учетом профессиональной деятельности АО «ВНИИЖТ».

Обучение проводится как в очной форме, так и с применением дистанционных образовательных технологий.

По итогам освоения образовательных программ слушателям выдается документ о квалификации государственного образца.

Куратор ЦДО — Пархаев Алексей Александрович, кандидат социологических наук, заместитель генерального директора по управлению персоналом и социальным вопросам.

По вопросам обучения обращаться по адресу: 129626, г. Москва, 3-я Мытищинская улица, д.10
Центр дополнительного образования. Тел.: +7 (499) 260-41-08



ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Оригинальная статья

УДК 625.151.3

EDN: <https://elibrary.ru/pvmugq>

Обеспечение перевозочного процесса при нагрузках на стрелочные переводы, превышающих проектные и нормативные критерии

Б. Э. Глюзберг✉, М. И. Титаренко, П. В. Трегубчак

Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ),
Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Введение. Необходимость быстрого наращивания объемов перевозок железнодорожным транспортом обеспечивается использованием тяжеловесных поездов повышенной массы с повышенными нагрузками на ось вагонов. Возможности инфраструктуры железнодорожного транспорта не всегда позволяют осуществлять неограниченное использование такой организации движения. Замена эксплуатируемых конструкций пути на современные, предназначенные для работы в условиях обращения тяжеловесных поездов, требует значительного времени и материальных затрат. В течение этого времени перевозки должны осуществляться по существующим конструкциям пути, в том числе и по пути из рельсов легкого типа Р50. Предлагаемое вниманию читателей исследование посвящено анализу возможностей стрелочного хозяйства по обеспечению безопасного движения тяжеловесных поездов на эксплуатируемых конструкциях стрелочных переводов до их замены на специальные, предназначенные для работы в условиях тяжеловесного движения.

Материалы и методы. Работа базируется на результатах исследований напряженно-деформированного состояния основных элементов стрелочных переводов под воздействием подвижного состава с различными нагрузками на ось. Используются результаты анализа ресурсных показателей стрелочных переводов в различных условиях эксплуатации на сети дорог. При анализе влияния осевых нагрузок подвижного состава на ресурсные показатели элементов стрелочных переводов применены методы математической статистики и теории надежности.

Результаты. Получены предиктивные данные об изменении ресурса, вероятности безотказной работы и интенсивности отказов основных элементов стрелочных переводов при повышении нагрузок обращающегося по переводам подвижного состава до 25 т/ось. Разработана методика предиктивного анализа ресурсных показателей стрелочных переводов.

Обсуждение и заключение. Методика предиктивного анализа является универсальной и может быть использована для оценки влияния осевых нагрузок подвижного состава на ресурсные показатели элементов верхнего строения пути. Разработаны предложения по обеспечению безопасности движения в условиях обращения по эксплуатируемым стрелочным переводам тяжеловесных поездов. Полученные выводы целесообразно использовать при организации текущего содержания стрелочных переводов на участках, на которых планируется введение в обращение тяжеловесных поездов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: железнодорожный путь, стрелочные переводы, тяжеловесное движение, нагрузки на ось, предиктивный анализ, ресурсные показатели, вероятность безотказной работы, интенсивность отказов, безопасная эксплуатация

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Глюзберг Б. Э., Титаренко М. И., Трегубчак П. В. Обеспечение перевозочного процесса при нагрузках на стрелочные переводы, превышающих проектные и нормативные критерии // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2024. Т. 83, № 3. С. 205–214.



TECHNICAL MEANS OF RAILWAY TRANSPORT

Original article

UDK 625.151.3

EDN: <https://elibrary.ru/pvmugq>



Ensuring transportation under turnout switches loads exceeding design and regulatory criteria

Boris E. Glyuzberg✉, Mikhail I. Titarenko, Pavel V. Tregubchak

Railway Research Institute,
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The need to rapidly increase the volume of railway transport is ensured by the use of heavy-load trains of increased weight and higher carriage axle loads. The capacity of the railway infrastructure does not always allow for unlimited use of such traffic organisation. Replacement of the existing track structures with modern ones designed for operation under heavy-load trains requires considerable time and material costs. During this time transportation has to continue on existing track structures, including the R50 light rail tracks. This research examines the capacity of switch economy in terms of safe movement of heavy-load trains on operated turnout switches before they are replaced by special ones designed for heavy-load traffic.

Materials and methods. The paper is based on the results of research of stress-deformation state of the main elements of turnout switches affected by rolling stock with different axle loads. It also uses the results of analysis of resource indicators of turnouts under different operating conditions on the road network. The analysis of the influence of rolling stock axle loads on the service life indicators of turnout switches elements applied the methods of mathematical statistics and reliability theory.

Results. The authors obtained predictive data on the service life trends, failure-free operation likelihood and failure rate of the main elements of turnout switches with an increase in the loads of rolling stock circulating on the turnout switches up to 25 t/axle. The researchers developed a method of predictive analysis of turnout switches service life indicators.

Discussion and conclusion. The predictive analysis is versatile and could be used for assessing the influence of rolling stock axle loads on service life indicators of track structure elements. The authors developed proposals to ensure traffic safety under heavy-load train traffic on the operated turnout switches. These conclusions are useful in organising the current maintenance of turnout switches on sections with heavy-load trains to be put into circulation.

KEYWORDS: railway track, turnout switches, heavy-load traffic, axle loads, predictive analysis, service life indicators, failure-free operation likelihood, failure rate, safe operation

FOR CITATION: Glyuzberg B. E., Titarenko M. I., Tregubchak P. V. Ensuring transportation under turnout switches loads exceeding design and regulatory criteria. *Russian Railway Science Journal*. 2024;83(3):205-214. (In Russ.).

Введение. Современные условия развития экономики страны связаны с необходимостью оперативных изменений логистических направлений грузопотоков. Это в первую очередь касается железнодорожного транспорта, где приоритетными направлениями перевозок массовых видов грузов становятся направления на север и восток к новым потребителям и портам отгрузки основных потоков экспортных российских продуктов. Наиболее эффективный путь быстрого наращивания объемов перевозок железнодорожным транспортом — это использование тяжеловесных поездов повышенной массы с повышенными нагрузками на ось вагонов [1].

На важнейших направлениях намечены и проводятся ускоренными темпами работы по усилению провозной способности линий и реконструкции путевого хозяйства, однако интенсифицировать перевозочный процесс на ряде направлений требуется уже сегодня. При этом работы по его интенсификации необходимо организовать так, чтобы была обеспечена безопасность движения поездов при существующих возможностях содержания и обслуживания пути.

Возможности инфраструктуры железнодорожного транспорта, и в первую очередь путевого хозяйства, на направлениях, на которых требуется быстрое наращивание объема перевозок, не всегда позволяют осуществлять неограниченное использование тяжеловесных поездов. Замена эксплуатируемых конструкций пути на современные, предназначенные для работы в условиях движения тяжеловесных поездов, требует значительного времени и материальных затрат. В течение этого времени перевозки должны осуществляться по существующим конструкциям пути, уже выработавшим часть своего ресурса, в том числе и по пути из рельсов легкого типа Р50.

Наблюдения за стрелочными переводами в процессе их эксплуатационной работы показали, что повышенное воздействие на стрелочные переводы приводит к сокращению ресурса их элементов и необходимости выполнения дополнительных работ по поддержанию их в работоспособном состоянии [2–4]. Характерные повреждения элементов стрелочных переводов от воздействия повышенных нагрузок показаны на рис. 1–3.

Рассмотрим эти вопросы более подробно.

Изменение ресурса элементов стрелочных переводов при повышении воздействия на них. Стрелочные переводы и их элементы работают в условиях циклического нагружения от проходящих колес подвижного состава [5, 6]. По мере наработки, под воздействием циклической нагрузки в элементах стрелочных переводов возникают и развиваются повреждения, которые приводят к отказам элементов, требующим их замены. Цель



Рис. 1. Трещина в литой части сердечника крестовины типа Р50

Fig. 1. Crack in the cast part of the common crossing of R50 type



Рис. 2. Сплывы и выкрашивание металла на рабочих поверхностях крестовин типа Р65 из-за воздействия колес с повышенной нагрузкой

Fig. 2. Metal spalling and pitting on the working surfaces of R65 type crosspieces caused by wheels with increased load



Рис. 3. Выкрашивание металла на рабочей поверхности остряка типа Р65 из-за воздействия колес с повышенной нагрузкой

Fig. 3. Metal pitting on the working surface of R65 type switch blade caused by wheels with increased load

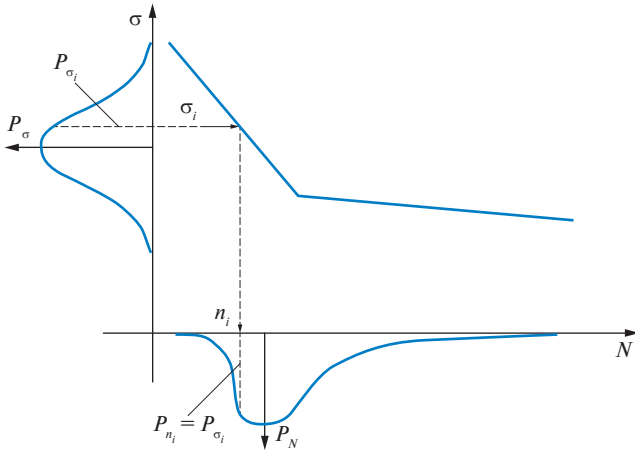


Рис. 4. Схематизированная кривая вторичной усталости $N = N(\sigma)$: N — число циклов до отказа элемента; σ — наибольшие напряжения в цикле нагружения

Fig. 4. Secondary fatigue curve $N = N(\sigma)$: N — cycles to failure; σ — highest stresses in the loading cycle

данного исследования — разработка мероприятий по обеспечению безопасной эксплуатации стрелочных переводов в условиях обращения подвижного состава с повышенными нагрузками. Содержание мероприятий должно базироваться на прогнозировании изменения ресурса основных элементов перевода в условиях повышенного воздействия на них.

Для прогнозирования зависимости отказов основных элементов стрелочных переводов от наработки при циклических нагружениях целесообразно использовать модель, построенную на основе модифицированной теории суммирования повреждений [7–9], которую иллюстрирует рис. 4.

Исходя из теории суммирования повреждений, каждый цикл нагружения с напряжениями большими, чем предел длительной выносливости, использует часть ресурса элемента. Если число таких циклов (вероятность их возникновения) — $P(N_{i,r})$, а общее число циклов, которые может выдержать элемент при таких циклах нагружения, — $N_{i,r}$, то доля ресурса, которая будет использована элементом за все такие циклы нагружения, составит $P(N_{i,r})/N_{i,r}$.

Просуммировав все циклы нагружения за срок работы элемента до отказа — N_0 и учитывая, что вероятность появления циклов $P(N_{i,r})$ соответствует вероятности возникновения напряжений $P(N_{i,r}) = P(\sigma_{i,r})$ (см. рис. 4), после простейших преобразований получим выражение для определения ресурса элемента — N_0 :

$$\frac{k}{N_0} = \sum_{i=1}^{N_0} \frac{P(N_{i,r})}{N_{i,r}} = \sum_{i=1}^{N_0} \frac{P(\sigma_{i,r})}{N_{i,r}}, \quad (1)$$

где k — коэффициент, характеризующий работу элемента в условиях переменного (не стационарного)

характера нагружения; $\sigma_{i,r}$ — напряжения в i -м цикле нагружения (коэффициент асимметрии цикла — r); N_0 — общее число циклов до возникновения дефекта, требующего замены элемента; $N_{i,r}$ — число циклов до возникновения дефекта, требующего замены элемента при напряжениях, если все циклы определяются параметрами $\sigma_{i,r}$; $P(N_{i,r})$, $P(\sigma_{i,r})$ — вероятность (частота) возникновения циклов нагружения с напряжениями $\sigma_{i,r}$ за время работы элемента до возникновения дефекта, требующего его замены.

В процессе работы в пути изменение амплитуд напряжений циклов нагружения элементов стрелочных переводов является непрерывным. С учетом этого, принимая во внимание, что усталостные зависимости в области повреждающих напряжений имеют вид $N_i \sigma_i^m = \text{const}$, где m — параметр, характеризующий усталостную зависимость в области повреждающих напряжений (котангенс угла наклона линии $N = N(\sigma)$ на участке повреждающих напряжений в логарифмических координатах), получим (рис. 4) $f(N_{i,r}) = f(\sigma_{i,r})$, $d(n_i) = m_i d(\sigma_i)$. Тогда зависимости (1) с учетом непрерывности изменения циклов нагружения приобретают вид

$$\frac{k}{N_0} = \int_{\sigma_{\min}}^{\sigma_{\max}} \frac{f(\sigma_{i,r}) m_i d(\sigma_i)}{N_{i,r}} = m \int_{\sigma_{\min}}^{\sigma_{\max}} \frac{f(\sigma_{i,r}) d(\sigma_i)}{N_{i,r}} \quad (2)$$

или

$$N_0 = \frac{k}{m \int_{\sigma_{\min}}^{\sigma_{\max}} \frac{f(\sigma_{i,r}) d(\sigma_i)}{N_{i,r}}}. \quad (3)$$

Наработка T элемента в N циклах нагружения при проходе экипажей с нагрузкой на ось Q составит $T = QN$.

Записав уравнения (3) для двух случаев обращения подвижного состава с различными нагрузками на ось и поделив их одно на другое, получим

$$T_2 = T_1 \left(\frac{Q_2}{Q_1} \right)^{\frac{\int_{\sigma_{\min}}^{\sigma_{\max}} \frac{f_1(\sigma_{i,r}) d(\sigma_i)}{N_{i,r}}}{\int_{\sigma_{\min}}^{\sigma_{\max}} \frac{f_2(\sigma_{i,r}) d(\sigma_i)}{N_{i,r}}}}, \quad (4)$$

где $f_1(\sigma_{i,r})$, $f_2(\sigma_{i,r})$ — распределения циклов напряжений в элементе при эксплуатации в условиях осевых нагрузок подвижного состава соответственно Q_1 и Q_2 .

Таким образом, чтобы спрогнозировать наработку элемента стрелочного перевода в изменившихся условиях, необходимо иметь распределения напряжений в его наиболее нагруженных сечениях при исходных

и изменившихся условиях нагружения (нагрузках на ось) и зависимость $N = N(\sigma)$.

Распределения напряжений в каждом элементе $f_1(\sigma_{i,r})$ могут быть получены в результате натурных динамико-прочностных испытаний стрелочных переводов непосредственно в пути под воздействием подвижного состава с различными нагрузками. Осредненные зависимости $N = N(\sigma)$ можно получить из данных по анализу отказов элементов стрелочных переводов в различных условиях эксплуатационной работы.

Для прогнозирования изменения ресурса стрелочных переводов при повышении нагрузок на ось выполним такой расчет для основных элементов стрелочных переводов — острияков, рамных рельсов, крестовин, рельсов соединительных путей, крестовин и контррельсовых узлов. В качестве объектов исследования рассмотрим широко применяемые в настоящее время стрелочные переводы типа Р65 марки 1/11 на железобетонных брусках в главных путях станций и стрелочные переводы типа Р50 марки 1/9 на деревянных брусках, эксплуатируемые в приемоотправочных путях станций.

Результаты. Распределения напряжений в элементах стрелочных переводов могут быть приняты по результатам испытаний стрелочных переводов при воздействии подвижного состава с нагрузками до 25 т/ось, проведенных в АО «ВНИИЖТ» [10–12]. Такие исследования проводились в последние десятилетия неоднократно. В частности, в 2020–2023 гг. были проведены исследования по изучению работы стрелочных переводов под воздействием тяжеловесных и длинносоставных поездов в условиях Восточного полигона.

Интерпретацию результатов исследования напряжений проведем с учетом того, что распределения напряжений в элементах стрелочных переводов с высокой степенью вероятности аппроксимируются нормальным законом распределения (критерий Пирсона $P(\chi^2) \geq 0,95$) [13].

С учетом этого изменение параметров распределений напряжений в основных элементах стрелочных переводов $f_{25 \text{ т/ось}}(\sigma)$ по отношению к параметрам $f_{23,5 \text{ т/ось}}(\sigma)$ можно охарактеризовать изменением математических ожиданий (средних величин) напряжений и их среднеквадратических отклонений при повышении нагрузок подвижного состава с 23,5 до 25 т/ось. Они изменятся в соответствии с данными, приведенными в табл. 1.

Хорошее соответствие полученных в испытаниях распределений напряжений в наиболее нагруженных сечениях основных элементов стрелочных переводов нормальному закону позволило оценить максимальные вероятные значения напряжений (с вероятностью непревышения 0,994), сопоставив их с нормируемыми наибольшими величинами.

Таблица 1

Изменение параметров распределений напряжений в наиболее нагруженных сечениях основных элементов стрелочных переводов при повышении нагрузок на ось вагонов с 23,5 до 25 т

Table 1

Stress distribution trends in the most stressed cross-sections of the main elements of turnout switches at increase of wagon axle loads from 23.5 to 25 tons

Вид перевода, условия работы	Элемент	Математическое ожидание σ_{cp}	Среднеквадратическое отклонение S_{σ}
Р65, железобетонное основание, главные пути	Острики	1,08	1,02
	Рамные рельсы	1,08	1,04
	Литая часть крестовин	1,11	1,08
	Рельсы соединительных путей	1,10	1,04
	Контррельсы	1,05	1,00
Р50, деревянные бруска, приемоотправочные пути	Острики	1,12	1,02
	Рамные рельсы	1,10	1,03
	Литая часть крестовин	1,15	1,05
	Рельсы соединительных путей	1,12	1,16
	Контррельсы	1,05	0,97

В основных элементах стрелочных переводов типа Р65 наибольшие вероятные значения напряжений от воздействия подвижного состава с нагрузками 25 т/ось не превышают нормируемых величин: 240 МПа — в рельсовых элементах, 275 МПа — в остриях, 110 МПа — в литой части крестовин и 330 МПа — в контррельсах. У стрелочных переводов типа Р50 основные элементы нагружены в значительно большей степени. Под воздействием подвижного состава с нагрузками 25 т/ось наибольшие вероятные значения напряжений в них превышают нормируемые величины: на 10–15 % — в рельсовых элементах, 5–17 % — в остриях, 18–22 % — в литой части крестовин и на 5–7 % — в контррельсах.

Зависимости $N = N(\sigma)$ получены из данных по анализу отказов элементов стрелочных переводов, на основании которых установлены нормативные сроки службы стрелок и крестовин, приведенные в [14].

В качестве примера ниже приведены результаты расчетов по описанной выше методике для условий эксплуатационной работы — грузонапряженность по главным путям 80–100 млн т·км на км в год, по приемоотправочным путям — 40–50 млн т·км на км в год, соотношение грузопотоков по прямому и боковому путям 0,75/0,25 (табл. 2).

Таблица 2

Изменение средней наработки до отказа основных элементов стрелочных переводов при повышении нагрузок на ось вагонов с 23,5 до 25 т

Table 2

Trends of mean time to failure of the main turnout switches elements under increasing wagon axle loads from 23.5 to 25 tons

Вид перевода, условия работы	Элемент перевода	Средняя наработка до отказа относительно 23,5 т/ось, ед.
Р65, железобетонное основание, главные пути	Остряки	0,90
	Рамные рельсы	0,91
	Стрелка в целом (ремкомплект)	0,90
	Конструктивная прочность крестовин	0,86
	Общая наработка крестовин до отказа	0,88
	Рельсы соединительных путей	0,94
	Контррельсы	1,0
	Контррельсовые узлы	0,82
Р50, деревянные брусья, приемоотправочные пути	Остряки	0,85
	Рамные рельсы	0,87
	Стрелка в целом (ремкомплект)	0,86
	Конструктивная прочность крестовин	0,80
	Общая наработка крестовин до отказа	0,83
	Рельсы соединительных путей	0,91
	Контррельсы	1,0
	Контррельсовые узлы	0,80

Как видно из табл. 2, для сохранения действующих в настоящее время ремонтных схем при повышении нагрузок на ось подвижного состава до 25 т необходимо увеличить ресурс элементов стрелки переводов типов Р65 и Р50 соответственно на 10 и 14%. Получить увеличение наработки до отказа элементов стрелки можно за счет более тщательного текущего содержания — своевременного удаления сплывов металла, зашлифовки дефектов, уположения седловин и других мероприятий.

Дополнительным требованием, повышающим ресурс стрелки в целом, является повышение прочности стрелочных башмаков (подкладка с подушкой). Такие башмаки в настоящее время разработаны и находятся в стадии испытаний. Предварительные результаты испытаний показывают, что средний ресурс башмаков, изготовленных по усовершенствованной технологии, возрастет на 15–20%.

Данные, представленные в табл. 2, показывают, что увеличение нагрузок подвижного состава до 25 т/ось потребует увеличения ресурса крестовин типа Р65 на 12%, а типа Р50 на 17%. Особое внимание следует уделить конструктивной прочности литой части крестовин. Ресурс конструктивной прочности крестовин типа Р65 и Р50 необходимо увеличить соответственно в 1,15 и 1,21 раза. Положительный эффект в решении этого вопроса можно получить за счет широкого применения крестовин с приварными рельсовыми окончаниями, разработки крестовин в виде моноблоков с четырьмя рельсовыми окончаниями и других технических решений.

В качестве мероприятий по повышению ресурса крестовин до появления новых разработок следует рекомендовать тщательное соблюдение технологии их текущего содержания — своевременное снятие сплывов металла, уположение неровностей в зоне перекатывания, ликвидацию ступенек в заднем стыке, своевременную наплавку и др.

Ресурс рельсов соединительных путей следует повысить практически пропорционально росту нагрузок на ось.

Каких-либо дополнительных требований к контррельсам при повышении нагрузок на ось до 25 т выдвигать не требуется, однако при повышенных нагрузках следует усилить конструкцию крепления контррельсов в узлах их соединения с опорами (контррельсовыми башмаками), что целесообразнее всего сделать за счет изготовления подкладок усиленной конструкции.

Поддержание стрелочных переводов в работоспособном состоянии при повышении воздействия на них. Система обслуживания стрелочных переводов (система текущего содержания) предназначена для обеспечения безопасного обращения подвижного состава по стрелочным переводам в процессе перевозочной работы. Периодическое обследование геометрии рельсовой колеи стрелочных переводов и дефектоскопия их элементов должны позволять своевременно выявлять и ликвидировать неисправности, препятствующие нормальному перевозочному процессу или требующие введения ограничения скоростей движения поездов.

Периоды между обследованиями стрелочных переводов должны быть такими, чтобы выявление неисправностей носило предупредительный характер. Случаи возникновения неисправностей, развитие которых угрожает безопасности движения поездов, должны выявляться и устраняться своевременно. Для того чтобы обеспечить своевременное обнаружение опасных неисправностей, назначение периодичности обследования стрелочных переводов должно исходить из интенсивности их возникновения и обеспечения требуемой вероятности безотказной работы. В частности, при повышении нагрузок

на ось подвижного состава периодичность обследований стрелочных переводов должна исходить из того, чтобы интенсивность износа и образования (роста) повреждений элементов за период между обследованиями не превышала аналогичных параметров при действующих нагрузках.

Имеющиеся в настоящее время данные по работе стрелочных переводов в эксплуатации показывают, что при обращении по стрелочным переводам подвижного состава с нагрузками на ось до 25 т характер износа и механизм возникновения повреждений не меняются. Изменяются только численные значения скорости износа и интенсивности накопления повреждений. Более того, между отказами по износу и дефектам элементов стрелочных переводов современных конструкций существует устойчивая корреляционная связь с величинами коэффициентов корреляции от 0,78 — для рельсов соединительных путей до 0,94 — для остряков (табл. 3).

Эта корреляционная связь позволяет для получения предиктивных оценок влияния нагрузок на ресурс элементов стрелочных переводов интерполировать и экстраполировать данные о работе этих элементов при обращении действующего подвижного состава с учетом изменения нагруженности элемента (напряжений в наиболее нагруженных сечениях).

Вероятность безотказной работы и интенсивность возникновения неисправностей и отказов элементов стрелочных переводов можно исследовать, опираясь на методы теории надежности^{1,2}.

Распределение отказов в условиях работы под воздействием подвижного состава с повышенными нагрузками можно получить, используя подход, аналогичный использованному при определении ресурса, развернув его по всей совокупности для каждого из рассматриваемых элементов.

Плотность распределения отказов элемента стрелочного перевода в новых условиях работы $f_{\text{нов}}(n)$ получим с использованием данных по распределению отказов в существующих условиях $f_{\text{сущ}}(n)$ и распределений напряжений в существующих $f_{\text{сущ}}(\sigma)$ и новых условиях $f_{\text{нов}}(\sigma)$:

$$f_{\text{нов}}(n) = f_{\text{сущ}}(n) \left[n_0 \int_{\sigma_{\min}}^{\sigma_{\max}} f_{\text{нов}}(\sigma) \sigma_{\text{нов}}^m d\sigma / \int_{\sigma_{\min}}^{\sigma_{\max}} f_{\text{сущ}}(\sigma) \sigma_{\text{нов}}^m d\sigma \right]. \quad (5)$$

Вероятность безотказной работы в новых условиях получим из соотношения (5) по известным зависимостям

$$R(T) = 1 - F(T); F_i(T_i) = P_{\text{ос}} \int_0^{N_i} f_{\text{нов}}(n) d(n), \quad (6)$$

где $R(T)$ и $F(T)$ — вероятность безотказной работы и вероятность отказа на момент наработки T ; $P_{\text{ос}}$ — средняя нагрузка на ось.

Интенсивность отказов $L(T)$ определяется по формуле

$$L_{\text{нов}}(T) = \frac{f_{\text{нов}}(T)}{R_{\text{нов}}(T)}. \quad (7)$$

Для разработки предложений по периодичности осмотров и обслуживания стрелочных переводов в условиях обращения подвижного состава с повышенными нагрузками на ось рассмотрим изменение вероятности безотказной работы и интенсивности отказов, сопоставив значения этих параметров для условий обращения подвижного состава с нагрузками 23,5 и 25 т/ось в приведенном выше примере условий эксплуатации [15].

Для корректности сравнения определим вероятность безотказной работы и интенсивность отказов основных элементов стрелочных переводов при средней наработке (математическом ожидании), соответствующей условиям работы при обращении подвижного состава с нагрузками 23,5 т/ось. Средние значения параметров и среднеквадратические отклонения наработки до отказа получим из распределений $f_{\text{нов}}(n)$. Результаты расчетов сведены в табл. 4.

Из данных таблицы видно, что повышение нагрузок подвижного состава приводит к снижению показателей безотказности основных элементов стрелочных переводов.

Хуже всего обстоит дело с элементами стрелок. Вероятность безотказной работы стрелок у стрелочных переводов типа Р65 при введении в обращение подвижного состава с нагрузками 25 т/ось снижается до 0,29, т. е. в 1,72 раза, а у стрелочных переводов типа Р50 до 0,18, или в 2,78 раза.

Таблица 3

Показатели взаимосвязи между отказами элементов стрелочных переводов по износу и дефектам

Table 3

Indicators of interrelation between turnout switches element failures by wear and defects

Элемент перевода	Коэффициент корреляции
Остряки	0,94
Рамные рельсы	0,88
Рельсы соединительных путей и ходовые рельсы	0,78
Крестовины	0,91

¹ Карпушенко Н. И., Тарпольский Г. Н. Надежность железнодорожного пути : учеб. пособие для студентов вузов. Новосибирск : Изд-во СГУПС, 1989. 103 с.

² Показатели надежности соединений и пересечений рельсовых путей: памятка ОСЖД Р749/1. Варшава, 2015. 19 с.

Таблица 4

Вероятность безотказной работы и интенсивность отказов элементов стрелочных переводов на момент средней наработки до отказа соответствующего элемента при обращении подвижного состава с нагрузкой 23,5 и 25 т/ось

Table 4

Likelihood of failure-free operation and failure rate of turnout switches elements at mean time to failure of the corresponding element for rolling stock with 23.5 and 25 tons/axle load

Элемент перевода	Тип перевода, основание*	Нагрузка на ось подвижного состава, т			
		23,5		25	
		Вероятность безотказной работы	Интенсивность отказов, ед. / на 1 млн циклов	Вероятность безотказной работы	Интенсивность отказов, ед. / на 1 млн циклов
Стрелка	P65, ж.б.	0,5	0,186	0,29	0,349
	P50, дер.	0,5	0,319	0,18	0,817
Рельсы соединительных путей	P65, ж.б.	0,5	0,169	0,38	0,300
	P50, дер.	0,5	0,220	0,32	0,278
Крестовина	P65, ж.б.	0,5	0,347	0,41	0,527
	P50, дер.	0,5	0,469	0,26	1,048
Контррельсовый узел	P65, ж.б.	0,5	0,155	0,44	0,255
	P50, дер.	0,5	0,225	0,39	0,320

* ж.б. — железобетонное основание, дер. — деревянное основание

У рельсов соединительных путей стрелочных переводов типа Р65 вероятность безотказной работы снижается в 1,31 раза, а на переводах типа Р50 в 1,56 раза.

Крестовины стрелочных переводов типа Р65 при нагрузках на ось 25 т имеют вероятность безотказной работы на 12 % ниже, чем при нагрузках 23,5 т/ось. Вызывают озабоченность крестовины стрелочных переводов типа Р50, у которых повышение нагрузок обращающегося подвижного состава до 25 т/ось приводит к снижению вероятности безотказной работы до 0,26, или почти в два раза по сравнению с аналогичным показателем при нагрузках 23,5 т/ось.

Вероятность безотказной работы контррельсовых узлов переводов обоих типов уменьшается на величину около 15 % в основном за счет отказов подкладок с упором (контррельсовых башмаков).

Наиболее важным результатом расчетов являются данные об изменении интенсивности отказов, так как они определяют необходимость изменения периодичности обследований и дефектоскопирования элементов стрелочных переводов с тем, чтобы не пропустить появление дефектов, угрожающих безопасности движения.

Интенсивность отказов стрелок у стрелочных переводов типа Р65 при введении в обращение подвижного состава с нагрузками 25 т/ось возрастает в 1,88 раза, а у стрелочных переводов типа Р50 в 2,56 раза.

У рельсов соединительных путей стрелочных переводов типа Р65 интенсивность отказов увеличивается в 1,78 раза, на переводах типа Р50 в меньшей степени — в 1,26 раза.

У крестовин стрелочных переводов типа Р65 при нагрузках 25 т/ось интенсивность отказов на 52 % выше, чем при нагрузках 23,5 т/ось. Вызывают озабоченность крестовины стрелочных переводов типа Р50, у которых повышение нагрузок обращающегося подвижного состава до 25 т/ось приводит к росту интенсивности отказов более чем в 2,23 раза по сравнению с аналогичным показателем при нагрузках 23,5 т/ось.

Более интенсивно выходят из строя и элементы крепления контррельсовых узлов: в 1,64 раза на стрелочных переводах типа Р65 и более чем в 1,42 раза на переводах типа Р50.

Обобщая эти результаты, необходимо отметить, что для сохранения уровня безопасности периодические осмотры и дефектоскопный контроль металлических частей стрелочных переводов при повышении нагрузок обращающегося подвижного состава до 25 т/ось следует производить на переводах типа Р65 в 2 раза чаще, а на переводах типа Р50 в 2,5 раза чаще, чем при нагрузках до 23,5 т/ось.

Обсуждение и заключение. Результатом повышения показателей воздействия на стрелочные переводы при введении в обращение подвижного состава с нагрузками до 25 т/ось будет сокращение ресурса их элементов и повышение интенсивности их отказов, поэтому в целях обеспечения безопасности движения поездов необходимо реализовать комплекс мероприятий по повышению надежности конструкций.

С учетом необходимости обеспечения обращения уже в настоящее время поездов с повышенными нагрузками и массой такой комплекс должен включать три основных этапа: неотложные мероприятия по обеспечению контроля состояния стрелочных переводов в условиях воздействия подвижного состава с повышенными нагрузками; мероприятия по усилению конструкции стрелочных переводов, которые могут быть реализованы в пути силами линейных эксплуатирующих подразделений; плановую замену стрелочных переводов легкого типа Р50 и устаревших конструкций типа Р65 на специальные типа Р65, предназначенные для работы в условиях обращения подвижного состава с повышенными нагрузками.

На основании проведенного анализа можно сделать следующие выводы:

1. На маршрутах обращения поездов повышенной массы и длины целесообразно предусмотреть плановое усиление конструкций. Для этого вместо стрелочных переводов типа Р50 на деревянном основании при плановой замене предусматривать укладку переводов типа Р65 на железобетонном основании, что будет способствовать повышению скоростного режима и пропускной способности.

2. Для повышения стабильности колеи на стрелочных переводах типа Р50 до замены их на переводы типа Р65 зону стрелки целесообразно усилить тяжкими элементами и увеличить опорные поверхности контррельсов в зоне крестовин за счет увеличения опорной площади подкладок и количества крепежителей подкладок к основанию.

3. В связи с тем, что уровень напряжений в элементах конструкции стрелочных переводов на маршрутах обращения поездов с повышенными нагрузками существенно возрастает, а на переводах типа Р50 превышает допустимый, необходим усиленный контроль за ними, в том числе за счет изменения периодичности осмотров, с целью обеспечить своевременное обнаружение дефектов, угрожающих безопасности движения поездов.

4. В случае выявления дефектов металлических частей стрелочного перевода следует незамедлительно принимать меры в соответствии с указанными в Классификаторе дефектов и повреждений элементов стрелочных переводов.

Благодарности: авторы выражают благодарность рецензентам за полезные замечания, способствовавшие улучшению статьи.

Acknowledgments: the authors express their gratitude to the reviewers for their constructive comments, improving the quality of the article.

Финансирование: авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

Funding: the authors received no financial support for the research, authorship, and publication of this article.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах.

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest and no financial interests in any material discussed in this article.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Обобщение мирового опыта тяжеловесного движения. Конструкция и содержание железнодорожной инфраструктуры / пер. с англ. под ред. С. М. Захарова. М.: Интекст, 2012. 567 с.
2. Zakharov S. M. (transl.) *Summary of the global heavy-weight traffic experience. Structure and maintenance of railway infrastructure*. Moscow: Intext Publ.; 2012. 567 p. (In Russ.).
3. Воробейчик Л. Я. Стрелочные переводы при повышенных осевых нагрузках // Путь и путевое хозяйство. 1990. № 2. С. 15.
4. Vorobeychik L. Ya. Turnouts under increased axial loads. *Railway Track and Facilities*. 1990;(2):15. (In Russ.).
5. Рыбкин В. В., Васильев А. С. Надежность работы крестовин стрелочных переводов при повышенной осевой нагрузке // Тезисы докладов XII научно-технической конференции сотрудников ИРИИТа и специалистов эксплуатации и строительства железных дорог Сибири и БАМа (к 150-летию железных дорог СССР). Иркутск: ИРИИТ, 1987. С. 11–13.
6. Rybkin V. V., Vasil'ev A. S. Reliability of turnout crosspiece operation under increased axial load. In: *Theses of reports of the XII Scientific and Technical Conference of the Irkutsk State Transport University Employees and Specialists of Operation and Construction of Siberian and BAM Railways (to the 150th Anniversary of the USSR Railways)*. Irkutsk: IrIIT; 1987. p. 11–13. (In Russ.).
7. Крысанов Л. Г., Михайлова В. П. Износ переводов с железобетонными брусками // Путь и путевое хозяйство. 1983. № 9. С. 26–27.
8. Krysanov L. G., Mikhaylova V. P. Wear of railway turnouts with reinforced concrete bars. *Railway Track and Facilities*. 1983;(9):26–27. (In Russ.).
9. Глюзберг Б. Э. Система критериев и требований, определяющих скорости движения подвижного состава по стрелочным переводам // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2023. Т. 82, № 3. С. 198–211. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2023-82-3-198-211>. EDN: <https://elibrary.ru/fvoefa>.
10. Glyuzberg B. E. System of criteria and requirements that determine rolling stock velocities along railroad switches. *Russian Railway Science Journal*. 2023;82(3):198–211. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2023-82-3-198-211>. EDN: <https://elibrary.ru/fvoefa>.
11. Желнин Г. Г. Напряженно-деформированное состояние стрелочных переводов и установление допустимых скоростей движения // Подвижной состав и путь в условиях интенсификации работы железных дорог: сб. науч. тр. М.: Транспорт, 1989. С. 77–90. (Труды ВНИИЖТ).
12. Zhelnin G. G. Stress-deformation state of turnouts and establishment of allowable speeds. In: *Rolling stock and track under intensified railway operation: Collection of sci. articles*. Moscow: Transport Publ.; 1989. p. 77–90. (Proceedings of the Railway Research Institute). (In Russ.).
13. Капур К., Ламберсон Л. Надежность и проектирование систем. М.: Мир, 1980. 604 с.
14. Kapur K., Lamberson L. *Reliability in Engineering Design*. Moscow: Mir Publ.; 1980. 604 p. (In Russ.).
15. Коллинз Д. А. Повреждение материалов в конструкциях: анализ, предсказание, предотвращение. М.: Мир, 1984. 624 с.
16. Kollinz D. A. *Damage of materials in structures: analysis, prediction, prevention*. Moscow: Mir Publ.; 1984. 624 p. (In Russ.).
17. Гохфельд Д. А., Чернявский О. Ф. Несущая способность конструкций при повторных нагружениях. М.: Машиностроение, 1979. 263 с.
18. Gokhfeld D. A., Chernyavskiy O. F. *Bearing capacity of structures under repeated loading*. Moscow: Mashinostroyeniye Publ.; 1979. 263 p. (In Russ.).

10. Глюзберг Б. Э. Модельные ряды стрелочной продукции // Транспортное строительство: сб. ст. Третьей Всерос. науч.-техн. конф., Москва, 12–13 апреля 2022 г. М.: Перо, 2022. С. 27–39.

Glyuzberg B. E. Modelling series of turnout products. In: *Transport Construction: Collection of articles of the Third All-Russian Scientific and Technical Conf., Moscow, 12–13 April 2022*. Moscow: Pero Publ.; 2022. p. 27–39. (In Russ.).

11. Королев В. В. Перспективные разработки стрелочных переводов для российских железных дорог // Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути: тр. XIV Междунар. науч.-техн. конф., Москва, 5–6 апреля 2017 г. М., 2017. С. 193–194.

Korolev V. V. Perspective developments of turnouts for Russian railways. In: *Modern issues of design, construction and operation of the railway track: Proceedings of the XIV International Scientific and Technical Conf., Moscow, 5–6 April 2017*. Moscow; 2017. p. 193–194. (In Russ.).

12. Титаренко М. И. Совершенствование конструкции стрелочных переводов // Путь и путевое хозяйство. 2002. № 9. С. 29–30.

Titarenko M. I. Improvement of turnout design. *Railway Track and Facilities*. 2002;(9):29–30. (In Russ.).

13. Митропольский А. К. Техника статистических вычислений. М.: Наука, 1971. 576 с.

Mitropolskiy A. K. *Techniques of statistical calculations*. Moscow: Nauka Publ.; 1971. 576 p. (In Russ.).

14. Руководство по ведению стрелочного хозяйства / А. Б. Косарев [и др.]; ОАО «РЖД», Департамент пути и сооружений, ОАО «ВНИИЖТ». М., 2009. 240 с.

Kosarev A. B., Abdurashitov A. Yu., Glyuzberg B. E., Titarenko M. I., Teytel A. M., Donets V. G. *Turnout facility management guidelines*. Moscow; 2009. 240 p. (In Russ.).

15. Трегубчак П. В. Современные конструкции стрелочных переводов для тяжеловесного движения // Путь и путевое хозяйство. 2023. № 9. С. 14–18. EDN: <https://www.elibrary.ru/qgczir>.

Tregubchak P. V. Modern designs of turnouts for heavy-weight traffic. *Railway Track and Facilities*. 2023;(9):14–18. (In Russ.). EDN: <https://www.elibrary.ru/qgczir>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Борис Эйнихович ГЛЮЗБЕРГ,

д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник, научный центр «Инфраструктура», Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ, 129626, г. Москва, ул. 3-я Мытищинская, д. 10), Author ID: 298472, <https://orcid.org/0000-0003-2430-7894>

Михаил Иванович ТИТАРЕНКО,

канд. техн. наук, научный консультант, научный центр «Инфраструктура», Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ, 129626, г. Москва, ул. 3-я Мытищинская, д. 10), Author ID: 451163

Павел Владимирович ТРЕГУБЧАК,

заместитель директора центра, научный центр «Инфраструктура», Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ, 129626, г. Москва, ул. 3-я Мытищинская, д. 10), Author ID: 779415, <https://orcid.org/0009-0002-1097-9227>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Boris E. GLYUZBERG,

Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief Researcher, Infrastructure Science Centre, Railway Research Institute (129626, Moscow, 10, 3rd Mytishchinskaya St.), Author ID: 298472, <https://orcid.org/0000-0003-2430-7894>

Mikhail I. TITARENKO,

Cand. Sci. (Eng.), Academic Advisor, Infrastructure Science Centre, Railway Research Institute (129626, Moscow, 10, 3rd Mytishchinskaya St.), Author ID: 451163

Pavel V. TREGUBCHAK,

Deputy Director of the Centre, Infrastructure Science Centre, Railway Research Institute (129626, Moscow, 10, 3rd Mytishchinskaya St.), Author ID: 779415, <https://orcid.org/0009-0002-1097-9227>

ВКЛАД АВТОРОВ

Борис Эйнихович ГЛЮЗБЕРГ. Формирование направления исследований, разработка методики работы, выполнение расчетов, участие в формулировке выводов (60%).

Михаил Иванович ТИТАРЕНКО. Проведение наблюдений за работой стрелочных переводов, обобщение результатов эксплуатационных наблюдений, построение распределений отказов элементов, участие в формулировке выводов (25%).

Павел Владимирович ТРЕГУБЧАК. Формулировка цели работы, сбор информации для проведения расчетов, участие в формулировке выводов (15%).

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Boris E. GLYUZBERG. Formulation of research focus, development of research methods, calculations, participation in conclusions drawing (60%).

Mikhail I. TITARENKO. Observation of turnout switches operation, summarising operational observations, plotting element failure distributions, participation in conclusions drawing (25%).

Pavel V. TREGUBCHAK. Formulation of the goal and objectives, collecting information for calculations, participation in conclusions drawing (15%).

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The authors have read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию 21.06.2024, рецензия от первого рецензента получена 24.06.2024, рецензия от второго рецензента получена 05.08.2024, рецензия от третьего рецензента получена 07.08.2024, принята к публикации 12.08.2024.

The article was submitted 21.06.2024, first review received 24.06.2024, second review received 05.08.2024, third review received 07.08.2024, accepted for publication 12.08.2024.

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Оригинальная статья

УДК 629.423.1

EDN: <https://elibrary.ru/clcpok>

Текущее состояние и перспективы развития систем энергооптимального управления электровозами 2ЭС6

С. Г. Истомина, К. И. Доманов✉, А. П. Шатохин, И. Н. Денисов

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС),
Омск, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Введение. Предметом исследования являются текущее состояние и перспективы развития систем энергооптимального вождения поездов грузовыми магистральными электровозами постоянного тока 2ЭС6. Анализ влияния современных тенденций в области энергосбережения и улучшения эффективности использования тяговых энергетических ресурсов на железнодорожном транспорте на тягу поездов показал, что в настоящее время малоисследованными остаются режимы ведения поезда, построенные на методах и алгоритмах машинного обучения и искусственного интеллекта. Основной целью исследования является определение уровня фактического использования систем автоматизации вождения грузовых поездов на участках Урало-Сибирского железнодорожного полигона и его влияние на энергооптимальный график исполненного движения поездов.

Материалы и методы. При решении поставленных задач в работе были использованы основные положения теории тяги поездов, понятия теории автоматизированного управления и диагностики электроподвижного состава, а также статистические методы обработки данных.

Результаты. Сформулирована гипотеза о том, что интеллектуально-адаптивная система поддержки управления подвижным составом с применением методов и алгоритмов машинного обучения и искусственного интеллекта позволит снизить значения удельного расхода электроэнергии локомотивами. Показано, что наиболее целесообразным для построения динамических моделей энергооптимального движения локомотива в режиме реального времени для интеллектуально-адаптивной системы поддержки управления подвижным составом с применением методов и алгоритмов машинного обучения и искусственного интеллекта является использование данных из автоматизированного рабочего места регистратора параметров движения и автоведения грузового локомотива, так как именно эти данные содержат точные значения географических координат, что позволяет синхронизировать измерения по различным поездкам на определенном участке.

Обсуждения и заключение. Применение настраиваемой искусственной рекуррентной нейронной сети на долгой краткосрочной памяти при разработке новых или усовершенствовании уже существующих методов энергоэффективного управления тяговым подвижным составом с поездом позволит модернизировать используемые на локомотивах регистраторы параметров движения. Разработанный авторами алгоритм может лечь в основу создания принципиально новой интеллектуально-адаптивной системы поддержки управления подвижным составом с применением методов и последовательностей машинного обучения и искусственного интеллекта. Дальнейшие исследования будут направлены на разработку технологии построения динамических моделей энергооптимального движения локомотива с поездом в режиме реального времени.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: электроподвижной состав, автоведение, энергооптимальное управление, регистраторы параметров движения, динамические модели, машинное обучение, искусственный интеллект

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Истомин С. Г., Доманов К. И., Шатохин А. П., Денисов И. Н. Текущее состояние и перспективы развития систем энергооптимального управления электровозами 2ЭС6 // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2024. Т. 83, № 3. С. 215–229.

✉ dki35@ya.ru (К. И. Доманов)

© Истомин С. Г., Доманов К. И., Шатохин А. П.,
Денисов И. Н., 2024



TECHNICAL MEANS OF RAILWAY TRANSPORT

Original article

UDK 629.423.1

EDN: <https://elibrary.ru/clcpok>



Current state and prospects of development of energy-optimal control systems for 2ES6 electric locomotives

Stanislav G. Istomin, Kirill I. Domanov✉, Andrey P. Shatokhin, Il'ya N. Denisov

Omsk State Transport University,
Omsk, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The research focuses on the current state and prospects of development of the systems of energy-optimal train driven by freight main line DC electric locomotives 2ES6. An analysis of current trends in energy saving and increasing the efficiency of traction energy resources in railway transport and their impact on haulage of trains shows that train guidance based on machine learning and artificial intelligence remains poorly researched. The study is primarily intended to determine the actual use of automation of goods train driving in the sections of the Ural-Siberian railway proving ground and its impact on the energy-optimal schedule of completed train operations.

Materials and methods. The problem solving involved the basic provisions of the theory of haulage of trains, concepts of the theory of automated control and diagnostics of electric rolling stock, as well as statistical methods of data processing.

Results. The authors hypothesise that a smart adaptive rolling stock control support system with machine learning and AI would reduce the specific power consumption of locomotives. The researchers show that the most feasible way to build real-time dynamic models of energy-optimal locomotive motion for such smart system is to use data from the automated workstation of a freight locomotives motion recorder and auto-drive, as this is the data that contains accurate geographic coordinates to synchronise measurements on trips in a particular section.

Discussion and conclusion. A tunable artificial recurrent neural network on long short-term memory in new or existing improved methods for energy-efficient train rolling stock control would improve the motion recorders used on locomotives. The developed algorithm may form the basis of a fundamentally new smart adaptive rolling stock control support system with machine learning and AI. Further research would be focused on the development of technology for building dynamic models of energy-optimal real-time locomotive movement with train.

KEYWORDS: electric rolling stock, auto-driving, energy-optimal control, motion recorders, dynamic models, machine learning, artificial intelligence

FOR CITATION: Istomin S. G., Domanov K. I., Shatokhin A. P., Denisov I. N. Current state and prospects of development of energy-optimal control systems for 2ES6 electric locomotives. *Russian Railway Science Journal*. 2024;83(3):215-229. (In Russ.).

Введение. Устройства для регистрации параметров движения на локомотивах известны с конца XIX в.: они позволяли измерять и фиксировать скорость тягового подвижного состава. Такие устройства представляли собой короб, внутри которого вращался, с приводом от оси паровоза, круг с механическим самописцем, фиксирующим показание скорости на каждый момент времени. В последующем стали внедряться скоростемеры, фиксация параметров движения в которых велась латунными писцами на бумажной ленте. С распространением автоматической локомотивной сигнализации потребовалось регистрировать параметры ее работы, и локомотивные самописцы были доработаны установкой четырех электромагнитов с писцами. Так появился ленточный модернизированный скоростемер ЗСЛ-2М, который получил наибольшее распространение на электропоездах серий ВЛ10, ВЛ11 и ВЛ80. В конце XX в. на отечественном электрическом подвижном составе начали появляться микропроцессорные контрольно-измерительные устройства для тягового подвижного состава: комплекс средств сбора и регистрации данных (КПД-3); комплексное локомотивное устройство безопасности (КЛУБ). Такие устройства позволяют фиксировать большее количество параметров движения, чем их предшественники, а также вести запись этих параметров на специальный съемный носитель. С появлением тягового подвижного состава нового поколения, оснащенного микропроцессорной системой управления локомотивом, возникла потребность в усовершенствованном бортовом оборудовании контроля и фиксации параметров движения поезда.

На современных магистральных электропоездах постоянного тока серии 2ЭС6 (пришедших на замену электропоездам серий ВЛ10 и ВЛ11), которые начали поступать в эксплуатацию с 2008 г., изначально устанавливались штатные системы информирования машиниста о расписании и параметрах движения поезда (СИМ-ВНИИЖТ) и автоведения (АВ), которые разработали специалисты АО «ВНИИЖТ».

Системы СИМ-ВНИИЖТ и АВ не имели в своем составе аппаратных средств и являлись программным

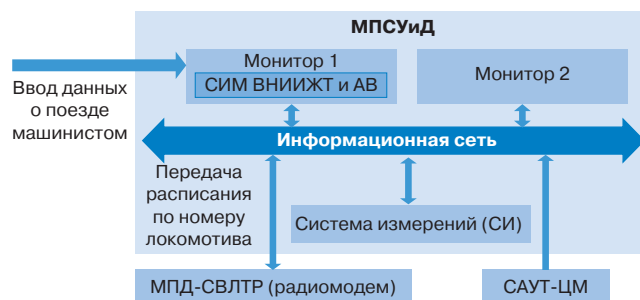


Рис. 1. Структура информационного взаимодействия СИМ-ВНИИЖТ и АВ с аппаратурой электропоезда

Fig. 1. The structure of information interaction of the system informing the driver about the schedule and traffic working parameters and the auto-driving system with electric locomotive equipment

обеспечением, размещенным на вычислителях микропроцессорной системы управления локомотивом и диагностики МПСУиД (разработчик НПО «САУТ», г. Екатеринбург)¹. Структура информационного взаимодействия СИМ-ВНИИЖТ и АВ с аппаратурой электропоезда представлена на рис. 1.

Алгоритмы работы системы АВ позволяют осуществлять адаптивное к условиям движения энергорациональное управление поездами на основе уточняемого в процессе движения сопротивления движению и коэффициента сцепления, контролируя на допустимом уровне значения квазистатических сил сжатия и растяжения, возникающих в автосцепных устройствах подвижного состава. Над такими алгоритмами работали коллективы ученых, которые описали и запатентовали программно-аппаратный комплекс системы управления локомотивом для исследования продольно-динамических усилий в составе соединенного поезда² [1]. Данный комплекс систем позволяет автоматизировать процесс ведения грузовых поездов повышенной массы и длины с распределенными по длине состава локомотивами (сдвоенные поезда) с учетом фактического коэффициента сцепления колес локомотива с рельсами. Ученые из АО «ВНИИЖТ» в своих патентах³ и публикациях [2, 3] предложили решение задачи

¹ Система информирования машиниста о расписании и параметрах движения поезда и автоведения электропоездов 2ЭС6 и 2ЭС10. Инструкция по использованию. М., 2014. С. 19.

² Там же; Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023614606: заявл. 13.03.2023; опублик. 15.05.2023 / Никифорова Н. Б., Худорожко М. В., Елисеев И. А. [и др.]; заявитель Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта; Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020614614 Российская Федерация. Система автоматизированного ведения соединенными поездами по радиоканалу (АВ-РТ): № 2020613554: заявл. 26.03.2020; опублик. 16.04.2020 / Никифорова Н. Б., Худорожко М. В., Елисеев И. А. [и др.]; заявитель Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта; Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018617350 Российская Федерация. Система автоматизированного управления самоходным специальным железнодорожным подвижным составом: № 2018614423: заявл. 04.05.2018; опублик. 22.06.2018 / Мурзин Р. В., Никифорова Н. Б., Худорожко М. В. [и др.]; заявитель Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта.

³ Патент № 2632039 Российская Федерация, МПК В61С 17/12, В60Л 15/32. Система автоматизированного вождения грузовых поездов повышенной массы и длины с распределенными по длине состава локомотивами: № 2016120947: заявл. 27.05.2016; опублик. 02.10.2017 / Алексеев Е. Н., Никифорова Н. Б., Худорожко М. В. [и др.]; заявитель Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта; Патент № 2729157 Российская Федерация, МПК В61С 17/12. Способ и система автоматизированного вождения грузовых поездов повышенной массы и длины с распределенными по длине состава локомотивами: № 2020107345: заявл. 18.02.2020; опублик. 04.08.2020 / Никифорова Н. Б., Худорожко М. В., Елисеев И. А. [и др.]; заявитель ОАО «Российские железные дороги».

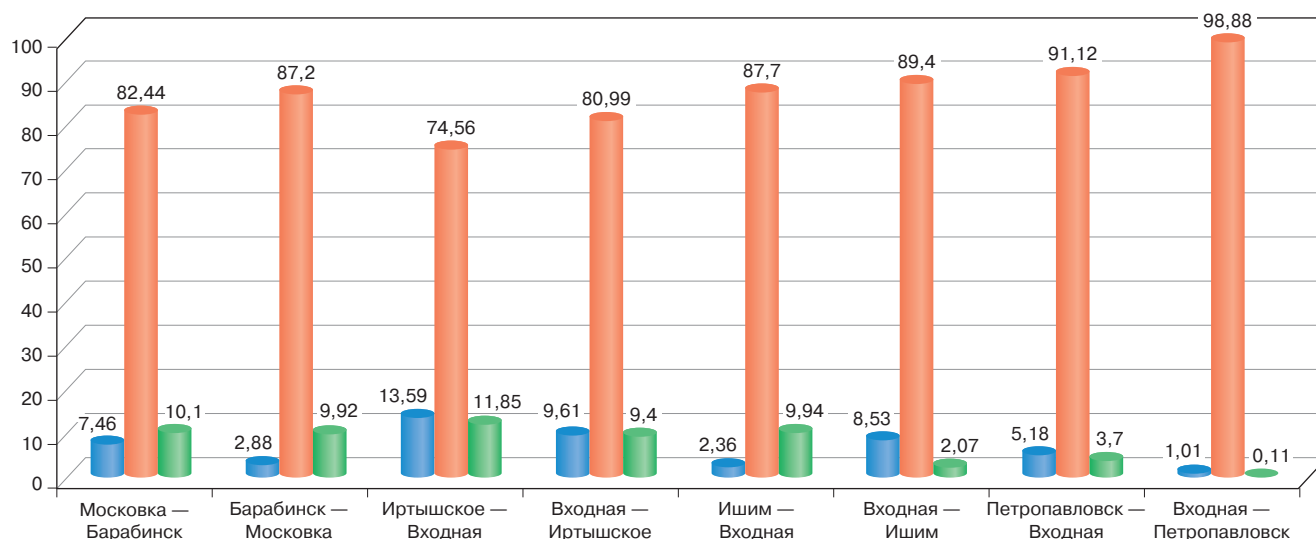


Рис. 2. Доля использования режимов системы автоведения электровозов серии 2ЭС6:

■ — Ручной, %; ■ — Советчик, %; ■ — Автоведение, %

Fig. 2. Share of auto-driving system modes used on 2ES6 electric locomotives:

■ — Manual, %; ■ — Advisor, %; ■ — Auto-driving, %

по определению действующей силы тяги локомотива на поезд в процессе движения, которое позволит повысить эффективность систем автоведения поезда. В работах [4, 5] и свидетельстве № 2018617350⁴ описана стохастическая модель, отражающая зависимость фактической силы тяги локомотива от результатов измерений его кинематических и электрических параметров, что позволяет повысить эффективность использования тягового подвижного состава в эксплуатации за счет текущего уточнения удельного сопротивления движению в пути следования.

Как показал анализ данных об использовании режимов (рис. 2), система автоведения электровоза 2ЭС6 преимущественно использовалась в режиме «Советчик» — более 80 % времени. В «чистом» виде автоведение применялось не более 12 % времени.

Стоит отметить, что штатная система автоведения электровоза 2ЭС6, разработанная АО «ВНИИЖТ» совместно с НПО «САУТ», с 2016 г. постепенно начала замещаться на усовершенствованное, интегрированное с новыми системами управления перевозками, фиксирующее большее количество параметров за поездку программное обеспечение интеллектуальной системы автоматизированного вождения поездов повышенной массы и длины с распределенными по длине локомотивами (ИСАВП-РТ), которая была разработана компанией ООО «АВП Технология» (ранее — ЗАО «Отраслевой центр внедрения новой техники и технологий») совместно с АО «ВНИИЖТ» и МИИТ. Научные заделы по реализации данной системы формировались с начала 2000-х гг. и изложены в патентах^{5–10} и трудах [6–15], которые

⁴ Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018617350 Российская Федерация. Система автоматизированного управления самоходным специальным железнодорожным подвижным составом: № 2018614423; заявл. 04.05.2018; опубл. 22.06.2018 / Мурзин Р. В., Никифорова Н. Б., Худорожко М. В. [и др.]; заявитель Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта. EDN: <https://elibrary.ru/ygbial>.

⁵ Патент № 2238860 Российская Федерация, МПК В61С 17/12. Система автоматизированного вождения грузовых поездов повышенной массы и длины с распределенными по их длине локомотивами: № 2003132808/11; заявл. 12.11.2003; опубл. 27.10.2004 / Рабинович М. Д., Мугинштейн Л. А., Кривой А. М. [и др.]; заявитель Отраслевой центр внедрения новой техники и технологий.

⁶ Патент № 2252167 Российская Федерация, МПК В61С 17/12, G08G 1/00. Сетевой модуль связи по радиоканалу (СМРК) для системы автоматического управления поездом с распределенными по его длине локомотивами: № 2004124233/11; заявл. 11.08.2004; опубл. 20.05.2005 / Рабинович М. Д., Кривой А. М., Галченков Л. А. [и др.]; заявитель Отраслевой центр внедрения новой техники и технологий.

⁷ Патент № 2487036 Российская Федерация, МПК В61L 27/00. Устройство построения энергосберегающих графиков движения поездов: № 2011153812/11; заявл. 28.12.2011; опубл. 10.07.2013 / Мугинштейн Л. А., Ляшко О. В., Анфиногенов А. Ю., [и др.]; заявитель и патентообладатель ОАО «Российские железные дороги».

⁸ Эльбрус. Инновации: уверенное движение: [сайт]. М., 2023. URL: <https://elbrus-r.ru/razrabotki/as-energoserber> (дата обращения: 30.09.2023).

⁹ АВП Технология: [сайт]. М., 2023. URL: <https://avpt.ru> (дата обращения: 30.09.2023).

¹⁰ Патент № 2299144 Российская Федерация, МПК В61L 3/00. Система автоматизированного ведения грузового поезда: № 2005122634/11; заявл. 19.07.2005; опубл. 20.05.2007 / Аршавский А. В., Донской А. Л., Мугинштейн Л. А. [и др.]; заявитель и патентообладатель АВП-Технология.

посвящены технологии организации движения грузовых поездов на укрупненных полигонах железнодорожной сети. Ее основу составляет созданная в АО «ВНИИЖТ» автоматизированная система построения суточных графиков движения поездов с энергооптимальными перегонными временами хода — аппаратно-программный комплекс (АПК) «Эльбрус».

В состав корпоративного инвентарного электровазозного парка эксплуатационного локомотивного депо ТЧЭ-2 Омск Западно-Сибирской дирекции тяги — структурное подразделение Дирекции тяги — филиала ОАО «РЖД» входит 250 электровазозов серии 2ЭС6. Монтаж программного обеспечения системы ИСАВП-РТ проходил этапами с 2016 г. К 2024 г. 84% приписного парка электровазозов 2ЭС6 были оборудованы новым программным обеспечением.

В основе оптимизации траектории движения ИСАВП-РТ лежит принцип максимума Л. С. Понтрягина, который используется в теории оптимального управления для нахождения наилучшего возможного управления для перевода динамической системы из одного состояния в другое, особенно при наличии ограничений на состояние или входные элементы управления. При расчетах используется метод последовательных приближений, в котором на каждом шаге вычислительного процесса строится допустимое приближенное решение задачи с расходом энергии меньшим, чем на предыдущем шаге, что дает возможность остановки процесса вычислений, как только расход энергии на полученном шаге приближения станет близким к оптимальному с приемлемой точностью [16]. Задача оптимального управления поездом в данной постановке описывается следующими выражениями:

$$\frac{dJ(s)}{ds} = u_F(s)U_{F_{\max}}(V(s)); \quad (1)$$

$$\frac{dt(s)}{ds} = \frac{1}{\sqrt{V(s)}}; \quad (2)$$

$$\frac{dV(s)}{ds} = 2[-W(s, V(s)) + u_F(s)U_{F_{\max}}(V(s)) - u_B(s)U_{B_{\max}}(V(s))]; \quad (3)$$

$$J(0) = 0, \quad t(0) = 0, \quad V(0) = V_0; \quad (4)$$

$$t(S) = F, \quad V(S) = V_F, \quad 0 \leq s \leq S. \quad (5)$$

Здесь переменными являются путь s , затраты топливно-энергетических ресурсов $J(s)$, время t и $V(s)$ — квадрат скорости, которому пропорциональна кинетическая энергия поезда. Сила тяги F , торможения B и сопротивления движению W принимаются в расчете на единицу массы поезда с учетом инерции вращающихся масс. U — дифференцируемые по скорости функции, u — коэффициенты управления, S — длина участка.

Был проведен анализ использования машинистами локомотивов 2ЭС6 автоведения поезда на исследуемых железнодорожных участках по данным АРМ РПДА-Г с помощью функции «Пакетная выгрузка». Всего было проанализировано свыше 80 тыс. поездок в четном и нечетном направлениях с использованием первичного метода обработки математико-статистического анализа данных. На рис. 3 показано, что на участках эксплуатационного локомотивного депо Омск машинисты на электровазозах 2ЭС6 преимущественно пользуются режимом подсказки, в среднем около 70 % от пройденного пути; режим автоведения используют примерно в 30 %.

Анализ данных (рис. 4–7) показывает, что наблюдается достаточно широкая вариативность использования режима автоведения (от 0 до 100 %) с поездами различной массы, что соответствует объемам перевозочной работы и типам обращающихся поездов на исследуемых участках. На тяговых плечах Омск — Иртышское — Омск наиболее часто машинисты используют режим автоведения в диапазоне массы поездов 1800–2200 т, так как на данных тяговых плечах преобладают порожние и контейнерные поезда (рис. 4). На тяговых плечах Омск — Барабинск — Омск обращаются как легкие (порожние и контейнерные), так и тяжеловесные поезда, масса которых более 6000 т или длина более 350 осей. На этих тяговых плечах наблюдается наибольшее использование машинистами системы автоведения в диапазоне массы поездов 1800–6200 т (рис. 5). По своим характеристикам перевозочной работы описанным тяговым плечам аналогичны плечи Омск — Ишим — Омск, которые являются продолжением предыдущих на Транссибирской магистрали, поэтому на них также наблюдается наибольшее использование машинистами системы автоведения в диапазоне массы поездов 1800–6200 т (рис. 6). Тяговые плечи Омск — Петропавловск — Омск по своей перевозочной работе сопоставимы с тяговыми плечами Омск — Иртышское — Омск, поэтому наиболее часто машинисты используют режим автоведения в диапазоне массы поездов 1800–2200 т (рис. 7).

Выполнен анализ данных, представленных эксплуатационным локомотивным депо Омск, касательно доставки на борт локомотива энергооптимального графика движения поезда, который является основой при работе системы ИСАВП-РТ.

Рассматривались поездки локомотивных бригад приписки ТЧЭ-2 Омск, совершивших поездки на локомотивах, оснащенных оборудованием по приемке графика движения поезда на борт локомотива. Период анализа составил три года — с 2021 по 2023 г. Суммарно за указанный период было проанализировано свыше 300 тыс. поездок (таблица).

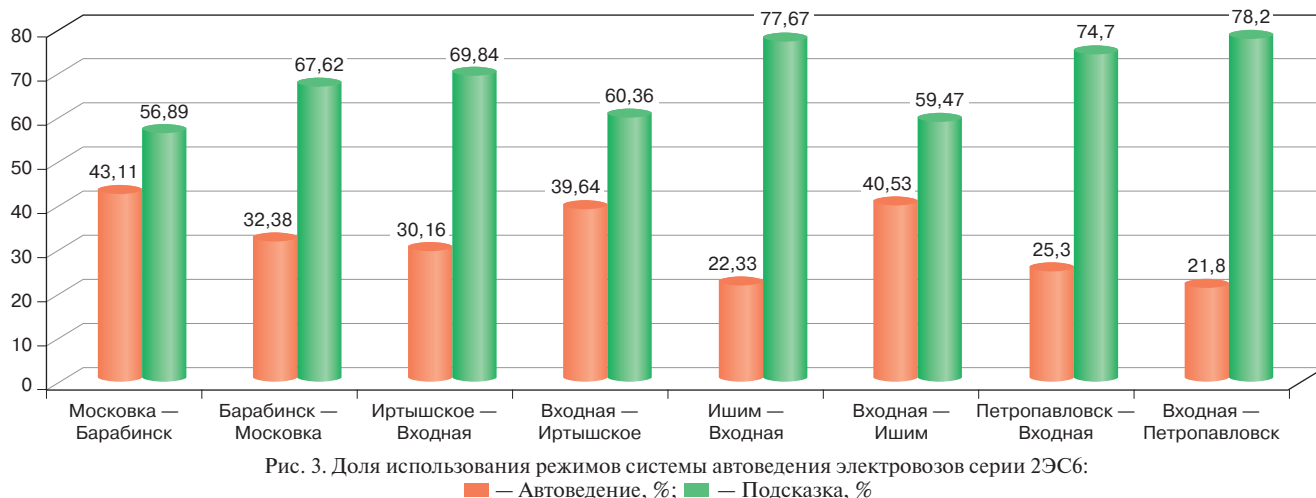


Fig. 3. Share of auto-driving system modes used on 2ES6 electric locomotives:
■ — Auto-driving, %; ■ — Hint, %

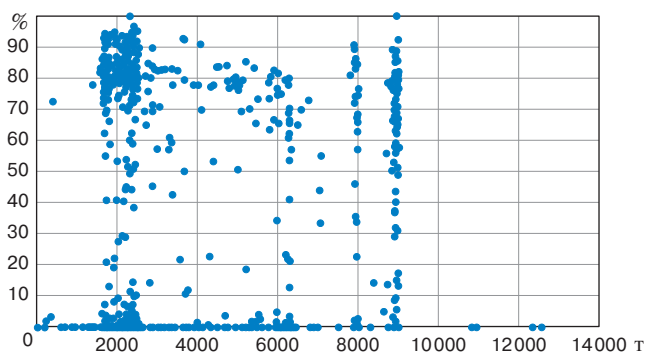


Fig. 4. Averaged auto-driving data on Omsk — Irtyshskoye — Omsk locomotive run

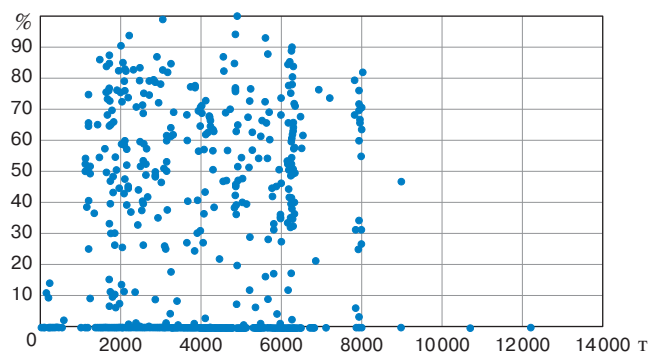


Fig. 6. Averaged auto-driving data on Omsk — Ishim — Omsk locomotive run

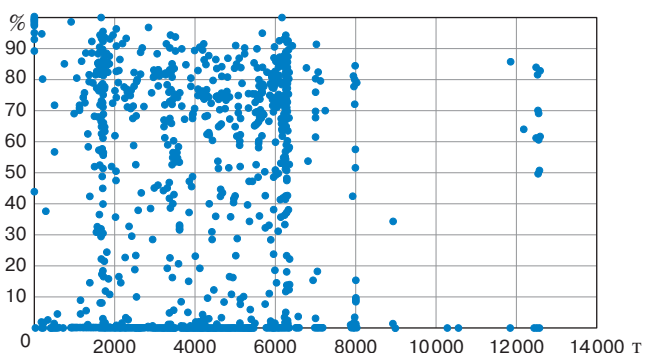


Fig. 5. Averaged auto-driving data on Omsk — Barabinsk — Omsk locomotive run

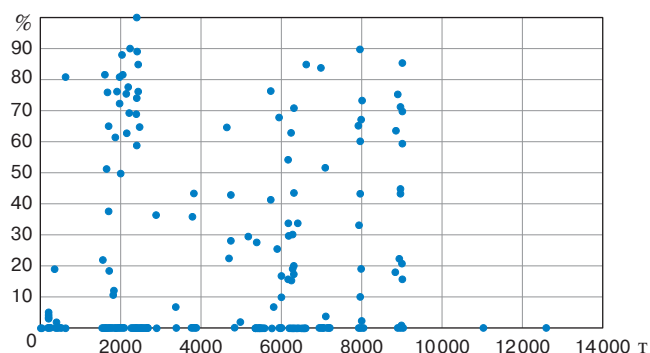


Fig. 7. Averaged auto-driving data on Omsk — Petropavlovsk — Omsk locomotive run

На рис. 8 показана средняя за год доля доставки энергооптимальных расписаний на борт электровоза серии 2ЭС6. Можно сказать, что негативная тенденция недоставки энергооптимальных расписаний на борт локомотива сохраняется.

На рис. 9–14 представлены гистограммы распределений отклонений от доставленных на борт локомотива расписаний в заданном интервале при отправлении поезда и расписаний в заданном интервале при прибытии поезда.

Таблица

Свод данных по количеству поездок и доставки расписаний движения поездов на борт локомотива

Table

Summary of data on the number of trips and delivery of train schedules on board the locomotive

Месяц	2021 г.			2022 г.			2023 г.		
	Всего поездок	Доставлено на борт	Доля доставленных расписаний, %	Всего поездок	Доставлено на борт	Доля доставленных расписаний, %	Всего поездок	Доставлено на борт	Доля доставленных расписаний, %
1	8977	4522	50,4	10 121	7458	73,7	9413	4710	50,0
2	7963	5894	74,0	8384	6058	72,3	8345	4069	48,8
3	9220	6317	68,5	8717	6382	73,2	9193	4534	49,3
4	9397	6263	66,6	8807	6148	69,8	9209	4144	45,0
5	9693	6753	69,7	9128	6380	69,9	9702	3919	40,4
6	9935	6865	69,1	8678	6077	70,0	9045	3731	41,2
7	9969	6961	69,8	8976	6217	69,3	8828	3690	41,8
8	10 288	7088	68,9	9067	5824	64,2	8955	3614	40,4
9	9914	6001	60,5	8541	4162	48,7	7533	2943	39,1
10	9890	6821	69,0	9053	5954	65,8	9048	3566	39,4
11	10 000	6839	68,4	9111	6038	66,3	8574	3412	39,8
12	10 248	7505	73,2	9364	6220	66,4	8217	3629	44,2
Итого	115 494	77 829	67,4*	107 947	72 918	67,5*	106 062	45 961	43,3*

* Среднее значение за год.

Важно отметить, что за трехгодичный период значения отклонений при отправлении поезда находились в интервале от минус 60 до 60 мин, тогда как отклонения при прибытии поезда — в интервале от минус 509 до 1342 мин. Распределения показывают, что отклонения от расписания движения поезда, доставленного на борт, в подавляющем большинстве составляют более 5 мин.

В целом, подводя итоги комплексного анализа, отметим, что алгоритмы, принципы и подходы к разработке и построению данных систем требуют совершенствования в части автоматизации и оперативности принятия решения (доставки расписания на борт и изменения графика движения поезда в режиме реального времени) в условиях изменяющейся поездной обстановки и параметров движения.

Новые тренды и новые подходы к реализации энергооптимальных режимов движения поездов. В соответствии с классификацией [17], приведенной на рис. 15, можно констатировать, что одним из самых недоизученных и недоисследованных методов расчета энергооптимальных режимов ведения поезда является метод, построенный на методах и алгоритмах машинного обучения и искусственного интеллекта.

В настоящее время перспективность развития и использования данных методов обозначена в государственных и отраслевых нормативных документах:

Указ Президента РФ от 28.02.2024 № 145 «О стратегии научно-технологического развития РФ»;

Транспортная стратегия РФ, утвержденная распоряжением Правительства РФ от 27.11.2021 № 3363-р;

Распоряжение ОАО «РЖД» от 05.12.2018 № 1285 «Концепция реализации комплексного научно-технического проекта “Цифровая железная дорога”»;

Распоряжение ОАО «РЖД» от 14.12.2016 № 2537р «Энергетическая стратегия холдинга «Российские железные дороги» на период до 2020 года и на перспективу до 2030 года».

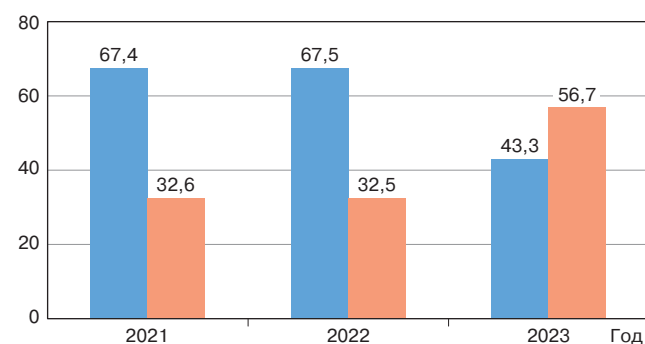


Рис. 8. Доля доставки энергооптимальных расписаний на борт электровоза 2ЭС6:

■ — расписание доставлено на борт; ■ — прочие причины недоставки

Fig. 8. Share of delivery of energy-optimal schedules aboard 2ES6 electric locomotive:

■ — schedule delivered on board; ■ — other reasons for failed delivery

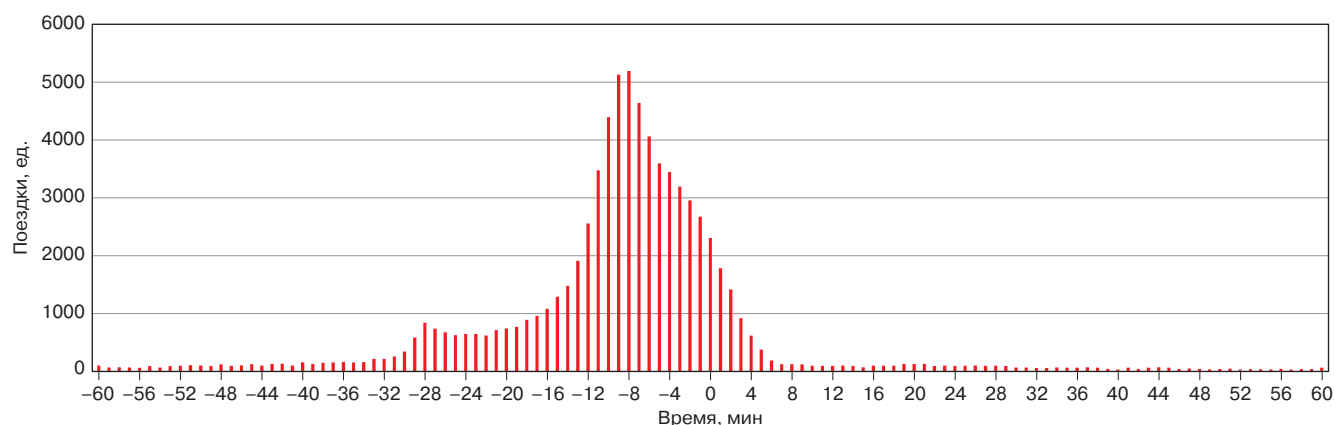


Рис. 9. Гистограмма распределения отклонений времени отправления поезда от доставленных на борт локомотива расписаний движения в заданном интервале за 2021 г.

Fig. 9. Histogram of distribution of train departure time deviations from the schedules delivered aboard the locomotive in the given interval for 2021

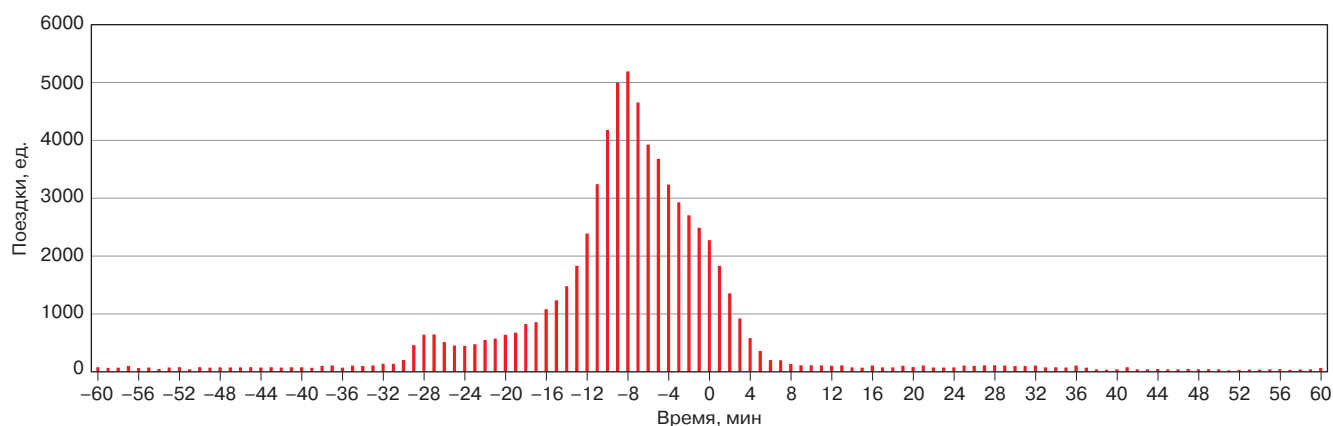


Рис. 10. Гистограмма распределения отклонений времени отправления поезда от доставленных на борт локомотива расписаний движения в заданном интервале за 2022 г.

Fig. 10. Histogram of distribution of train departure time deviations from the schedules delivered aboard the locomotive in the given interval for 2022

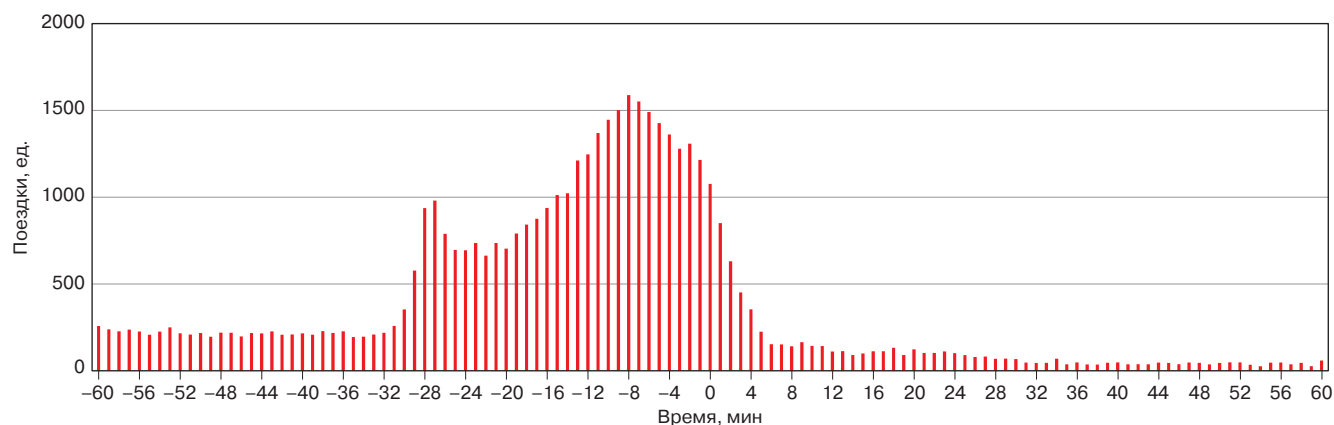


Рис. 11. Гистограмма распределения отклонений времени отправления поезда от доставленных на борт локомотива расписаний движения в заданном интервале за 2023 г.

Fig. 11. Histogram of distribution of train departure time deviations from the schedules delivered aboard the locomotive in the given interval for 2023

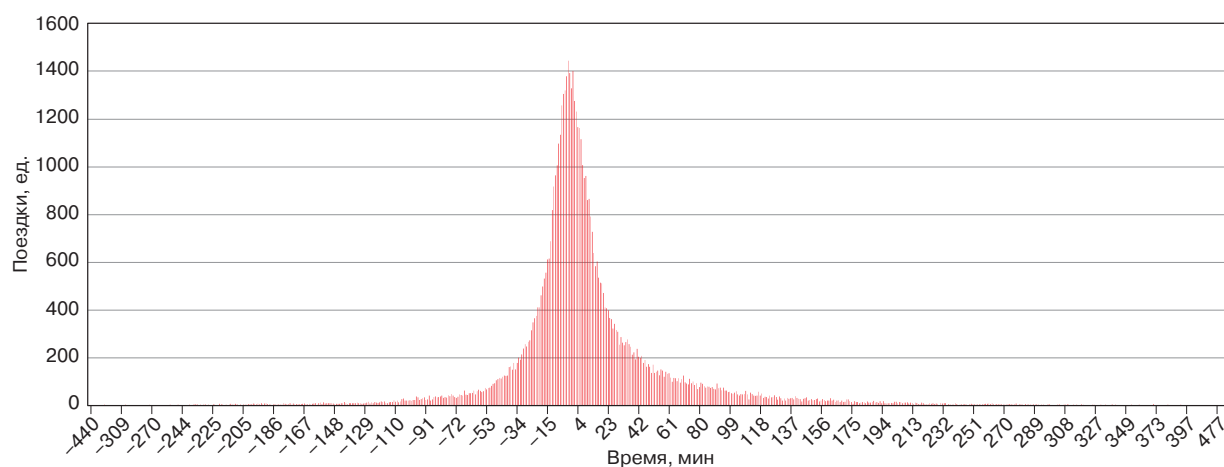


Рис. 12. Гистограмма распределения отклонений времени прибытия поезда от доставленных на борт локомотива расписаний движения в заданном интервале за 2021 г. Составлено авторами по материалам исследования

Fig. 12. Histogram of distribution of train arrival time deviations from schedules delivered aboard the locomotive in the given interval for 2021. Compiled by the authors on the basis of the research materials

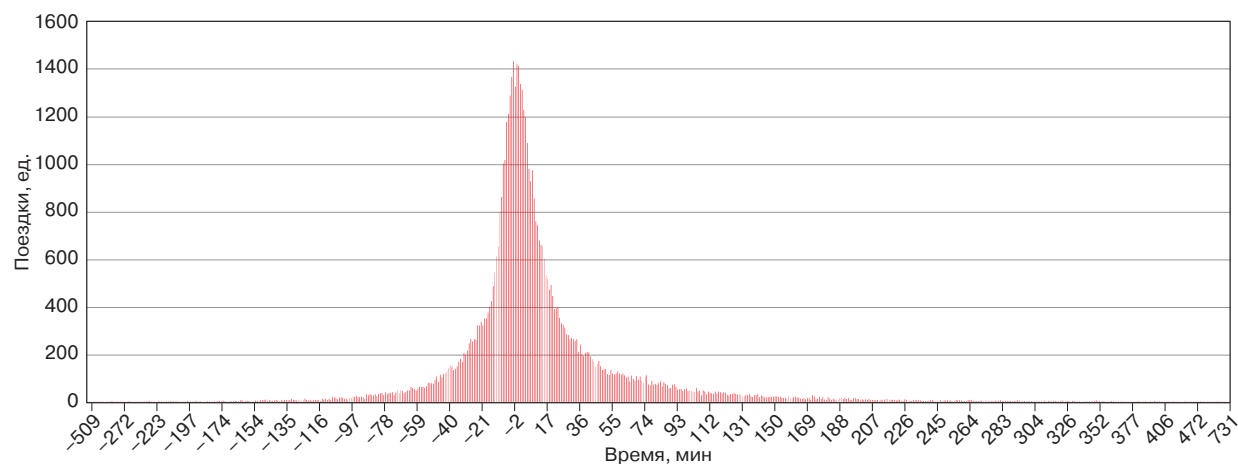


Рис. 13. Гистограмма распределения отклонений времени прибытия поезда от доставленных на борт локомотива расписаний движения в заданном интервале за 2022 г.

Fig. 13. Histogram of distribution of train arrival time deviations from schedules delivered aboard the locomotive in the given interval for 2022

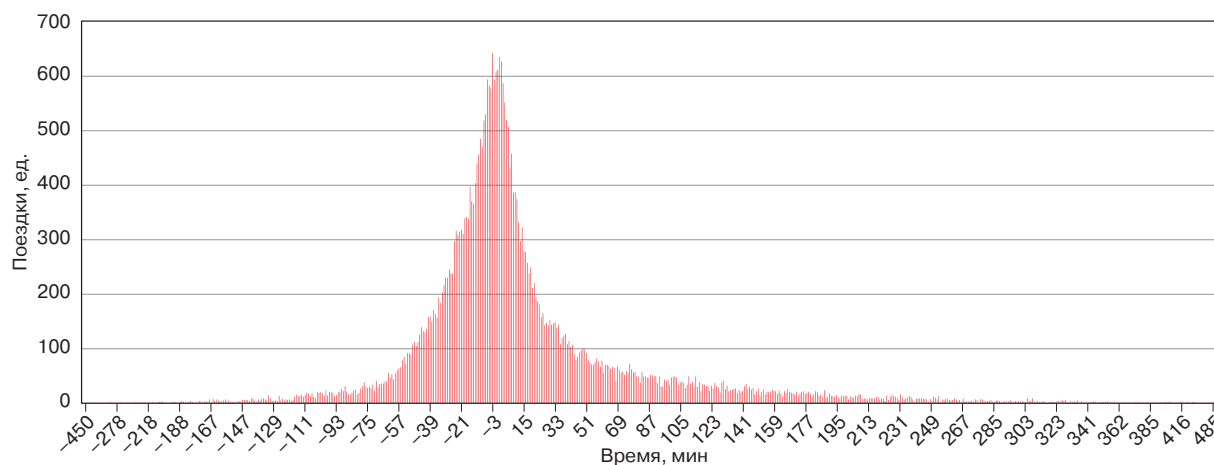


Рис. 14. Гистограмма распределения отклонений времени прибытия поезда от доставленных на борт локомотива расписаний движения в заданном интервале за 2023 г.

Fig. 14. Histogram of distribution of train arrival time deviations from schedules delivered aboard the locomotive in the given interval for 2023

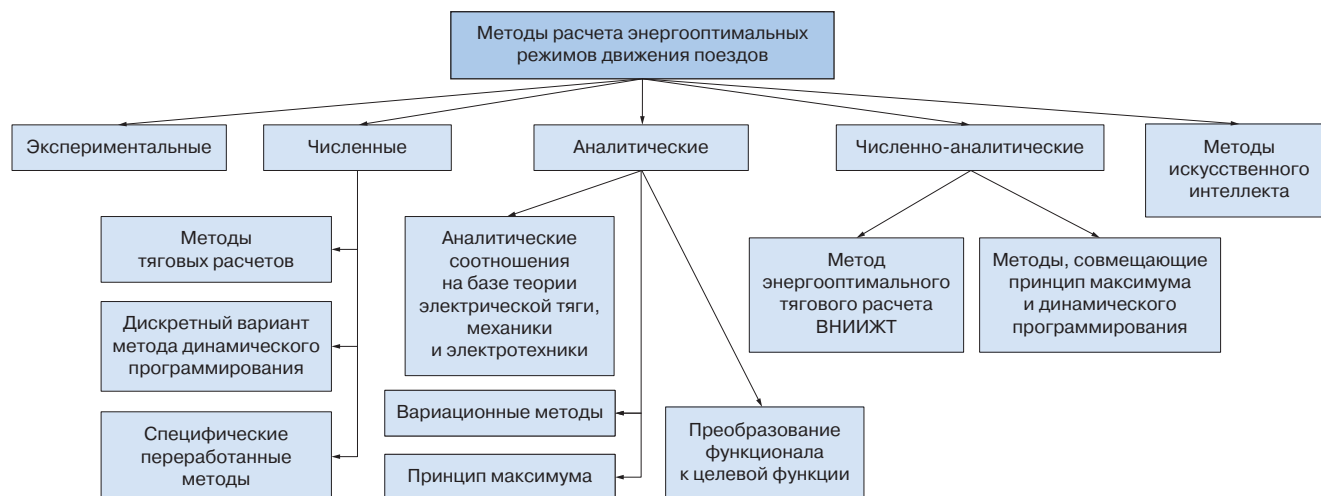


Рис. 15. Классификация методов расчета энергооптимальных режимов движения поездов [17]

Fig. 15. Classification of the methods of calculation of energy-optimal modes of traffic working [17]

Оценка полноты данных с электровозов 2ЭС6.

В целях реализации и использования методов машинного обучения и искусственного интеллекта для построения динамических моделей энергооптимального движения локомотива в режиме реального времени для интеллектуально-адаптивной системы поддержки управления подвижным составом необходимо обладать качественными исходными данными о параметрах движения электроподвижного состава.

Источником исходных данных на электровозе 2ЭС6 являются данные с АРМ РПДА-Г (ООО «АВП Технология») и МСУЛ РПМ (НПО «САУТ»).

Оценим полноту и межсистемную согласованность данных с регистраторов параметров движения. Сбор «сырых» данных с существующих бортовых систем регистрации параметров движения локомотивов 2ЭС6 в ТЧЭ-2 Омск осуществляется в соответствии с положением ОАО «РЖД»¹¹ и разработанным порядком получения, доставки и сдачи маршрутов машиниста, скоростемерных лент, электронных носителей информации и сопроводительных документов к ним в отделение расшифровки.

В соответствии с данным порядком информация, которая фиксируется на картридж на борту локомотива с использованием программного обеспечения системы ИСАВП-РТ, считывается с картриджа специальным считывающим устройством (рис. 16).

Информация, которая содержится на картридже, расшифровывается в отделении расшифровки техниками с помощью АРМ РПДА-Г, которая запускается через АСУТ НБД-2.

Стоит отметить, что на 2ЭС6 система автоведения представляет собой программу в блоке монитора электровоза. На 2ЭС6, в отличие от всех других серий электровозов, у компании АВП «Технология» нет своей системы сбора данных. Все данные о работе тяговых электродвигателей и другие параметры регистрируются и поступают исключительно по данным МПСУиД.

В результате в извлекаемых данных наблюдается следующее:

- фиксируется ток каждой пары электродвигателей;
- не фиксируется ток собственных нужд;
- не фиксируются значения электроэнергии, потребленной на собственные нужды, тягу и возврат электроэнергии в контактную сеть.

С учетом представленных ограничений проведение анализа и разработки энергосберегающих мероприятий по данным РПДА-Г машинистом-инструктором по теплотехнике невозможно без проведения дополнительных трудоемких мероприятий.

Еще одним источником информации о параметрах работы электровозов 2ЭС6 являются файлы РПМ, которые формируются регистратором параметров работы МПСУиД (РПМ).

Стоит отметить, что файлы РПМ не формируются в ТЧЭ-2 Омск и поэтому недоступны для оперативного анализа техникам-расшифровщикам и машинисту-инструктору по теплотехнике. Файлы РПМ поступают только в подразделение НПК СО (дочерняя компания НПО «САУТ»), которое базируется в сервисном локомотивном депо (СЛД) Москва

¹¹ Положение об организации расшифровки параметров движения локомотивов [Электронный ресурс]: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 19.02.2019 № 296р. Доступ из АСПИЖТ.

(СТМ-Сервис). Расшифровка данных файлов осуществляется с помощью программы РПМ.

При этом стоит отметить, что файлы РПМ с электровоза 2ЭС6 поступают в СЛД Москва только с тех электровозов, на которых возникают различные неисправности (как правило, это электровозы, которые заходят на неплановый вид ремонта в депо). Большая же часть файлов РПМ, которая находится на исправных локомотивах, со временем бесследно исчезает, так как объем памяти регистратора параметров движения 2ЭС6 позволяет записывать и хранить информацию не более 7 сут.

После съема файлов РПМ с электровозов 2ЭС6 в подразделении НПК СО проводится расшифровка данных и формируется заключение о причинах отказов того или иного оборудования электровоза 2ЭС6. Информация, представленная в файлах РПМ, никак не используется с точки зрения анализа эксплуатационных показателей работы электровозов 2ЭС6, в том числе анализа энергосберегающих режимов работы.

В целом можно отметить следующие недостатки при расшифровке данных с регистраторов параметров движения 2ЭС6:

- не позволяет определить точное время начала и конца поездки и ее параметры;
- информация файла регистратора не привязана к поездкам локомотивных бригад, что затрудняет их идентификацию без использования данных сторонних систем;
- выгрузка результатов измерений осуществляется по мере изменения электрических параметров;
- не фиксирует значения электроэнергии, потребленной на собственные нужды, тягу и возврат электроэнергии в контактную сеть, с привязкой к конкретной поездке и табельному номеру машиниста;
- пройденное расстояние определяется на основании диаметра бандажа колесной пары, а не по данным системы GPS/ГЛОНАСС;
- отсутствует беспроводная передача данных на сервер сбора информации;
- экспорт производится не всего файла картриджа целиком, а только определенного «фрагмента», причем количество и длина этих «фрагментов» для двух секций одного электровоза могут различаться;
- интервал записи измеряемых величин в экспортируемом файле не является постоянным и в пределах одного временного отрезка может меняться от сотых долей секунды до нескольких минут, причем для двух секций одного электровоза эти временные интервалы не совпадают;
- объема памяти достаточно для хранения информации сроком до 7 сут, после чего данные последовательно перезаписываются на новые;
- сбор данных производится преимущественно перед заходом локомотива на текущий и внеплановый ремонт, в противном случае данные не используются;

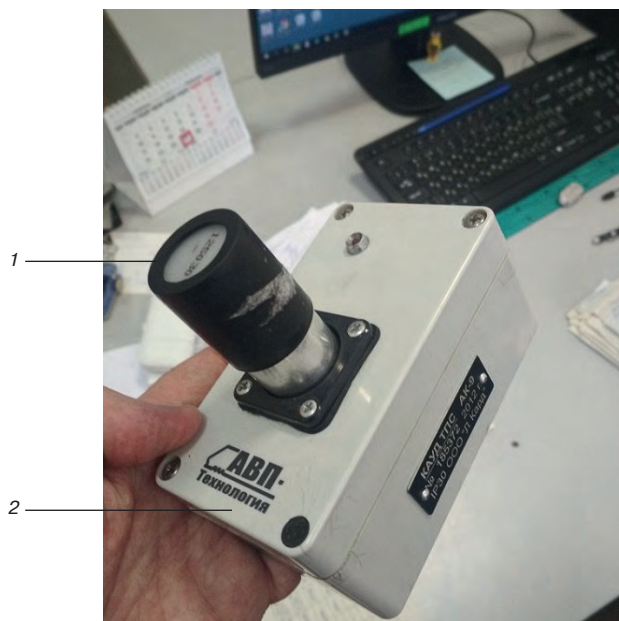


Рис. 16. Картридж с информацией и считывающее устройство ИСАВП-РТ компании АВП «Технология»:
1 — съемный носитель (картридж); 2 — считывающее устройство

Fig. 16. Information cartridge and reading device ISAVP-RT of AVP Technology:

1 — removable medium (cartridge); 2 — reading device

- трудоемкость проведения экспорта, ограниченные возможности пользователя в настройке перечня и формата выходных данных;

- экспорт результатов измерений возможен лишь в формат txt.

На основании проведенных экспериментов по обработке данных с помощью АРМ РПДА-Г и АРМ РПМ можно сделать вывод, что наиболее целесообразным для построения динамических моделей энергооптимального движения локомотива в режиме реального времени для интеллектуально-адаптивной системы поддержки управления подвижным составом с применением методов и алгоритмов машинного обучения и искусственного интеллекта является использование данных АРМ РПДА-Г, так как именно эти данные содержат точные значения географических координат, что позволяет синхронизировать измерения по различным поездкам на определенном участке.

Описание предлагаемого решения на основе машинного обучения и искусственного интеллекта. На основании полученных данных будет сформирована интеллектуально-адаптивная система поддержки управления подвижным составом с применением методов и алгоритмов машинного обучения и искусственного интеллекта. В основе данной системы будет лежать настроенная искусственная рекуррентная нейронная сеть на долгой краткосрочной памяти LSTM (рис. 17) или иная система искусственного интеллекта.

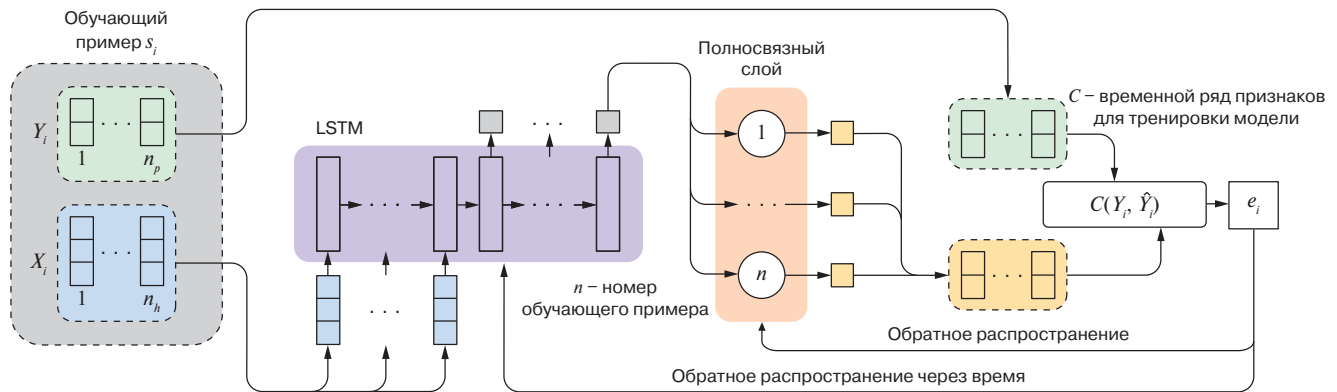


Рис. 17. Структурная схема искусственной рекуррентной нейронной сети на долгой краткосрочной памяти LSTM:
 ■ — обучающий признак; ■ — прогнозируемый признак; ■ — выходные значения LSTM-блока; ■ — прогноз

Fig. 17. Structural diagram of artificial recurrent neural network on long short-term memory LSTM:
 ■ — training feature; ■ — predicted feature; ■ — output values of the LSTM block; ■ — forecast

Для работы системы необходимо обучить нейронную сеть. Для этого используются данные из РПДА-Г, которые можно представить многомерными временными рядами Y_i и X_i [18, 19]. Для обучения модели из описывающего поездку временного ряда методом скользящего окна формируется множество обучающих примеров s_i , каждый из которых представляет собой пару (x, y) . Для формирования x и y производится срез временного ряда X шириной w и из него осуществляется последовательная выборка измерений, после чего окно сдвигается на величину g и формируется следующий обучающий пример. Данная операция повторяется до достижения необходимого количества примеров либо до исчерпания измерений. Ширина окна w определяется по следующей формуле:

$$w = w_h + w_p + g, \quad (6)$$

где w_h — ширина окна тренировки, определяющаяся как $w_h = (n_h - 1)s_h + 1$; w_p — ширина окна прогноза, определяющаяся как $w_p = (n_p - 1)s_p + 1$; g — ширина отступа между окнами тренировки и прогноза; n_h — число наблюдений в тренировочном окне; s_h — ширина отступа между тренировочными наблюдениями; n_p — число прогнозируемых наблюдений в обучающем примере; s_p — ширина отступа между прогнозируемыми наблюдениями.

Отличие предлагаемой авторами системы от существующих заключается главным образом в ее способности обрабатывать информацию в режиме реального времени без участия оператора (человека) и предлагать вариативные решения поставленных перед ней задач.

Предложенная интеллектуально-адаптивная система будет иметь следующие эффекты:

- позволит на основании реальных данных о работе локомотива выдавать рекомендованные значения уставок силы тяги и торможения;

- позволит проводить оценку удельного расхода электроэнергии локомотивом и оперативно информировать машиниста об эффективности выбранных им технологических режимов эксплуатации;

- последнее, предположительно, позволит (по расчетным данным) снизить значения удельного расхода электроэнергии локомотивами за счет исключения перерегулирования.

Обсуждение и заключение. По итогам проведенного исследования цель работы была достигнута и сформулированы следующие выводы:

1. Анализ эффективности применения систем автоведения электровозов 2ЭС6 показал, что преимущественно используется режим «Советчик» (более 80 %) в системе автоведения АО «ВНИИЖТ»; в системе ИСАВ-РТ ООО «АВТ Технологии» преимущественно используется режим «Подсказка» (более 70 %).

2. Установлено, что от 60 до 40 % энергооптимальных расписаний не доставляется на борт электровоза серии 2ЭС6.

3. Установлено, что за трехгодичный период значения отклонений от расписания движения при отправлении поезда находились в интервале от минус 60 до 60 мин, тогда как отклонения при прибытии поезда — в интервале от минус 509 до 1342 мин. Распределения показывают, что отклонения от расписания движения поезда, доставленного на борт, в подавляющем большинстве составляют более 5 мин.

4. Установлено, что одним из самых недоизученных и недоисследованных методов расчета энергооптимальных режимов ведения поезда является метод, построенный на методах и алгоритмах машинного обучения и искусственного интеллекта.

5. На основании проведенных экспериментов по обработке данных с помощью АРМ РПДА-Г и АРМ

РПМ можно сделать вывод, что наиболее целесообразным для построения динамических моделей энергооптимального движения локомотива в режиме реального времени для интеллектуально-адаптивной системы поддержки управления подвижным составом с применением методов и алгоритмов машинного обучения и искусственного интеллекта является использование данных АРМ РПДА-Г, так как именно эти данные содержат точные значения географических координат, что позволяет синхронизировать измерения по различным поездкам на определенном участке.

6. Сформулирована гипотеза о том, что интеллектуально-адаптивная система поддержки управления подвижным составом с применением методов и алгоритмов машинного обучения и искусственного интеллекта позволит снизить значения удельного расхода электроэнергии локомотивами.

Основным направлением дальнейших исследований является повышение энергетической эффективности магистральных грузовых электровозов путем повышения эффективности их использования за счет совершенствования бортовых систем автоведения и поддержки принятия решений посредством применения интеллектуальных систем выработки оптимальных эксплуатационных режимов.

Благодарности: авторы выражают особую признательность сотрудникам компании ООО «АВП Технология» за содержательные консультации и предоставленную информацию по специфике работы систем автоведения на электровозах 2ЭС6. Благодарим также начальника эксплуатационного локомотивного депо ТЧЭ-2 Омск Максима Геннадьевича Лаптева за возможность проведения глубокого анализа эксплуатационных данных электровозов серии 2ЭС6, оборудованных системой ИСАВРТ-РТ.

Acknowledgments: the authors express gratitude to the employees of the company AVP Technology LLC for the meaningful consultations and information provided on the specifics of the operation of auto guidance systems on electric locomotives 2ES6. We also thank the head of the operational locomotive depot TCHЭ-2 Omsk Maxim G. Laptev for the opportunity to conduct an in-depth analysis of the operational data of electric locomotives of the 2ES6 series equipped with the ISAVPT-RT system.

Финансирование: исследование выполнено за счет гранта ОАО «РЖД» для молодых ученых на проведение научных исследований, направленных на создание новой техники и технологий для применения на железнодорожном транспорте от 31.01.2024 г. № 5549635.

Finding: the research was carried out at the expense of a grant from JSC Russian Railways for young scientists to conduct scientific research aimed at creating new equipment and technologies for use in railway transport dated 31.01.2024. No. 5549635.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах.

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest and no financial interests in any material discussed in this article.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Худорожко М. В., Елисеев И. А., Стельмашенко А. В. Система, обеспечивающая вождение соединенных поездов одной локомотивной бригадой // Вестник Института проблем естественных монополий: Техника железных дорог. 2024. № 1 (65). С. 28–31. EDN: <https://elibrary.ru/kuikgx>.
2. Худорожко М. В., Елисеев И. А., Стельмашенко А. В. Реализация технических решений для вождения соединенного поезда одной локомотивной бригадой (САУ-ОП) // Наука 1520 ВНИИЖТ: Загляни за горизонт: сб. материалов II Междунар. конф., Москва, 24–25 августа 2023 г. М.: Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта, 2023. С. 304–310. EDN: <https://elibrary.ru/aodtgv>.
3. Худорожко М. В., Елисеев И. А., Стельмашенко А. В. Implementation of technical solutions for driving a coupled train by one locomotive crew (SAU-OP). In: *Science 1520 VNIIZhT: Look beyond the horizon: Collection of proceedings of II International conf., Moscow, 24–25 August 2023*. Moscow: Railway Research Institute; 2023. p. 304–310. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/aodtgv>.
4. Худорожко М. В., Елисеев И. А., Муров С. А., Стельмашенко А. В., Лантсов А. П. AV-RT system: heading towards unmanned technologies. *Lokomotiv*. 2020;(2):11–13. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/ywxtad>.
5. Елисеев И. А., Хазов М. С., Худорожко М. В. Оперативное определение фактического коэффициента сцепления колес локомотива с рельсами // Актуальные вопросы развития железнодорожного транспорта: материалы Всерос. науч.-практ. конф. к 75-летию аспирантуры Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта, Москва, 5 июня 2019 г. М.: РАС, 2019. С. 151–159. EDN: <https://elibrary.ru/pvzysp>.
6. Елисеев И. А., Хазов М. С., Худорожко М. В. In-process determination of actual coefficient of traction of locomotive wheels with rails. In: *Major issues of rail transport development: sourcebook of the All-Russian scientific and practical conf. for the 75th Anniversary of the postgraduate programme of the Railway Research Institute, Moscow, 5 June 2019*. Moscow: RAS Publ.; 2019. p. 151–159. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/pvzysp>.
7. Елисеев И. А. Повышение энергоэффективности процесса управления электровозом посредством оперативного уточнения сил тяги и электрического торможения: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07. М., 2013. 26 с. EDN: <https://elibrary.ru/sioirj>.
8. Елисеев И. А. *Increase of energy efficiency of the electric locomotive control by in-process specification of traction forces and electric braking: Cand. Sci. (Eng.) thesis synopsis: 05.22.07*. Moscow; 2013. 26 p. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/sioirj>.
9. Жебрак Л. М., Елисеев И. А. Методика оперативного уточнения действующей силы тяги локомотива на поезд // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. 2012. № 4. С. 38–42. EDN: <https://elibrary.ru/pbeumr>.
10. Жебрак Л. М., Елисеев И. А. Methods of real-time adjustment of tractive effort acting from locomotive to train. *Russian Railway Science Journal*. 2012;(4):38–42. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/pbeumr>.
11. Елисеев И. А. Тенденции развития систем автоведения // Совершенствование электрооборудования тягового подвижного состава: сб. науч. тр. ОАО «ВНИИЖТ» / под ред. В. А. Кучумова, Н. Б. Никифоровой. М.: Интекст, 2011. С. 38–45. EDN: <https://elibrary.ru/spiqit>.
12. Елисеев И. А. Trends in the development of auto-driving systems. In: Kuchumov V. A., Nikiforova N. B. (eds) *Improvement of tractive rolling stock electrical equipment: Collection of scientific works of the Railway Research Institute*. Moscow: Intext Publ.; 2011. p. 38–45. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/spiqit>.

8. Жебрак Л. М., Елисеев И. А. Постановка задачи оперативного уточнения действующей на поезд силы тяги в процессе движения // Перспективные задачи развития железнодорожного транспорта: сб. ст. молодых ученых и аспирантов ВНИИЖТ. М.: Интекст, 2010. С. 35–39. EDN: <https://elibrary.ru/tajeur>.

Zhebrak L. M., Eliseev I. A. Setting of the problem of in-process specification of the traction force acting on the train in motion. In: *Prospects of railway transport development: Collection of articles of young scientists and postgraduates of the Railway Research Institute*. Moscow: Intext Publ.; 2010. p. 35–39. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/tajeur>.

9. Елисеев И. А. Стохастическая модель силы тяги локомотива // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. 2010. № 4. С. 30–33. EDN: <https://elibrary.ru/mvcrxt>.

Eliseev I. A. Stochastic model of locomotive's tractive effort. *Russian Railway Science Journal*. 2010;(4):30-33. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/mvcrxt>.

10. Елисеев И. А., Худорожко М. В., Жебрак Л. М. Метод оценки переменных с минимальной дисперсией // Мир транспорта. 2009. Т. 7, № 1 (25). С. 28–32. EDN: <https://elibrary.ru/jybzh>.

Eliseev I. A., Hudorozhko M. V., Zhebrak L. M. Method of variable estimation with minimum dispersion. *World of Transport and Transportation*. 2009;7(1):28-32. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/jybzh>.

11. Инновационный проект «Эльбрус» / Л. А. Мугинштейн [и др.] // Железнодорожный транспорт. 2013. № 12. С. 18–25. EDN: <https://www.elibrary.ru/rmtbfp>.

Muginshteyn L. A., Vinogradov S. A., Kiryakin V. Yu., Lyashko O. V., Anfinogenov A. Yu., Yabko I. A. Elbrus Innovations Project. *Zhelezнодороzhnyy transport*. 2013;(12):18-25. (In Russ.). EDN: <https://www.elibrary.ru/rmtbfp>.

12. Полигонные технологии движения поездов по графикам на основе автоматизированной системы «Эльбрус» / Л. А. Мугинштейн [и др.] // Железнодорожный транспорт. 2015. № 3. С. 13–19. EDN: <https://elibrary.ru/tkirfp>.

Muginshteyn L. A., Vinogradov S. A., Kiryakin V. Yu., Lyashko O. V., Anfinogenov A. Yu., Novgorodtseva A. V. Polygon technologies of scheduled train traffic based on the Elbrus Automated System. *Zhelezнодороzhnyy transport*. 2015;(3):13-19. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/tkirfp>.

13. Мугинштейн Л. А., Виноградов С. А., Ябко И. А. Энергооптимальный тяговый расчет движения поездов // Железнодорожный транспорт. 2010. № 2. С. 24–29. EDN: <https://elibrary.ru/oyseib>.

Muginshteyn L. A., Vinogradov S. A., Yabko I. A. Energy-optimal traction calculation of train traffic. *Zhelezнодороzhnyy transport*. 2010;(2):24-29. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/oyseib>.

14. Мугинштейн Л. А., Илютович А. Е., Ябко И. А. Энергооптимальные методы управления движением поездов: сб. науч. тр. ОАО «ВНИИЖТ». М., 2012. С. 79. EDN: <https://elibrary.ru/qnxwzz>.

Muginshteyn L. A., Ilyutovich A. E., Yabko I. A. *Energy-optimal methods of train traffic control: Collection of scientific works of the Railway Research Institute*. Moscow; 2012. p. 79. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/qnxwzz>.

15. Мугинштейн Л. А., Илютович А. Е., Ябко И. А. Энергооптимальный тяговый расчет движения поездов // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. 2013. № 6. С. 3–13. EDN: <https://elibrary.ru/tolgrt>.

Muginshteyn L. A., Ilyutovich A. E., Yabko I. A. Minimum energy consumption based train performance calculation. *Russian Railway Science Journal*. 2013;(6):3-13. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/tolgrt>.

16. Современная методология технического нормирования расхода топливно-энергетических ресурсов локомотивами на тягу поездов / Л. А. Мугинштейн [и др.]. М.: ВМГ-Принт, 2014. 144 с. EDN: <https://elibrary.ru/vtzznn>.

Muginshteyn L. A., Molchanov A. I., Vinogradov S. A., Popov K. M., Shkol'nikov E. N. *Modern methodology of technical rationing of fuel and energy consumption by locomotives for train traction*. Moscow: VMG-Print Publ.; 2014. 144 p. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/vtzznn>.

17. Юренко К. И. Исследование методов оптимизации режимов ведения поезда с использованием интеллектуальной имитационной модели // Интеллектуальные системы управления на

железнодорожном транспорте. Компьютерное и математическое моделирование (ИСУЖТ-2018): тр. Седьмой науч.-техн. конф., Москва, 14 ноября 2018 г. М.: Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте, 2018. С. 236–240. EDN: <https://elibrary.ru/sqsnsv>.

Yurenko K. I. Study of methods for optimising train driving modes using a smart simulation model. In: *Smart control systems on railway transport. Computer and mathematical modelling (ISUZhT–2018): Proceedings of the Seventh Scientific and Technical Conf., Moscow, 14 November 2018*. Moscow: Research and Design Institute of Informatization, Automation and Communication on Railway Transport; 2018. p. 236–240. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/sqsnsv>.

18. Cuéllar M., Delgado M., Pegalajar M. An application of non-linear programming to train recurrent neural networks in time series prediction problems. In: Chen C.-S., Filipe J., Seruca I., Cordeiro J. (eds) *Enterprise Information Systems VII*. Dordrecht: Springer; 2007. p. 95–102. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5347-4_11.

19. Zhuang N., Qi G.-J., Kieu T. D., Hua K. A. Rethinking the Combined and Individual Orders of Derivative of States for Differential Recurrent Neural Networks. *ACM Transactions on Multimedia Computing, Communications, and Applications*. 2019;15(3):1-21. <https://doi.org/10.1145/3337928>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Станислав Геннадьевич ИСТОМИН,

канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры подвижного состава электрических железных дорог, Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС, 644046, г. Омск, пр. Маркса, д. 35), Author ID: 847326, <https://orcid.org/0000-0002-5243-1035>

Кирилл Иванович ДОМАНОВ,

канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры подвижного состава электрических железных дорог, Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС, 644046, г. Омск, пр. Маркса, д. 35), Author ID: 950747, <https://orcid.org/0000-0002-2627-4179>

Андрей Петрович ШАТОХИН,

канд. техн. наук, доцент, директор, Институт электрического транспорта и систем энергообеспечения, Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС, 644046, г. Омск, пр. Маркса, д. 35), Author ID: 915992, <https://orcid.org/0000-0001-6259-8018>

Илья Николаевич ДЕНИСОВ,

заведующий лабораториями, кафедра подвижного состава электрических железных дорог, Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС, 644046, г. Омск, пр. Маркса, д. 35), Author ID: 1112608, <https://orcid.org/0000-0001-5951-7328>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Stanislav G. ISTOMIN,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Electrical Railway Rolling Stock Department, Omsk State Transport University (644046, Omsk, 35, Marx Ave.), Author ID: 847326, <https://orcid.org/0000-0002-5243-1035>

Kirill I. DOMANOV,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Electrical Railway Rolling Stock Department, Omsk State Transport University (644046, Omsk, 35, Marx Ave.), Author ID: 950747, <https://orcid.org/0000-0002-2627-4179>

Andrey P. SHATOKHIN,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Director, Institute of Electric Transport and Power Supply Systems, Omsk State Transport University (644046, Omsk, 35, Marx Ave.), Author ID: 915992, <https://orcid.org/0000-0001-6259-8018>

Il'ya N. DENISOV,

Head of Laboratories, the Electrical Railway Rolling Stock Department, Omsk State Transport University (644046, Omsk, 35, Marx Ave.), Author ID: 1112608, <https://orcid.org/0000-0001-5951-7328>

ВКЛАД АВТОРОВ

Станислав Геннадьевич ИСТОМИН. Постановка задач исследования и формулирование методологических основ работы. Планирование экспериментов и обработка полученных результатов (25%).

Кирилл Иванович ДОМАНОВ. Методика определения законов распределения дискретных случайных величин. Редактирование и подготовка текста рукописи (25%).

Андрей Петрович ШАТОХИН. Концепция построения рекуррентной нейронной сети для перспективной системы автоведения (25%).

Илья Николаевич ДЕНИСОВ. Обработка статистических данных с вычислителей микропроцессорной системы управления локомотивом и диагностики и интеллектуальной системы автоматизированного вождения поездов повышенной массы и длины с распределенными по длине локомотивами (25%).

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Stanislav G. ISTOMIN. Setting of the research tasks and formulation of the methodological basis of the work. Planning the experiments and processing of the results (25%).

Kirill I. DOMANOV. Methodology of determination of distribution laws of discrete random variables. Follow-on revision of the text (25%).

Andrey P. SHATOKHIN. The concept of recurrent neural network construction for the prospective auto-driving system (25%).

Il'ya N. DENISOV. Processing of statistical data from the calculators of the microprocessor system of locomotive control and diagnostics and the smart system of automated train handling of increased mass and length with locomotives distributed along the length (25%).

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The authors have read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию 20.06.2024, рецензия от первого рецензента получена 24.06.2024, рецензия от второго рецензента получена 01.07.2024, принята к публикации 28.08.2024.

The article was submitted 20.06.2024, first review received 24.06.2024, second review received 01.07.2024, accepted for publication 28.08.2024.



ПАТЕНТЫ ВНИИЖТ

СПОСОБ УПРАВЛЕНИЯ ПОТОКОМ ВОЗДУХА В ВЕНТИЛЯЦИОННОЙ УСТАНОВКЕ И УСТРОЙСТВО ДЛЯ ЕГО РЕАЛИЗАЦИИ

С. Н. Науменко, А. А. Крылов, П. О. Мусерский

Заявляемые решения относятся к автоматической коррекции рабочего режима преобразователя частоты вентилятора в зависимости от изменения физических параметров воздушного потока при обеспечении заданной скорости. Решения обеспечивают повышение надежности и достоверности учета изменений физических параметров воздушного потока для поддержания заданного расхода воздуха, пропорционального массовому расходу, что позволяет при сохранении нормированного потока воздуха уменьшить потребление электроэнергии. В способе управления потоком воздуха в вентиляционной установке определяют параметры потока воздуха вентиляционной установки, для чего задают образцовое напряжение потока воздуха U_{ref} , измеряют температуру потока воздуха в воздуховоде, его статическое и динамическое давление, на основании которых определяют скорость воздушного потока воздуха, преобразуют ее в напряжение постоянного тока U_v с U_{ref} и

по результатам формируют выходной электрический сигнал, поступающий на преобразователь постоянного напряжения в частоту управления и питания асинхронного двигателя вентилятора в воздуховоде для автоматической коррекции рабочего режима вентилятора, причем устройство управления потоком воздуха в вентиляционной установке содержит преобразователь скорости потока воздуха в напряжение постоянного тока, источник образцового напряжения и усилитель разности напряжений, датчик температуры и датчик динамического давления.

Патент на изобретение RU 2824693 C1, 12.08.2024.

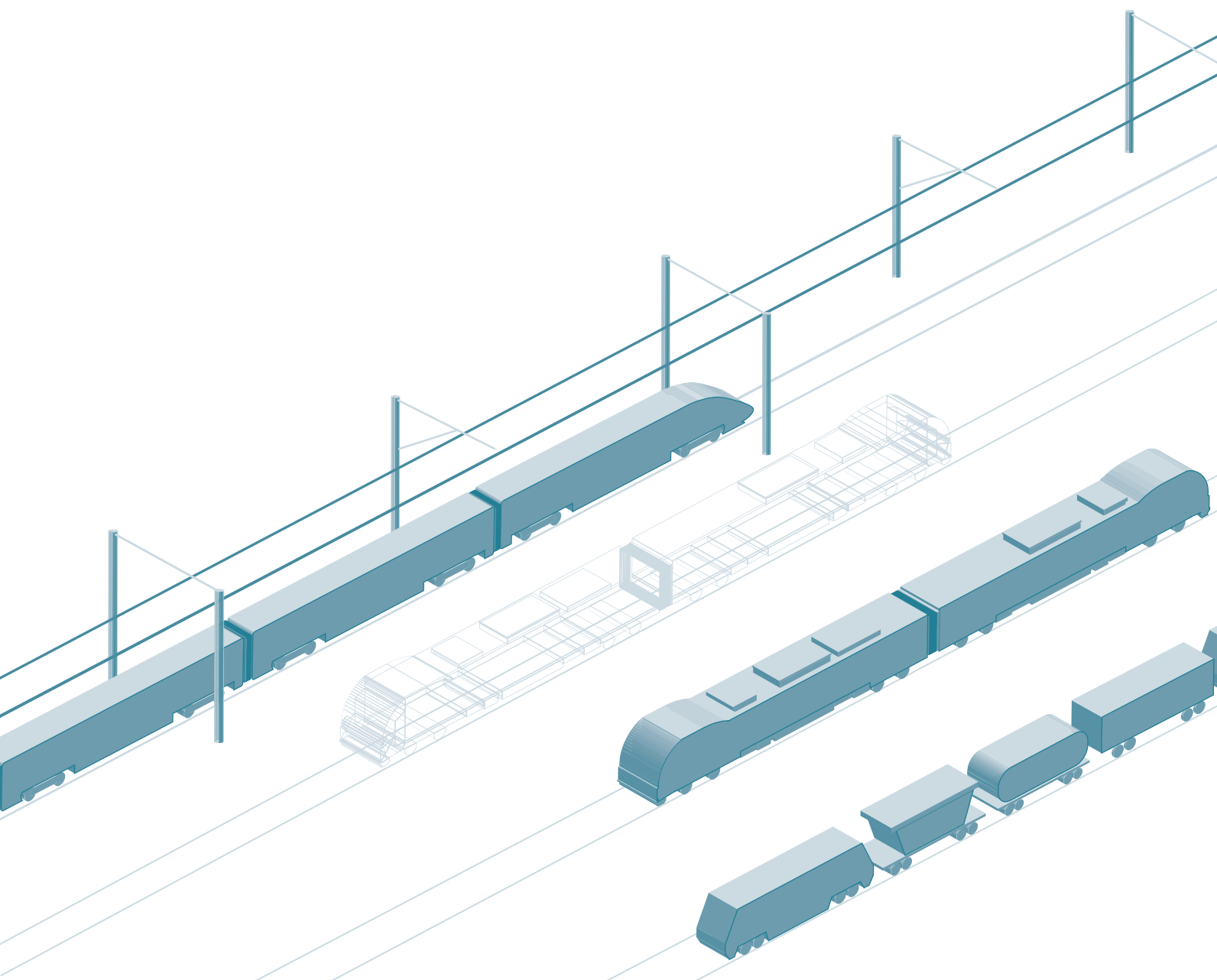
Заявка № 2023118010 от 07.07.2023.

По вопросам использования интеллектуальной собственности обращаться по адресу: 129626, г. Москва, 3-я Мытищинская ул., д. 10, Научно-издательский отдел АО «ВНИИЖТ».

Тел.: (495) 602-83-01, e-mail: journal@vniizht.ru, www.vniizht.ru

УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССАМИ ПЕРЕВОЗОК

TRANSPORTATION PROCESS MANAGEMENT



УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССАМИ ПЕРЕВОЗОК

Оригинальная статья

УДК 656.224:225

EDN: <https://elibrary.ru/rpluup>

Переход к автоматизированным информационно-управляющим системам оперативного управления перевозочным процессом в сети ОАО «РЖД»: постановка задачи

М. И. Мехедов, Е. А. Сотников✉, П. С. Холодняк, С. В. ЛобановНаучно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ),
Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Введение. Для перевозочного процесса характерны непрерывные и часто непрогнозируемые изменения оперативной ситуации на станциях, участках и полигонах сети. Для стабилизации перевозочного процесса требуется принятие оперативных управляющих решений, которые сегодня на основе знаний, опыта, способностей и интуиции принимают диспетчеры и дежурные работники различных уровней с использованием информации, получаемой на автоматизированных рабочих местах от многочисленных информационных систем. Разработка и внедрение автоматизированных информационно-управляющих систем вместо информационных позволит повысить технико-экономическую эффективность оперативного управления перевозочным процессом и расширить зоны управления дежурно-диспетчерского аппарата.

Материалы и методы. Предложено классифицировать факторы, влияющие на перевозочный процесс, на внутренние и внешние. Рассмотрены причины их формирования и характер их воздействия на оперативную работу.

Результаты. Установлены временные параметры на разработку оперативных управляющих решений и доказана необходимость выполнения технико-экономических оценок при выборе рациональных решений. Обоснована этапность внедрения информационно-управляющих систем в части выбора категорий диспетчеров и дежурных работников, автоматизированные рабочие места которых подлежат первоочередной разработке в качестве информационно-управляющих рабочих мест. Рассмотрены условия построения иерархических имитационных моделей работы управляемых объектов для выбора рациональных оперативных управляющих решений на конкретных рабочих местах.

Обсуждение и заключение. Результаты исследования могут служить основой для создания в ОАО «РЖД» программы решения актуальной проблемы перехода от информационных к автоматизированным информационно-управляющим системам оперативного управления перевозочным процессом на сети российских железных дорог.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: железные дороги, перевозочный процесс, неопределенность системы, фактор, оперативные управляющие решения, имитационные модели, информационно-управляющие системы управления

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Мехедов М. И., Сотников Е. А., Холодняк П. С., Лобанов С. В. Переход к автоматизированным информационно-управляющим системам оперативного управления перевозочным процессом на сети ОАО «РЖД» // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2024. Т. 83, № 3. С. 231–247.



TRANSPORTATION PROCESS MANAGEMENT

Original article

UDK 656.224:225

EDN: <https://elibrary.ru/rpluup>



Transition to automated information and control systems for the operational management of transportation in the Russian Railways network: terms of reference

Mikhail I. Mehedov, Evgeniy A. Sotnikov✉,
Pavel S. Kholodnyak, Sergey V. Lobanov

Railway Research Institute,
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Transportation process experiences continuous and often unpredictable changes in the operational situation at stations, sections and proving grounds of the network. Stabilisation of transportation process requires operative control decisions, which today are made by dispatchers and duty workers of various levels on the basis of knowledge, experience, abilities and intuition using information received at automated work stations from numerous information systems. Development and introduction of automated information and control systems instead of information systems will increase technical and economic efficiency of operational management of transportation and expand the control zones of the duty dispatchers.

Materials and methods. The paper proposes to classify factors affecting transportation process as internal and external. It examines the reasons for their formation and the nature of their impact on operational work.

Results. The work establishes time parameters for the development of operational control decisions and proves the necessity of technical and economic evaluations in the selection of rational decisions. The work justifies the stages of implementation of information and control systems in terms of selecting the categories of dispatchers and on-duty workers whose automated work stations are subject to priority development as information and control workplaces. The authors consider the conditions for the construction of hierarchical simulation models of the operation of controlled objects for the selection of rational operational control decisions at specific workplaces.

Discussion and conclusion. The research results can serve as a basis for the Russian Railways to create a programme for solving the urgent problem of transition from information to automated information and control systems for operational management of transportation process on Russian Railways.

KEYWORDS: railways, transportation process, system uncertainty, factor, operational control decisions, simulation models, information and control systems

FOR CITATION: Mekhedov M. I., Sotnikov E. A., Kholodnyak P. S., Lobanov S. V. Transition to automated information and control systems for the operational management of transportation in the Russian Railways network: terms of reference. *Russian Railway Science Journal*. 2024;83(3):231-247. (In Russ.).

✉ baklanova.yuliya@vniizht.ru (E. A. Sotnikov)

© Mekhedov M. I., Sotnikov E. A., Kholodnyak P. S.,
Lobanov S. V., 2024

Введение. Необходимость перехода от информационных¹ к информационно-управляющим системам оперативного управления перевозочным процессом вызвана прежде всего непрерывным и часто трудно прогнозируемым и даже непредсказуемым изменением оперативной эксплуатационной ситуации на станциях, участках и полигонах сети, что согласно теории управления [1–3] характеризуется понятием «неопределенность поведения большой системы».

Следует отметить, что действие внутренних и внешних факторов совсем не означает, что оперативный ход перевозочного процесса является случайным и стихийным. Его течение определяют некоторые условия, к основным из которых относятся: планы перевозок пассажиров и грузов по объемам и маршрутам следования, принятая технология работы ОАО «РЖД», возможности инфраструктуры по пропускной и перерабатывающей способности, плановые размеры тяговых ресурсов. Все эти условия можно считать ограничениями, а перевозочный процесс с учетом оперативной работы следует рассматривать как большую транспортную систему, функционирующую в установленных границах планируемых ограничений в условиях неопределенности.

В таких условиях разрабатываемые в настоящее время основополагающие технологические нормативные документы для управления перевозочным процессом не могут в полной мере служить руководством для посуточной и внутрисуточной организации поездной и грузовой работы, поскольку в них используются постоянные для всего периода действия исходные данные. Так, в нормативном графике движения поездов (НГДП) и месячных технических нормах эксплуатационной работы постоянным является посуточное количество грузовых поездов. В сетевом плане формирования то же относится к вагонопотокам по расчетным назначениям поездов, а в технологических процессах линейных предприятий — время выполнения различных операций с поездами и вагонами и т. п. Фактически же все эти исходные данные являются переменными величинами.

Период действия данных технологических нормативных документов является достаточно длительным. Например, НГДП разрабатывается на летний и зимний периоды, вариантный график движения поездов (ВГДП) — на время производства путевых работ, месячные технические нормативы — соответственно на месяц и т. д. Даже иногда выполняемые корректировки этих нормативных документов, например плана формирования поездов, предусматривают его многосуточное действие при постоянных для всего такого периода исходных данных.

В результате главной задачей основополагающих нормативных документов является выработка принципиальных, длительно действующих технологических положений организации поездной, маневровой и грузовой работы как для линейных подразделений (станции, локомотивные и вагонные депо, дистанции пути и искусственных сооружений и др.), участков, полигонов сети, так и для их взаимодействия между собой, т. е. в конечном итоге разработка технологии работы сети в целом.

Нормативные технологические документы используются для выработки важнейших плановых количественных и качественных показателей перевозочного процесса на месячные и годовые периоды: участковой скорости, передачи вагонов по стыкам, рабочего парка вагонов и локомотивов, контингента локомотивных бригад и др. Однако при текущей организации посуточной и внутрисуточной эксплуатационной работы требуется учитывать не средние или другие постоянные исходные данные, а фактические и прогнозные значения, например, количества поездов, времени их следования по перегонам и участкам, размеров погрузки и выгрузки вагонов на станциях, которые могут существенно отличаться от среднесуточных или любых других постоянных их значений.

Именно неопределенность перевозочного процесса привела к необходимости организации на железнодорожном транспорте специально выделенной и достаточно сложной структуры оперативного управления поездной, маневровой и грузовой работой, которой предписывается разработка сменно-суточных (и на более короткие периоды) планов поездной и грузовой работы и их исполнение. Для этого круглосуточно в диспетчерских центрах и различных пунктах управления работает многотысячный дежурно-диспетчерский аппарат всех уровней управления — линейного, регионального и сетевого.

Главной задачей этого аппарата является выработка всех оперативных управляющих решений (ОУР) по продвижению поездов, локомотивов и вагонов, организации текущего обслуживания и ремонта подвижного состава и инфраструктуры, взаимодействия с клиентурой.

При подготовке ОУР используются указанные выше нормативные технологические документы, но при этом важнейшую роль играет учет складывающихся обстоятельств перевозочного процесса в конкретный период. Поэтому требуется детальная оценка как его фактического состояния, так и, что очень важно, прогнозных состояний эксплуатационной ситуации в результате действия возможных вариантов ОУР.

Отметим также, что нормативные технологические документы вырабатываются с учетом их достаточно

¹ Информационные технологии на магистральном транспорте: учеб. / В. Н. Морозов [и др.]. М.: Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2018. 405 с.

глубокой технико-экономической оценки. НГДП, сетевой план формирования поездов и другие документы разрабатываются на основе уже выполненных многочисленных теоретических исследований, в которых в принимаемых решениях используются не только технологические, но и технико-экономические оценки. Применяется достаточно сложный математический аппарат и программное обеспечение, а конечные результаты получаются на основе расчетов, выполняемых автоматизированными системами.

Подобный порядок, предусматривающий теоретически глубоко обоснованную технологическую и технико-экономическую оценку принимаемых решений, должен безусловно использоваться и при выработке ОУР, что требует по существу разработки многих новых теоретических положений технологии оперативного управления. На их основе необходимо создать автоматизированные информационно-управляющие системы управления перевозочным процессом в оперативном режиме (далее — АИУС) с использованием данных многочисленных действующих в основном информационных систем управления.

Необходимо значительное развитие научных исследований в области оперативного управления. Отметим, что по такому направлению эксплуатационной науки, как оперативное управление, выполнено крайне недостаточно исследований. Следует согласиться с тем, что «разработке нормативных документов посвящено много публикаций, но почти нет исследований, как обеспечить их выполнение» [4]. Непосредственно для выработки ОУР имеются положения о типах некоторых оперативных управляющих воздействий, содержании, показателях и сроках подготовки оперативных планов, районах управления и ответственности различных диспетчеров в диспетчерских центрах, т. е. лиц, принимающих решения (ЛПР)². Развернутый перечень регулировочных мер и передовых приемов в управлении поездной и грузовой работой приведен В. Н. Морозовым³. Предложения по организации оперативной работы с определением методов регулирования хода эксплуатационной работы в региональных диспетчерских центрах управления перевозочным процессом содержатся в [5]. Способы выработки ОУР по регулированию движения поездов

поездными диспетчерами в затрудненных условиях предложены Г. М. Грошевым⁴ и Н. А. Тушиным⁵ и в [6, 7]. Условия повышения стабильности пропуска поездопотоков на основе более полного учета влияния возмущающих воздействий и совершенствования организации информационной среды для выработки ОУР рассмотрены в работе В. В. Каменского⁶ и в [8]. Методы рациональной организации временной отстановки поездов от движения при затруднениях в работе путей необщего пользования предложены в работе П. О. Новикова⁷ и в [9]. Использование технико-экономических оценок при выработке ОУР рассмотрены в [10]. Однако все эти предложения не были реализованы в конкретных алгоритмах, программном обеспечении, а выработка ОУР на основе нормативной технологии, плановых заданий, данных информационных систем, поступающих на автоматизированные рабочие места (АРМ), осуществляется лично диспетчерами и дежурными по управляемым объектам. Причем в основном именно они должны учитывать все виды воздействий, определяющих неопределенность поведения большой системы, которую можно обозначить как «перевозочный процесс в оперативном режиме».

Такое положение сложилось из-за отсутствия до настоящего времени возможности внедрения теоретических разработок по оперативному управлению в практику выработки ОУР дежурно-диспетчерским аппаратом. Соответственно, заказчик (ОАО «РЖД») заключал и продолжает заключать договоры на научные исследования, имеющие практический выход, т. е. на информационное обеспечение выработки ОУР оперативным персоналом. И в этой области (информационного обеспечения) выполнен большой комплекс теоретических исследований и проектных работ с их практическим внедрением в виде сети диспетчерских центров управления различных уровней — сетевого (ЦУП), полигонного (ПЦУП), регионального (ДЦУП), а также станционных центров управления. В каждом центре управления имеются АРМ оперативных работников, обеспечивающие их обширными данными многочисленных информационных систем.

Сегодня развитие фундаментальных исследований по созданию искусственного интеллекта, разработка

² Инструкция по оперативному планированию поездной и грузовой работы в ОАО «РЖД». М.: ОАО «РЖД», 2013. 73 с.

³ Информационные технологии на магистральном транспорте: учеб. / В. Н. Морозов [и др.]. М., 2018.

⁴ Грошев Г. М. Оптимизация диспетчерского управления на железнодорожном транспорте на основе автоматизации в условиях структурной реформы: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.22.08. СПб., 2007. 48 с.

⁵ Тушин Н. А. Построение системы «Автодиспетчер» для управления подводом массовых грузов крупным потребителям: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.08. Екатеринбург, 2004. 177 с.

⁶ Каменский В. В. Методы интеллектуальной поддержки принятия решений в системах управления движением поездов: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.06. Ростов н/Д., 2006. 174 с.

⁷ Новиков П. О. Разработка технологии временного отставления от движения и подъема грузовых поездов: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.08. М., 2014. 133 с.

новых технических решений в области программного обеспечения, а также существенно возросшие возможности вычислительной техники создали условия, когда внедрение информационно-управляющих систем в практику оперативного управления перевозочным процессом становится реальностью.

В целом условия постановки проблемы перехода к информационно-управляющим системам управления перевозочным процессом можно представить на рис. 1.

Как уже упоминалось, научно проработаны и реализованы вопросы управления большой системой «перевозочный процесс» по блокам 3 и 6, и исследования по ним непрерывно продолжаются. В то же время вопросы, представленные в блоках 4 и 7, проработаны крайне недостаточно, а само оперативное управление с выработкой ОУР осуществляется диспетчерским аппаратом с оценками на экспертном уровне.

Рассмотрим далее основные положения, которые требуется учитывать при создании АИУС.

Основные факторы, влияющие на перевозочный процесс. Все факторы, влияющие на оперативный ход перевозочного процесса, делятся на внутренние и внешние (рис. 2).

Ниже дана расшифровка некоторых групп *внутренних факторов*.

1. Предоставление «окон» существенно снижает пропускную и перерабатывающую способность линий. И хотя при этом в нормативном технологическом документе (ВГДП) основные условия работы полигонов учитываются, но всегда возникает много дополнительных воздействий на оперативный ход перевозочного процесса, вызывающих необходимость выработки ОУР: переносы времени предоставления «окон»; отклонения от предусмотренного хода работ; неучтенные в ВГДП дополнительные трудности по регулированию дислокации локомотивов и условий работы технических станций, принимающих сгущенные поездопотоки и др. Дополнительные воздействия на ход перевозочного процесса в период «окон» требуют от диспетчерского аппарата выработки ОУР.

2. Совмещенное движение пассажирских и грузовых поездов технологически предусмотрено в НГДП, но нормативный график не может предусмотреть опоздания пассажирских поездов и, следовательно, необходимость «нагона» расписаний с дополнительными задержками грузовых поездов. Например, на двухпутных линиях каждый обгон вызывает снижение участковой скорости на 0,1 км/ч. При этом статистический анализ и расчеты показали, что если бы все задерживаемые в пути пассажирские поезда в дальнейшем прибывали без «нагонов» на конечные станции, то уровень выполнения графика в пассажирском движении был ниже 90 %. На сети график выполняется



Рис. 1. Схема реализации целевой задачи системы

Fig. 1. System task implementation chart



Рис. 2. Внутренние и внешние факторы, вызывающие неопределенность функционирования системы «перевозочный процесс в оперативном режиме работы»

Fig. 2. Internal and external factors causing uncertainty in the operational performance of the transport system

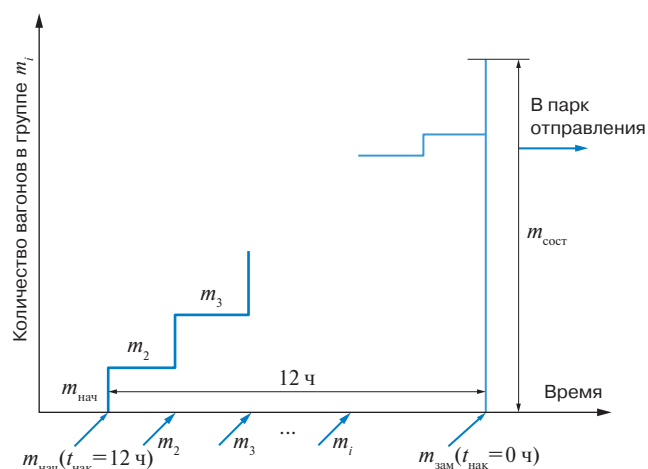


Рис. 3. Процесс накопления составов при среднесуточном образовании два состава в сутки:

$m_{\text{нач}}$ — начальная группа (вагонов); $m_{\text{зам}}$ — замыкающая группа; $m_2, m_3 \dots m_i$ — промежуточные группы; $m_{\text{сост}}$ — длина накапливаемого состава

Fig. 3. Accumulation of trains at average daily formation of two trains per day:

$m_{\text{нач}}$ — initial group (cars); $m_{\text{зам}}$ — closing group; $m_2, m_3 \dots m_i$ — interim groups; $m_{\text{сост}}$ — length of the accumulated train

на уровне 97–98 %, поэтому в условиях совмещенного грузового и пассажирского движения требуется значительное количество «нагонов» с соответствующим влиянием на движение грузовых поездов.

3. Отказы технических средств (ОТС) по пути, подвижному составу и др. происходят вследствие невозможности достижения 100% уровня их надежности. Имеются ОТС, не вызывающие заметных задержек в оперативной работе (например, излом рельса без последствий для подвижного состава на станционном сортировочном пути). В этом случае может потребоваться временное изменение специализации таких путей с дополнительными маневровыми передвижениями. Но это не должно вызывать каких-либо затруднений в оперативной организации поездной работы. Статистически учитываемые ОТС 1–2 категории, вызывающие задержки поездов, возникают как на участках при движении поездов, так и на станциях и требуют принятия ОУР.

4. Технологическими нарушениями (ТН) являются, например, невыдержка времени хода по вине локомотивных бригад, неправильная диспетчерская регулировка поездов на участке, превышение норм времени технической обработки составов на пунктах технического обслуживания (ПТО) вагонов и т. п. Ведется учет таких нарушений, требующих принятия ОУР. К этой же группе следует отнести и нарушения хода перевозочного процесса, связанные с особой технологической необходимостью (например, пропуск по участку сверхграфических размеров движения, следование различного

рода приоритетных поездов, остановки поездов для посадки больных и т. п.). Различные ТН встречаются чаще ОТС и требуют периодического вмешательства дежурно-диспетчерского аппарата в оперативный ход перевозочного процесса.

5. К нарушениям безопасности движения относятся случаи брака в поездной и маневровой работе, аварии и крушения. Такие случаи, как правило, требуют принятия ОУР для стабилизации эксплуатационной работы.

6. Колеблемость временных параметров продвижения различных поездов, составов и вагонов, а также однотипных технологических операций с ними вызывает частое образование оперативных ситуаций, которые не предусмотрены в заранее разработанных нормативных технологических документах. В таких документах определяется лишь порядок оперативной работы в условиях отсутствия отклонений от нормативных требований, что бывает далеко не всегда.

Факторы колеблемости временных параметров возникают вследствие наличия многих переменных условий выполнения стандартных технологических процессов на железнодорожном транспорте. Например, время выполнения технологической операции роспуска составов на сортировочной горке зависит от числа вагонов в составе, количества и длины отдельных отцепов, наличия вагонов с ограничениями по скорости соударений или запрещенных к пропуску через горку, ходовых свойств вагонов и др. Но в технологических процессах станций время роспуска вагонов принимается как постоянная величина, по которой определяются возможности станций по беспрепятственному приему поездов с участков. В результате завышается перерабатывающая способность станций с соответствующими последствиями.

Фактическое время движения каждого поезда по участку зависит от количества обгонов и скрещений конкретного поезда, возможных задержек при проследовании станций, точности соблюдения межпоездных интервалов, возможных случаев ОТС, ТН и др. Однако во всех технологических и прогнозных расчетах время следования вагонов при доставке грузов принимается на основе среднего значения участковой скорости по участку для всех поездов, что во многих случаях не соответствует фактическим данным.

Особенно большим колебаниям подвержено время нахождения конкретных вагонов или их групп на технических станциях при операции «накопление составов». На рис. 3 приведен пример процесса накопления при среднесуточном образовании двух составов в сутки.

В данном случае для начальной группы $m_{\text{нач}}$ среднее время нахождения под накоплением составляет $t_{\text{нак}}(m_{\text{нач}}) = 12$ ч, а для замыкающей группы всегда $t_{\text{нак}}(m_{\text{зам}}) = 0$ ч, т. е. $\Delta t_{\text{нак}} = 12$ ч. При выполнении груженого рейса вагон в среднем проходит более четырех

технических станций с переработкой. Таким образом, только за счет фактора колеблемости периода накопления составов изменение продолжительности движения вагона может достигать $4 \cdot 12 = 48$ ч (2 сут), что, в свою очередь, наряду с другими факторами вызывает фактические колебания поездопотоков на участках со значительными отклонениями их от средних значений и создание ситуаций, требующих принятия ОУР. Возникают сложности и с разработкой прогнозов хода перевозочного процесса.

Рассмотрим некоторые из *внешних факторов* (рис. 2):

1. Предъявляемые к перевозке отправки могут включать один или несколько вагонов или целый маршрут. Количество вагонов в немаршрутизируемых отправлениях не равно среднесуточному значению месячного плана по количеству вагонов, направлениям следования и времени предъявления к отправлению. Так, если за месяц планируется отправить 120 вагонов, то это совсем не значит, что каждые сутки отправляется $120/30 = 4$ вагона в строгой очередности по различным адресам. Величина и назначение следования каждой отправки для отправителя зависят от множества собственных исходных причин — договоров между поставщиками и потребителями, конкретных условий на предприятии по выпуску продукции, наличия порожних вагонов и др. Характер изменения размеров посуточной погрузки — U (вагонов/сут) по сети железных дорог представлен на рис. 4.

Маршрутизируемые отправки также неравномерны по времени предъявления и направлениям следования. Рассмотренные виды неравномерности повышают посуточные колебания размеров движения по участкам.

2. В современных условиях значительны затруднения в работе крупных путей необщего пользования (ПНП), особенно морских портов, что вызывается многими факторами: выполнением договорных условий, подходом судов, емкостью складов, требованиями таможенной службы, затруднениями в работе погрузочно-разгрузочных средств и т. п. В результате возникают трудности с приемом вагонов от железной дороги, образуется избыток вагонного парка на станциях и участках, снижается пропускная и перерабатывающая способность линий.

3. Имеется много собственников и арендаторов вагонного парка, которые практически не согласовывают между собой оперативную работу, а наоборот, находятся в конкурентных условиях. В результате подвоз порожних вагонов к местам массовой погрузки происходит несогласованно и вызывает затруднения в работе железных дорог, особенно в тех случаях, когда создается резерв порожних вагонов. Причем для отстоя такого резерва вагонов используют пути ОАО «РЖД». Как результат — избыток вагонного парка и нарушение нормативной технологии перевозочного процесса.

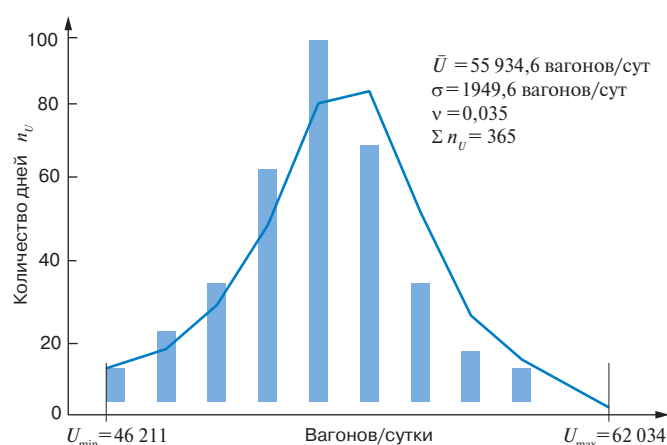


Рис. 4. Распределение размеров сетевой посуточной погрузки на сети ОАО «РЖД» (2021 г.):

σ — среднеквадратическое отклонение; v — коэффициент вариации; $\bar{U}$ — среднесуточная погрузка

Fig. 4. Distribution of daily network loading on the Russian Railways (2021):

σ — standard deviation; v — variation coefficient; $\bar{U}$ — average daily loading

По мнению авторов, остальные группы внешних факторов пояснений не требуют вследствие очевидности последствий их воздействия на перевозочный процесс.

Внутренние и внешние факторы, вызывающие неопределенность поведения перевозочного процесса, обладают тремя общими свойствами:

1) множественность исходных причин проявления факторов.

Например, по позиции ОТС (рис. 2) ведется учет по 64-м факторам. Рассмотрим один из них — неисправность локомотива на станции и в пути следования. В Дирекции тяги причины, вызывающие проявление данного фактора, делятся по деталям и оборудованию локомотива с выделением конкретных причин отказов. В распоряжении ОАО «РЖД» по учету ОТС приведен перечень объектов, элементов и причин отказов (по полному перечню отказов), занимающий более 800 страниц. Подобное положение по множеству исходных причин проявления факторов характерно и для других групп внутренних и внешних факторов. Поэтому в оперативном режиме невозможно рассматривать исходные причины, воздействующие на ход перевозочного процесса. В АИУС может учитываться лишь результат конкретного действия различных факторов.

2) непредсказуемость или затрудненная предсказуемость времени начала действия и степени влияния многих факторов на перевозочный процесс. Это относится, например, к таким группам факторов, как ОТС, ТН, БД, а также к затруднениям в работе крупных выгрузочных районов, неблагоприятным погодным условиям и природным явлениям, неправомерным вмешательствам посторонних лиц.

Детальный анализ условий проявления других групп факторов также указывает на их связь со свойством трудности прогнозирования. Например, факторы группы «Неравномерное предъявление отправок вагонов к перевозке» создают впечатление ясности: отправитель определяет, сколько вагонов будет погружено в плановые сутки согласно суточной заявке на перевозку учетной формы ГУ-12, в которой указано, сколько и в каких направлениях отправляется вагонов. Однако более глубокий анализ этого вопроса показывает, что эти данные не совсем достоверны для прогнозирования поездной и маневровой работы. Во-первых, нередко случаи отказа от заявки или изменения ее содержания. Во-вторых, неизвестно конкретное время окончания погрузки или выгрузки в течение суточного периода. Без таких данных прогноз эксплуатационной ситуации не может быть точным. Углубленный анализ выявляет сложность прогнозирования и по факторам других групп. В результате действие второго свойства внутренних и внешних факторов крайне негативно влияет на разработку ОУР по стабилизации перевозочного процесса. Поэтому требуется разработка новых методов прогнозирования действия различных факторов для максимального снижения уровня их непредсказуемости.

3) краткость выделенного времени для учета действия факторов при выработке ОУР.

Продолжительность выделяемого времени для выработки ОУР может исчисляться секундами, минутами и очень редко может быть немногим более часа. Так, дежурный по станции, часто принимает ОУР по выбору очередности выполнения поездных

и (или) маневровых операций при возникновении враждебных маршрутов. На это действие отводятся секунды. Минутами исчисляется период принятия ОУР поездным диспетчером, например, по постановке на обгон грузового поезда пассажирским, очередности отправления поездов с технических станций и др. Более продолжительным может быть период принятия различных ОУР старшим дорожным диспетчером в ДЦУП или диспетчерами в ЦУП. Продолжительность разработки оперативных планов поездной и грузовой работы на следующие сутки может достигать двух часов.

Учитывая множественность факторов и необходимость использования огромных массивов информации для принятия ОУР, указанные временные параметры являются жестким ограничением при построении АИУС.

На основании вышесказанного можно установить основные условия, которые требуется учитывать при создании АИУС (рис. 5).

Основные особенности перевозочного процесса. При разработке АИУС необходимо учитывать основные особенности оперативного хода перевозочного процесса:

- 1) существенные посуточные колебания вагоно- и поездопотоков, независимых по направлениям движения;
- 2) значительное увеличение рабочего парка вагонов и количества поездов на станциях, участках и полигонах сети в отдельные периоды.

Рассмотрим причины формирования этих особенностей и характер их воздействия на оперативную работу.

Основной внешней причиной посуточной неравномерности вагоно- и поездопотоков является неравномерность посуточной погрузки вагонов, а внутренней — неравномерность продвижении грузовых вагонов на маршруте от отправителя до получателя, выражающаяся в неодинаковом времени проследования различными грузовыми отправлениями отрезков маршрута одинаковой протяженности и маршрута в целом, о чем в статье говорилось ранее, например, за счет изменения периода накопления составов — $t_{\text{нак}}$. В результате этого уровень неравномерности, который имеет место при отправлении вагонов со станций, выполняющих грузовые операции, повышается на каждом последующем участке прохождения полного маршрута отправленными вагонами.

Численная оценка изменения времени следования отправок выполнена на основе данных статистического отчета ОАО «РЖД» формы ЦО-31. Например, в целом по всем грузовым отправлениям различных категорий (групповые, повагонные и др.) за один из месячных периодов 2023 г. при среднем исполненном сроке доставки 6,0 сут 6,3 % отправок имели срок доставки более 11,4 сут.



Рис. 5. Основные условия, требующие учета при создании АИУС

Fig. 5. Main conditions to be considered when creating automated information and control systems for operational transport management

Наглядное представление о причинах формирования посуточной неравномерности грузеных и порожних вагонопотоков и на их основе поездопотоков на направлениях сети, а значит, и на расчетных участках дает рис. 6.

В левой части рисунка показано, что на станциях погрузки количество отправленных вагонов изменяется каждые сутки. Это определяет неравномерность формирования грузеных вагонопотоков. В средней части представлен характер изменения времени доставки отправок на одних и тех же маршрутах, что определяет изменение не только времени продвижения поездов, но и их посуточного количества на участках и маршрутах в целом. В правой части показано, что на станциях выгрузки количество отправленных вагонов также изменяется каждые сутки. В результате образуется посуточная неравномерность порожних вагонопотоков. В целом все это приводит к формированию посуточной неравномерности грузовых поездопотоков на участках и направлениях сети железных дорог.

В исследованиях [11, 12] установлено соответствие посуточных колебаний нормальному закону распределения (при отсутствии крупных нарушений хода перевозочного процесса). По сравнению с периодом плановой экономики СССР в современных условиях уровень колебаний возрос и может быть определен с использованием формулы

$$\sigma_{\text{сут}} = v \bar{N}_{\text{сут}}, \quad (1)$$

где $\sigma_{\text{сут}}$ — среднее квадратическое отклонение суточных поездопотоков, поездов/сут; v — коэффициент вариации; $\bar{N}_{\text{сут}}$ — среднесуточный поездопоток, поездов/сут, при значениях v (табл. 1).

Среднесуточный поездопоток определяется в соответствии с табл. 1.

При нормальном законе распределения известна вероятность $P_{\text{сут}}$ нахождения посуточных значений поездопотока $N_{\text{сут}i}$ в пределах

$$\bar{N}_{\text{сут}} - t\sigma_{\text{сут}} \leq N_{\text{сут}i} \leq \bar{N}_{\text{сут}} + t\sigma_{\text{сут}}, \quad (2)$$

где t — нормированное отклонение.

При $t = 2,5$ $P_{\text{сут}} = 0,95$, что следует признать удовлетворительной точностью в данных расчетах. Тогда, например, для $\bar{N}_{\text{сут}} = 60$ поездов/сут при $\sigma_{\text{сут}} = 60 \cdot 0,115 = 6,9 \approx 7$ поездов/сут возможные и требующие учета в эксплуатационных расчетах пределы посуточных колебаний размеров движения поездов по направлениям движения согласно (2) составят

$$43 \text{ поезда/сут} \leq N_{\text{сут}i} \text{ (при } \bar{N}_{\text{сут}} = 60 \text{ поездов/сут)} \leq 77 \text{ поездов/сут.}$$

Из этих данных следуют два важных вывода для управления оперативной работой.

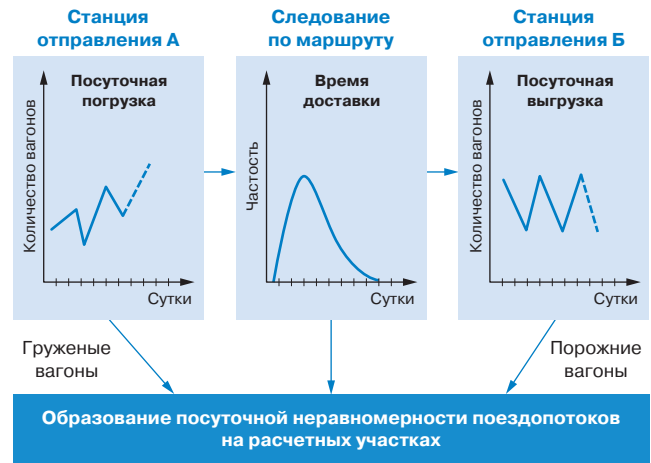


Рис. 6. Причины формирования посуточной неравномерности грузеных и порожних вагонопотоков и грузовых поездопотоков на маршруте А — Б

Fig. 6. Causes of daily irregularity of loaded and empty car traffic volume and freight train traffic on the A — B route

Таблица 1

Величина коэффициента вариации колебаний суточных поездопотоков

Table 1

Variation coefficient of daily train traffic fluctuations

Среднесуточный поездопоток, $\bar{N}_{\text{сут}}$, поездов/сут	15	30	45	60	80 и более
Коэффициент вариации v	0,146	0,133	0,121	0,115	0,113

1. Для пропуска в любые сутки поездов без задержек из-за недостатка пропускной способности линия должна иметь уровень загрузки

$$\frac{\bar{N}_{\text{сут}}}{\bar{N}_{\text{сут}} + 2,5\sigma_{\text{сут}}} 100 \leq 80 \%. \quad (3)$$

Целесообразность обеспечения уровня загрузки участков в пределах 80 % в целях обеспечения эксплуатационной надежности работы участков показана, например, в [12].

В настоящее время и в ближайшей перспективе на наиболее интенсивно используемых направлениях сети протяженностью более 20 тыс. км фактический уровень загрузки выше 80 %. Следовательно, в АИУС должны быть заблаговременно предусмотрены алгоритмы организации перевозочного процесса в условиях задержек поездов из-за недостатка пропускной способности даже при отсутствии воздействия каких-либо факторов (о которых говорилось ранее), снижающих пропускную способность. Разработчикам системы необходимо заранее предусмотреть, каким

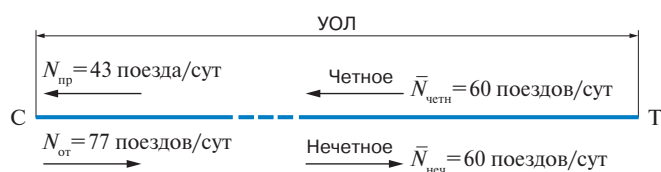


Рис. 7. Пример дисбаланса локомотивов по станции оборота локомотивов С на участке оборота локомотивов (УОЛ) С—Т

Fig. 7. Example of locomotive imbalance at Locomotive Turnover Station C at Locomotive Turnover Section C—T

образом будут определяться размеры снижения возможностей по пропуску поездов и продолжительность такого периода, а также какими могут быть компенсационные меры по сохранению размеров движения или меры по стабилизации перевозочного процесса при пропуске сниженного числа поездов. Это позволит обоснованно формировать принимаемые ОУР в таких случаях.

2. При регулировании дислокации локомотивного парка необходимо учитывать возможность образования значительного дисбаланса локомотивов на станциях их оборота, в том числе на участках с одинаковыми размерами движения в четном и нечетном направлении. В рассмотренном примере при $\bar{N}_{\text{сут}} = 60$ поездов/сут в обоих направлениях движения предельной расчетной разницей размеров движения в четном и нечетном направлении является величина $77 - 43 = 34$ поездов/сут (рис. 7).

Если на станции оборота локомотивов С в такие сутки нет локомотивов оперативного резерва дирекции движения (ЦД), то дисбаланс локомотивов для отправления поездов нечетного направления составит также 34 локомотива. Соответствующим должно быть и поступление локомотивов одиночным следованием. Такую величину следует признать очень большой, но она возможна. Причем потребность в направлении 15–20 локомотивов в таких случаях не является редкой, что увеличивает непроизводительные пробеги локомотивов. Для их снижения и обеспечения полного вывоза поездов в АИУС должен быть предусмотрен многосуточный прогноз размеров движения на УОЛ с тем, чтобы заранее определять сутки значительного дисбаланса локомотивов. Создание в такие сутки локомотивов оперативного резерва ЦД может минимизировать пробеги локомотивов в одиночном следовании.

Вторая особенность, вызывающая образование затруднений, — неизбежность возрастания парка вагонов на полигонах сети в отдельные периоды. Это является следствием воздействия факторов многих групп. Наибольшее влияние на периодический рост вагонного парка оказывают внешние факторы — затруднения с выгрузкой в крупных выгрузочных вагонах, несогласованный подвод порожних вагонов к крупным

погрузочным районам, а из внутренних факторов — недостаток пропускной способности и предоставление «окон».

«Механизм» образования избытка вагонного парка связан со значительной длиной груженого и порожнего рейса вагона, превышающей 2 тыс. км, а значит, и длительным временем следования вагона от станции отправления до станции назначения, составляющим в среднем по всем отправкам $\bar{t}_{\text{дост}} \approx 6$ суток. Это означает, что если в j -е сутки начались затруднения с пропуском поездов по некоторому участку, то на пути к этому участку уже находится в среднем n_j вагонов. При этом

$$n_j = n_j^{\text{сут}} \bar{t}_{\text{дост}}, \quad (4)$$

где $n_j^{\text{сут}}$ — среднесуточное поступление вагонов на затрудненный участок (станцию) в период до j -х суток, вагонов/сут.

Даже при остановке погрузки в затрудненный адрес непосредственно в день возникновения такого затруднения общее количество вагонов, которые должны быть избыточно размещены в поездах, временно отставленных от движения, или вне поездов на станционных путях, в среднем составит

$$\bar{n}_j^{\text{изб}} = n_j \frac{100 - \alpha}{100}, \quad (5)$$

где α — доля приема вагонов от среднесуточной нормы в затрудненный период, %.

Предположим, что на предпортовую станцию в среднем в сутки поступает $n_j^{\text{сут}} = 200$ вагонов/сут. И вследствие затруднений прием вагонов от железной дороги снизился до $\alpha = 60$ % от среднесуточной нормы.

Тогда в момент возникновения затруднений в пути находится уже $\bar{n}_j^{\text{изб}} = 200 \cdot \frac{100 - 60}{100} = 480$ вагонов.

Если эти вагоны будут размещены в поездах, временно отставленных от движения, на приемоотправочных путях станций расчетного полигона потребуется разместить ~ 8 таких поездов. Практически же избыточный парк значительно превысит такую величину, так как погрузка в адрес затрудненного участка немедленно после начала затруднений не прекращается, в чем заинтересованы отправители грузов. Для ОАО «РЖД» прекращение погрузки также нежелательно, поскольку приводит к снижению доходов. В результате нередко на полигонах сети образуется значительный избыточный парк вагонов, размещенных в поездах, временно отставленных от движения, или другим образом на станционных путях. Это, в свою очередь, снижает пропускную способность участков с осложнениями в эксплуатационной работе. В АИУС для принятия рациональных ОУР в таких ситуациях должны предусматриваться

сценарии управления на основе выполнения много-суточного прогноза с учетом подхода уже погруженных вагонов к затрудненному участку.

Первоочередные задачи разработки АИУС. В целях ускорения создания АИУС необходим правильный выбор первоочередных задач, требующих научной проработки и практического решения, тем более что опыт, в том числе мировой, в этом отношении крайне ограничен. В данной статье в дальнейшем рассматриваются ЛПР и ОУР, относящиеся к подразделениям Центральной дирекции управления движением ОАО «РЖД» (ЦД). Подобная работа должна быть выполнена и для других дирекций ОАО «РЖД», связанных с оперативным управлением перевозочным процессом.

Состав ЛПР. Прежде всего следует определить перечень работников, принимающих ОУР, так как именно для них будет разрабатываться система АИУС. Сложность состоит в множественности категорий ЛПР с самостоятельным набором ОУР. Например, в ДЦУП таких ЛПР имеется не менее 10: старший диспетчер по управлению перевозками (ДГПС), диспетчеры — локомотивный (ДГПЛоко), по местной работе (ДГПМ), по выделенным грузам (ДГПГр), пассажирским перевозкам (ДГППас), по окнам (ДГПОк), по районам управления (ДРУ), по направлениям (ДГП), поездные диспетчеры (ДНЦ) и др. У каждой такой категории ЛПР имеется индивидуальный набор ОУР. На первом этапе разработки АИУС следует выделить несколько категорий. Например, в ДЦУП, по нашему мнению, это ДГПС, ДГПЛоко, ДРУ, ДГП и ДНЦ, поскольку они в наибольшей степени влияют на оперативный ход поездной работы.

На линейном уровне также имеются отдельные категории ЛПР — станционный (маневровый) диспетчер (ДСЦ), диспетчер по местной работе (ДСМ), дежурный по станции (ДСП). Здесь на первом этапе целесообразно остановиться на ДСП, поскольку именно по этой категории может быть достигнуто существенное расширение зон обслуживания.

Определение перечня ОУР при выполнении технологических процессов. Любой технологический процесс состоит из группы операций. Вследствие неравномерности их выполнения и изменения оперативной ситуации точно определить заранее действия ЛПР по условиям выполнения различных операций в ходе перевозочного процесса невозможно. Поэтому независимо от того, имеются затруднения в работе управляемого объекта или нет, ЛПР постоянно принимают множество ОУР для достижения рационального режима работы управляемого объекта.

Рассмотрим простой пример — группу операций, связанных с приемом поезда, следующего в переработку, в парк прибытия сортировочной станции

(от извещения о предстоящем прибытии поезда до надвига состава на горку). Перечень основных ОУР, принимаемых ДСП по ним, влияющие факторы и основания для приема рациональных ОУР представлены в табл. 2.

Из данного анализа можно сделать следующие выводы, относящиеся к ОУР, вырабатываемым дежурно-диспетчерским аппаратом:

- для выполнения одной технологической операции может приниматься множество ОУР (так, в рассмотренном примере по, казалось бы, простому действию — приему поезда с переработкой на сортировочную станцию — необходимо выработать не менее восьми ОУР);
- следует провести учет комплекса условий для выбора рациональных ОУР;
- должно быть обеспечено получение необходимой информации для учета влияющих условий;
- необходима разработка прогнозов развития ситуации на управляемом объекте в момент принятия ОУР, что требует разработки и функционирования в постоянном режиме детальной имитационной модели управляемого объекта;
- должен быть организован непрерывный детальный контроль за ходом работы управляемого объекта.

Определение перечня ОУР при затруднениях в эксплуатационной работе. Действие внутренних и внешних факторов (рис. 2) вызывает неопределенность оперативного хода перевозочного процесса с возможным нарушением выполнения нормативной технологии. Некоторые факторы (например, ОТС, БД, неблагоприятные погодные условия) сразу снижают наличную пропускную и перерабатывающую способность участков и станций. Другие факторы создают условия избыточного накопления вагонного парка с аналогичными нарастающими последствиями. Все это создает затруднения в эксплуатационной работе и требует принятия мер по стабилизации перевозочного процесса в виде ОУР, реализуемых как в сменно-суточных планах поездной и грузовой работы, так и в текущей деятельности различных категорий оперативного персонала.

При разработке ОУР необходимо заранее определить, какие меры (и соответствующие им ОУР) могут приниматься при различных затруднениях с учетом степени их влияния на работу полигона управления. Так, если на участковой станции произошел ОТС (например, отказ в работе одного из двух маневровых локомотивов), то ДСП за счет ОУР — некоторой задержки в выполнении местной работы — может обеспечить беспрепятственный прием и отправку поездов. Такое затруднение относится только к собственно участковой станции, и его не следует включать в перечень затруднений, по которым должен принимать ОУР поездной диспетчер (ДНЦ), в зону управления которого входит данная участковая станция.

Таблица 2

ОУР, принимаемые ДСП по операциям с поездом, прибывающим в расформирование (до надвига на горку)

Table 2

Operational control decisions taken by the station duty officer on operations with a train arriving to be dismantled (before moving train to hump)

Операции	Условия ОУР	Основания для ОУР
1. По прибытию поезда	1.1. Выбор пути приема поезда • соответствие длины поезда длине пути и специализации путей (опасные, негабаритные грузы и др.) • наличие в поезде вагонов, запрещенных к пропуску через горку • обеспечение максимальной параллельности маршрутов, особенно связанных с надвигом и роспуском состава	• информация о составе и времени прибытия поезда (предварительная, уточненная) • прогноз ситуации во входной горловине на ~0,3 ч • прогноз ситуации в предгорочной горловине на ~0,5–1,0 ч
	1.2. Определение времени подготовки маршрута приема и открытия входного сигнала • прием поезда является преимущественным маршрутом • выполнение максимального количества других маршрутов во входной горловине до времени открытия входного сигнала	• прогноз ситуации во входной горловине на ~0,3 ч
	1.3. Определение времени передачи информации работникам ПТО о номере пути и времени прибытия поезда • информация: предварительная и по факту прибытия	—
	1.4. Определение времени закрепления состава • по факту прибытия	—
2. Пропуск поезда локомотива (Л) в депо	2.1. Определение времени начала подготовки маршрута и открытия сигнала • максимальная параллельность маршрутов в предгорочной горловине	—
3. Заезд горочного локомотива (ЛГ) для надвига состава	3.1. Определение ЛГ (при работе нескольких ЛГ), выполняющего надвиг состава • освобождение ЛГ от выполнения других маневровых операций • минимизация перерывов в работе горки	• прогноз выполнения маневровых операций на ~0,3–0,5 ч
	3.2. Определение маршрута для операции «заезд» • свобода пути по маршруту • минимизация времени выполнения маневровой работы	• прогноз работы в парке прибытия и горловинах на ~0,3–0,5 ч
	3.3. Определение времени открытия сигналов по маршруту операции «заезд» • максимальная параллельность маневровых маршрутов • минимизация времени выполнения маневровой работы	• контроль фактического местоположения ЛГ

В случае если сортировочная станция начинает испытывать затруднения в работе горки, может потребоваться принятие ОУР поездным диспетчером в виде изменения чередования поступления на станцию поездов, следующих с переработкой и без переработки. В таких случаях станционное затруднение включается в перечень, по которым ОУР принимает ДНЦ.

Такой вид ОУР, как пропуск части поездопотока по параллельному ходу вследствие затруднений работы участка, относится полностью к компетенции ДГПС.

Таким образом, основными принципами определения перечня ОУР при затруднениях в эксплуатационной работе являются следующие:

- выбор типов затруднений, требующих принятия ОУР по категориям ЛПР; для первого этапа разработки АИУС такими категориями ЛПР являются ДГПС, ДГПлок, ДРУ, ДГП, ДНЦ и ДСП;

- определение по выбранным категориям ЛПР возможных ОУР применительно к типам затруднений.

Разработка перечня ОУР по категориям ЛПР позволит четко определить конкретные задачи при создании АИУС с переходом от АРМ, выполняющих информационные функции, к АРМ, выполняющим информационно-управляющие функции, назовем их АРМУ.

Имитационная модель работы управляемого объекта — основной инструмент выработки ОУР. Принятие ОУР требует учета многочисленных факторов, что возможно на основе построения имитационной модели (ИМ) управляемого объекта. При этом для каждой категории ЛПР следует разрабатывать ИМ с такой детализацией управляемого объекта, которая соответствует уровню и особенностям принимаемых ОУР. Так, для выработки ОУР на станционном уровне необходима информация о длине и специализации приемоотправочных путей, конструкции стрелочных горловин и их секционировании, скорости движения прибывающих поездов, точные данные о местонахождении

поездных и маневровых локомотивов, времени выполнения маневровых передвижений и др. На уровне ДГПС, ДРУ, ДНЦ в таких данных нет необходимости, но требуется большой объем информации о подходе поездов по стыкам, их передвижению по полигонам управления, планируемой погрузке и выгрузке по станциям и др. Совместить информацию, потребную для выработки ОУР для всех категорий ЛПР, в одной ИМ чрезвычайно сложно, да в этом и нет необходимости. Задача решается на основе создания ИМ для разных категорий ЛПР⁸, что рассматривалось в работах [13–16]. Основным требованием к таким моделям, приспособленным к решению задач выработки оперативных управляющих решений, является соответствие структуры модели, программного и информационного обеспечения перечню ОУР, вырабатываемых на рабочих местах ЛПР. При этом возможна разработка ИМ для близких по решаемым задачам ЛПР, например ДГПС и ДРУ. Этот вопрос можно решить при разработке АИУС только после определения полного перечня ОУР.

При разработке ИМ для уровня ДНЦ и выше следует использовать результаты, полученные в АО «ВНИИЖТ» при создании тренажера поездного диспетчера⁹. В нем предусмотрена выработка ОУР, принимаемых ДНЦ о плане прокладки поездов с учетом воздействия различных реально действующих факторов: текущего положения поездов (информация из ГИД «УралВНИИЖТ»); непредусмотренного в НГДП занятия приемоотправочных путей, например, временно отставленными от движения поездами; изменения перегонных времен хода из-за возникших новых ограничений ходовой скорости движения поездов и др. (рис. 8).

Прогнозирование состояния управляемого объекта. Неопределенность хода перевозочного процесса вызывает необходимость и одновременно трудность выполнения прогноза состояния управляемых объектов, особенно многосуточного, без которого невозможно заблаговременно разрабатывать меры по регулированию поездо- и вагонопотоков, а также регулирование локомотивов на участках их оборота. Известны работы в этом направлении [3, 15]. Однако в них используются в основном средние значения скорости перемещения поездо- и вагонопотоков по полигонам сети, что не соответствует реальным условиям (рис. 5). Поэтому требуется

выполнение исследований с разработкой новых методик прогнозирования (в том числе многосуточного), максимально учитывающих неопределенность хода перевозочного процесса в оперативном режиме.

Снижение влияния неопределенности перевозочного процесса на работу управляемых объектов. Имеются три основных способа решения данной задачи.

Первый способ связан со снижением количества и последствий различных возмущающих воздействий. Такая работа в ОАО «РЖД» ведется постоянно, в частности по группам факторов — ОТС, ТН, БД (рис. 2). Следует изучить возможности снижения количества возмущающих воздействий, а также их последствий и по другим группам факторов.

Второй способ — разработка и осуществление мер по снижению уровня неравномерности перевозочного процесса. Здесь необходимо выполнение исследований по определению возможности координации работы операторов вагонного парка в части организации календарной погрузки и направления порожних вагонов получателям, маршруты движения вагонов к которым проходят по наиболее загруженным направлениям сети. Требуется повысить согласованность предоставления «окон» для ремонтно-реконструктивных работ «в створе». Необходима разработка методов смягчения неравномерности поездопотоков на основе их регулирования, например, за счет оперативной корректировки плана формирования поездов, использования параллельных ходов и других мер оперативного регулирования. Это позволит снизить уровень несоответствия пропускной и перерабатывающей способности образующимся в отдельные периоды повышенным размерам движения.

Третий способ — создание резервов пропускной и перерабатывающей способности, тяговых ресурсов и емкости путевого развития. В [12] было показано, что при современном уровне посуточной неравномерности поездопотоков для обеспечения устойчивой эксплуатационной работы требуется примерно 20 % резерва производственных мощностей. К этому показателю следует стремиться. Множественность операторов вагонного парка требует также создания резервных емкостей путевого развития. Следует рассмотреть вопрос о повышении экономической заинтересованности операторов в образовании таких резервов.

⁸ Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022617512 Российская Федерация. Программный комплекс имитационного моделирования железнодорожных перевозок: № 2022616306; заявл. 08.04.2022; опубл. 21.04.2022 / Виноградов С. В., Мехедов М. И., Мугинштейн Л. А. [и др.]; заявитель Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта. EDN: <https://www.elibrary.ru/wcnqij>.

⁹ Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024660819 Российская Федерация. Специализированный тренажер обучения поездного диспетчера (СТПД): № 2024619666; заявл. 02.05.2024; опубл. 13.05.2024 / Виноградов С. А., Мехедов М. И., Мугинштейн Л. А. [и др.]; заявитель Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта. EDN: <https://www.elibrary.ru/znwauz>.

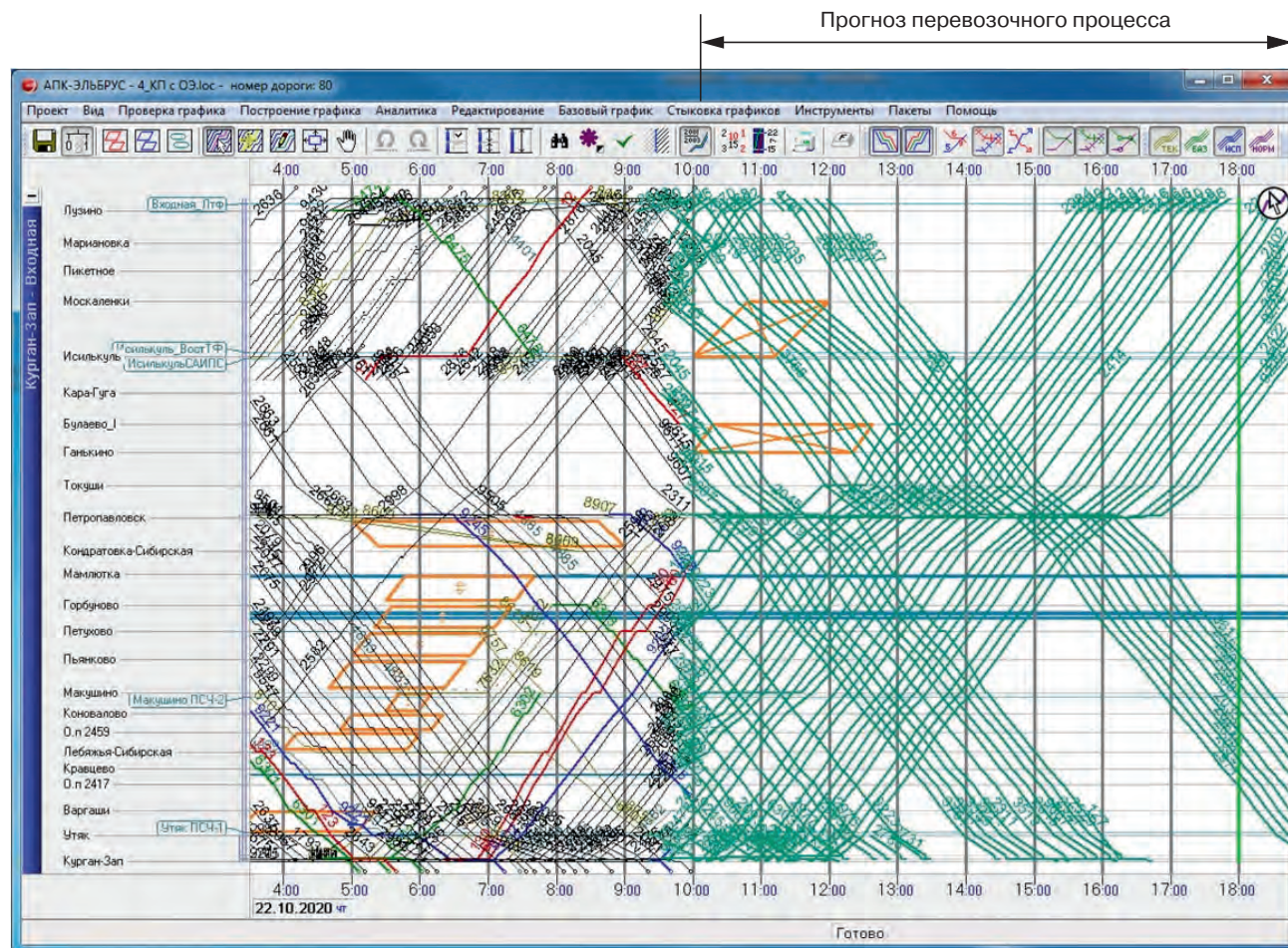


Рис. 8. Автоматизированная выработка ОУР (зеленые нитки поездов) для ДНЦ по пропуску поездов при изменении оперативной обстановки на участке

Fig. 8. Automated generation of operational control decisions (green train threads) for train dispatchers to pass trains in case of changes in the operational situation on the section

Организация разработки и внедрения АИУС. Необходимо разработка наукоемкой, фондоемкой, поэтапной программы работ, предусматривающей:

- разработку концепции АИУС, обеспечивающей достижение конечного результата в виде автоматизированной выработки на АРМУ рациональных ОУР оперативным персоналом с поэтапным расширением состава ЛПР;
- проведение комплекса исследований по определению состава задач, решаемых на АРМУ с использованием технико-экономических методов;
- разработку новых методов прогнозирования применительно к категориям ЛПР, в том числе многосуточного, максимально учитывающих влияние внутренних и внешних факторов, вызывающих неопределенность оперативного хода перевозочного процесса;
- разработку иерархических ИМ работы управляемых объектов применительно к АРМУ;

• создание алгоритмического и программного обеспечения АРМУ — на первом этапе для типовых рабочих мест по выделенным категориям ЛПР — ДГПС, ДГПЛок, ДРУ, ДНЦ и ДСП с последующим их внедрением на пилотных полигонах сети и распространением на всю сеть железных дорог и на отраслевые дирекции, непосредственно связанные с выполнением перевозочного процесса в оперативном режиме.

Обсуждение и заключение. Следует ожидать достижения эффекта по двум основным составляющим.

Первая составляющая — сокращение на основе оптимизации ОУР текущих затрат, связанных с преодолением затруднений в эксплуатационной работе, особенно в случаях, требующих: временной остановки поездов от движения; отклонения поездопотоков на параллельные ходы; принятия сложных решений в части регулирования локомотивных парков и

локомотивных бригад; выбора очередности следования поездов и выполнения враждебных маршрутов.

Сегодня за крайне ограниченное выделенное на выработку ОУР время дежурно-диспетчерский персонал должен оценить текущее состояние перевозочного процесса на управляемом объекте, выполнить прогноз его развития при возможных вариантах ОУР и выбрать из них оптимальное или близкое к нему решение. Понятно, что любой дежурный или диспетчер самостоятельно при этом выполнить какие-либо сложные и тем более технико-экономические расчеты не в состоянии. Поэтому практически все ОУР принимаются на основе знаний, накопленного опыта и интуиции ЛПР. Качество ОУР при этом во многом зависит от индивидуальных способностей ЛПР. В одинаковых простых ситуациях ОУР могут быть одинаковыми у разных ЛПР, а в сложных — часто нет. Именно поэтому в коллективах есть дежурные и диспетчеры, достигающие лучших показателей.

Но и такие лучшие решения не всегда обеспечивают достижение оптимальных результатов и минимизацию расходов. Это показали, например, исследования, выполненные АО «ВНИИЖТ» по разработке энергоэффективного графика движения грузовых поездов [17]. Были выполнены опытные поездки с машинистами, достигающими наилучших результатов по экономии энергии. При этом установлено, что полученная экономия энергии в таких поездках меньше на 2–3 %, а в отдельных поездках на 3–5 %, той экономии, которая могла бы быть получена при использовании разработанной в АО «ВНИИЖТ» автоматизированной системы принятия оптимальных управляющих решений по режимам ведения поезда, учитывающей достижение минимума расхода энергии при соблюдении нормативного расписания и нормативной участковой скорости. Выполненные исследования [14, 15] показали значительный эффект при оптимизации управляющих решений при затруднениях в эксплуатационной работе. Поэтому снижение в целом текущих затрат по первой составляющей технико-экономического эффекта можно оценить величиной не менее 5–10 %.

Вторая составляющая эффекта — расширение зон обслуживания дежурно-диспетчерского аппарата — может быть принята на экспертном уровне равной 15–20 %. На первом этапе внедрения АИУС все разрабатываемые системой ОУР должны передаваться оперативному персоналу, за которым сохраняется окончательное решение. В дальнейшем будет определено, какие из ОУР не требуют проверки. По таким ОУР затраты времени ЛПР будут минимальными. По остальным время на выработку ОУР также сократится. Поэтому уровень загрузки

персонала снизится. Это и послужит основанием для расширения зон обслуживания. Для поездных диспетчеров возможно удлинение диспетчерских участков, а для станций — объединение управления нескольких станций одним дежурным по станции. Многие здесь, конечно, зависят от местных условий. В современных ситуациях при дефиците рабочей силы расширение зон обслуживания является важнейшей составляющей эффективности ОУР.

Таким образом, разработка АИУС позволит повысить технико-экономическую эффективность работы подразделений ОАО «РЖД» в целом.

Финансирование: авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

Funding: the authors received no financial support for the research, authorship, and publication of this article.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах.

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest and no financial interests in any material discussed in this article.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Бусленко Н. П. Математические модели производственных процессов. М.: Наука, 1964. 362 с.
Buslenko N. P. *Mathematical models of production processes*. Moscow: Nauka Publ.; 1964. 362 p. (In Russ.).
2. Лернер А. Я. Начало кибернетики. М.: Наука, 1967. 400 с.
Lerner A. Ya. *Fundamental cybernetics*. Moscow: Nauka Publ.; 1967. 400 p. (In Russ.).
3. Бусленко Н. П., Калашников В. В., Коваленко И. Н. Лекции по теории сложных систем. М.: Советское радио, 1973. 439 с.
Buslenko N. P., Kalashnikov V. V., Kovalenko I. N. *Lectures on Complex System Theory*. Moscow: Sovetskoye radio Publ.; 1973. 439 p. (In Russ.).
4. Левин Д. Ю. Теория оперативного управления перевозочным процессом: монография. М.: Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2008. 624 с. EDN: <https://www.elibrary.ru/qnvvvr>.
5. Поплавский А. А. Автоматизированная система управления перевозочным процессом железнодорожного транспорта в оперативном режиме (сетевой и региональный уровни). М.: Интекст, 2008. 192 с. EDN: <https://www.elibrary.ru/qnvwwz>.
6. Мугинштейн Л. А., Мехедов М. И. Методические подходы к выявлению факторов, влияющих на стабильность пропуска поездопотоков // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2014. № 2. С. 24–33. EDN: <https://www.elibrary.ru/tolgtz>.

Muginshteyn L. A., Mekhedov M. I. Methodological approaches to revelation of factors influencing the stability of train flow handling. *Russian Railway Science Journal*. 2014;(2):24-33. (In Russ.). EDN: <https://www.elibrary.ru/tolgzt>.

7. Козлов П. А., Осокин О. В., Тушин Н. А. Построение интеллектуальной информационной среды на железнодорожном транспорте // *Инновационный транспорт*. 2011. № 1(1). С. 6–9. EDN: <https://www.elibrary.ru/pivmsf>.

Kozlov P. A., Osokin O. V., Tushin N. A. Designing a smart information environment on the railway transport. *Innotrans*. 2011;(1):6-9. (In Russ.). EDN: <https://www.elibrary.ru/pivmsf>.

8. Васильев А. Б., Котенко А. Г., Прокофьева В. В. Разработка алгоритма поддержки принятия решений поездного диспетчера при организации движения поездов // *Вестник транспорта Поволжья*. 2014. № 1 (43). С. 52–56. EDN: <https://www.elibrary.ru/spsuip>.

Vasil'ev A. B., Kotenko A. G., Prokof'eva V. V. Development of the algorithm of the train dispatchers decision-making support when organising train traffic. *Vestnik transporta Povolzhya*. 2014;(1):52-56. (In Russ.). EDN: <https://www.elibrary.ru/spsuip>.

9. Сотников Е. А., Холодняк П. С. Рациональная технология временной отстановки поездов от движения // *Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ)*. 2019. Т. 78, № 1. С. 3–9. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2019-78-1-3-9>.

Sotnikov E. A., Kholodnyak P. S. Cost-effective technology of temporary setting trains aside from the traffic. *Russian Railway Science Journal*. 2019;78(1):3-9. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2019-78-1-3-9>.

10. Сотников Е. А., Холодняк П. С. Преодоление временных затруднений в ходе перевозочного процесса // *Железнодорожный транспорт*. 2019. № 9. С. 18–22. EDN: <https://www.elibrary.ru/avqpgb>.

Sotnikov E. A., Kholodnyak P. S. Overcoming temporary difficulties in transportation. *Zhelezнодороzhnyy transport*. 2019;(9):18-22. (In Russ.). EDN: <https://www.elibrary.ru/avqpgb>.

11. Угрюмов А. К. Неравномерность движения поездов. М.: Транспорт, 1968. 112 с.

Ugryumov A. K. *Irregularity of train traffic*. Moscow: Transport Publ.; 1968. 112 p. (In Russ.).

12. Шенфельд К. П., Сотников Е. А. Развитие методов управления перевозочным процессом на железнодорожном транспорте в современных условиях. М.: Научный мир, 2015. 200 с. EDN: <https://www.elibrary.ru/vkanpp>.

Shenfel'd K. P., Sotnikov E. A. *Development of railway transportation management methods in modern conditions*. M.: Nauchnyy mir Publ.; 2015. 200 p. (In Russ.). EDN: <https://www.elibrary.ru/vkanpp>.

13. Сотников Е. А., Ивницкий В. А., Ольшанский А. М. Принципы интеллектуализации оперативного управления перевозочным процессом железнодорожного транспорта общего пользования // *Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ)*. 2014. № 2. С. 40–47. EDN: <https://www.elibrary.ru/tolhan>.

Sotnikov E. A., Ivnitkiy V. A., Ol'shanskiy A. M. Intellectualization concept of operating traffic management of public railway transport. *Russian Railway Science Journal*. 2014;(2):40-47. (In Russ.). EDN: <https://www.elibrary.ru/tolhan>.

14. Козлов П. А., Осокин О. В., Колокольников В. С. Исследование проектов развития железнодорожных станций и полигонов с помощью имитационного моделирования // *Железнодорожный транспорт*. 2018. № 6. С. 12–16. EDN: <https://www.elibrary.ru/xpuiah>.

Kozlov P. A., Osokin O. V., Kolokol'nikov V. S. Study of railway station and polygon development projects using simulation modelling. *Zhelezнодороzhnyy transport*. 2018;(6):12-16. (In Russ.). EDN: <https://www.elibrary.ru/xpuiah>.

15. Тулупов Л. П. Управление перевозками на участках и направлениях // *Железнодорожный транспорт*. 2003. № 4. С. 50–54.

Tulupov L. P. Transportation management on sections and directions. *Zhelezнодороzhnyy transport*. 2003;(4):50-54. (In Russ.).

16. Инновационный проект «Эльбрус» / Л. А. Мугинштейн [и др.] // *Железнодорожный транспорт*. 2013. № 12. С. 18–25. EDN: <https://www.elibrary.ru/rmtbfp>.

Muginshteyn L. A., Vinogradov S. A., Kiryakin V. Yu., Lyashko O. V., Anfinogenov A. Yu., Yabko I. A. Elbrus Innovations Project. *Zhelezнодороzhnyy transport*. 2013;(12):18-25. (In Russ.). EDN: <https://www.elibrary.ru/rmtbfp>.

17. Мугинштейн Л. А., Илютович А. Е., Ябко И. А. Энергооптимальный тяговый расчет движения поезда // *Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ)*. 2013. № 6. С. 3–13. EDN: <https://www.elibrary.ru/tolgrt>.

Muginshteyn L. A., Ilyutovich A. E., Yabko I. A. Mimimum energy consumption based train performance calculation. *Russian Railway Science Journal*. 2013;(6):3-13. (In Russ.). EDN: <https://www.elibrary.ru/tolgrt>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Михаил Иванович МЕХЕДОВ,

канд. техн. наук, заместитель генерального директора, директор научного центра «Цифровые модели перевозок и технологии энергосбережения» (НЦ «ЦМПЭ»), Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ, 129626, г. Москва, ул. 3-я Мытищинская, д. 10), Author ID: 1019989, <https://orcid.org/0000-0002-8174-214X>

Евгений Александрович СОТНИКОВ,

д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник, Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ, 129626, г. Москва, ул. 3-я Мытищинская, д. 10), Author ID: 493861, <https://orcid.org/0000-0003-0852-993X>

Павел Сергеевич ХОЛОДНЯК,

начальник отдела, НЦ «ЦМПЭ», Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ, 129626, г. Москва, ул. 3-я Мытищинская, д. 10), Author ID: 951876, <https://orcid.org/0000-0002-5469-7419>

Сергей Валентинович ЛОБАНОВ,

аспирант, начальник отдела, НЦ «ЦМПЭ», Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ, 129626, г. Москва, ул. 3-я Мытищинская, д. 10), Author ID: 1144636

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Mikhail I. MEHEDOV,

Cand. Sci. (Eng.), Deputy General Director, Director of the Digital Models of Transportation and Energy Saving Technologies Research Centre, Railway Research Institute (129626, Moscow, 10, 3rd Mytishchinskaya St.), Author ID: 1019989, <https://orcid.org/0000-0002-8174-214X>

Evgeniy A. SOTNIKOV,

Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief Researcher, Railway Research Institute (129626, Moscow, 10, 3rd Mytishchinskaya St.), Author ID: 493861, <https://orcid.org/0000-0003-0852-993X>

Pavel S. KHOLODNYAK,

Head of Department, Digital Models of Transportation and Energy Saving Technologies Research Centre, Railway Research Institute (129626, Moscow, 10, 3rd Mytishchinskaya St.), Author ID: 951876, <https://orcid.org/0000-0002-5469-7419>

Sergey V. LOBANOV,

Postgraduate, Head of Department, Digital Models of Transportation and Energy Saving Technologies Research Centre, Railway Research Institute (129626, Moscow, 10, 3rd Mytishchinskaya St.), Author ID: 1144636

ВКЛАД АВТОРОВ

Михаил Иванович МЕХЕДОВ. Обоснование необходимости перехода к информационно-управляющим системам перевозочного процесса, определение задач, требующих первоочередного решения (25%).

Евгений Александрович СОТНИКОВ. Разработка вопросов неопределенности хода перевозочного процесса и метода учета этого фактора в оперативном управлении. Написание статьи (45 %).

Павел Сергеевич ХОЛОДНЯК. Разработка условия воздействия внутренних и внешних факторов на перевозочный процесс, их технико-экономической оценки при оперативном управлении (20%).

Сергей Валентинович ЛОБАНОВ. Разработка программы тренажера для поездного диспетчера (10%).

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Mikhail I. MEHEDOV. Justification of the transition to information and control systems for transportation, determination of priority tasks (25%).

Evgeniy A. SOTNIKOV. Development of the issues of uncertainty of the transportation process and consideration of this factor in operational management, article writing (45 %).

Pavel S. KHOLODNYAK. Development of the condition of influence of internal and external factors on transportation, their technical and economic feasibility in operational management (20 %).

Sergey V. LOBANOV. Development of a train dispatcher simulation programme (10%).

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The authors have read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию 20.05.2024, рецензия от первого рецензента получена 20.06.2024, рецензия от второго рецензента получена 25.06.2024, рецензия от третьего рецензента получена 15.07.2024, принята к публикации 30.07.2024.

The article was submitted 20.05.2024, first review received 20.06.2024, second review received 25.06.2024, third review received 15.07.2024, accepted for publication 30.07.2024.

ПОДПИСКА

«Вестник ВНИИЖТ» ГДЕ подписаться?

Подписку на научно-технический журнал «Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта» («Вестник ВНИИЖТ») можно оформить в любом почтовом отделении связи по Объединенному каталогу «Пресса России», том 1 или агентствах по распространению печатных изданий «Урал-Пресс», АРЗИ и др.

Подписной индекс журнала — 70116.

Также можно оформить подписку (годовую и полугодовую) на договорных условиях в редакции. Адрес редакции журнала: 129626, Москва, 3-я Мытищинская ул., д. 10, тел.: +7 (495) 602-84-56, e-mail: journal@vniizht.ru. Информация о подписке размещена на сайте журнала www.journal-vniizht.ru.

Подписчики стран ближнего и дальнего зарубежья могут оформить подписку на журнал «Вестник ВНИИЖТ» в агентстве «Урал-Пресс» (Ural-Press, export@ural-press.ru).



УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССАМИ ПЕРЕВОЗОК

Оригинальная статья

УДК 656.22:629.4

EDN: <https://elibrary.ru/gdkfwk>



Установление баланса тяговых ресурсов на основе анализа колебаний скоростей поездопотоков и величины потребных резервов тяги

Н. В. Корниенко✉, М. И. Мехедов, А. Г. Котенко

Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ),
Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Введение. В основе рациональной эксплуатации локомотивного парка лежит увязка графика оборота локомотивов с графиком движения поездов, где предполагается безусловное выполнение нормативных заданий по перевозкам и не менее жесткое соблюдение нормативов на технические и технологические операции с локомотивами, поездами на станциях оборота и перецепки локомотивов. Цель увязки — установление баланса локомотивов в местах размена тяги. Однако в ходе осуществления перевозочного процесса внутрисуточная неравномерность дислокации эксплуатируемого парка достигает значительных размеров и приводит к нарушению баланса. В этой связи требуется создание механизма организации подсылки тяговых ресурсов к станциям их оборота и перецепки, что позволит гарантировать сохранение баланса тяги в местах размена, компенсировать влияние внутрисуточной неравномерности дислокации эксплуатируемого парка, повысить степень рациональной эксплуатации парка локомотивов, усилить пропускную способность линий.

Материалы и методы. Решение задачи сохранения баланса тяговых ресурсов на станциях оборота и перецепки локомотивов во внутрисуточных интервалах реализовано методами интервального регулирования тяговых ресурсов.

Результаты. Предложен подход к установлению баланса тяговых ресурсов на станциях стыкования родов тока как наиболее простому виду станций оборота и перецепки (как правило, не имеют дополнительных примыканий, используя при этом размен тяги по направлениям «один к одному»). Подход основан на применении зависимости между колебаниями скоростей поездопотоков и величиной потребных резервов тяги во внутрисуточных трехчасовых интервалах.

Обсуждение и заключение. Использование предлагаемого подхода позволяет повысить эффективность технологии установления баланса тяговых ресурсов на станциях стыкования родов тока, создать основы для построения механизма подсылки резерва по регулировке.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: железные дороги, перевозочный процесс, участковая скорость, баланс тяговых ресурсов, технология интервального регулирования, резерв тяговых ресурсов, подсылка резерва по регулировке

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Корниенко Н. В., Мехедов М. И., Котенко А. Г. Установление баланса тяговых ресурсов на основе анализа колебаний скоростей поездопотоков и величины потребных резервов тяги // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2024. Т. 83, № 3. С. 248–257.



TRANSPORTATION PROCESS MANAGEMENT

Original article

UDK 656.22:629.4

EDN: <https://elibrary.ru/gdkfwk>



Balancing traction resources based on fluctuations in train speeds and required traction reserves

Natalya V. Kornienko✉, Mikhail I. Mekhedov, Alexey G. Kotenko

Railway Research Institute,
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The rational operation of the locomotive fleet is based on coordination of the locomotive turnover schedule with the train traffic schedule that assume unconditional fulfillment of standard transportation jobs and no less strict compliance with technical and technological standards for locomotive and train operations at locomotive turnover and re-coupling stations. Coordination is intended to set up balance of locomotives at traction interchange points. However, in the course of transportation, the intra-day dislocation of the operating fleet reaches significant unevenness and leads to imbalance. This requires a system for dispatching traction resources to their turnover and re-coupling stations which will help to preserve traction balance at the interchange points to compensate for uneven intra-day dislocation of the operating fleet, rationalise the locomotive fleet operations, and improve line capacity.

Materials and methods. The balance of traction resources at locomotive turnover and re-coupling stations in intra-day intervals is achieved by interval regulation of traction resources.

Results. The paper proposes an approach to establishing a balance of traction resources at current interlocking stations as the simplest type of turnover and recoupling stations (as a rule, they do not have additional adjacencies, using a one-to-one traction exchange). The approach applies the correlation between fluctuations in train traffic speeds and the amount of required traction reserves within daily three-hour intervals.

Discussion and conclusion. This approach helps to improve the traction resource balancing technology at the current junction stations, and create a basis for building a mechanism for dispatching regulation reserves.

KEYWORDS: railways, transportation process, service speed, traction resources balance, interval regulation technology, reserve traction resource, dispatching regulation reserves

FOR CITATION: Kornienko N. V., Mekhedov M. I., Kotenko A. G. Balancing traction resources based on fluctuations in train speeds and required traction reserves. *Russian Railway Science Journal*. 2024;83(3):248-257. (In Russ.).

Введение. В основе расчета потребного эксплуатационного парка локомотивов лежит увязка графика движения поездов с графиком оборота локомотивов при условии соблюдения установленных нормативов на технические и технологические операции с локомотивами, поездами, а также обеспечения их минимальных простоев на станциях оборота и перецепки локомотивов. Качество проводимой увязки во многом зависит от соблюдения баланса количества локомотивов эксплуатационного парка грузового движения. Для учета возможных перестроек структуры поездопотока, колебаний размеров движения, рассогласований парности по причине изменений межпоездных интервалов и скоростей движения поездов, а также ошибок оперативного регулирования увязка включает в себя закрепление резервов тяговых ресурсов на станциях оборота и перецепки, что, хотя и обуславливает избыточность эксплуатируемого парка, но препятствует нарушению баланса тяговых ресурсов в местах размена, подчиняя размер парка требованиям неравномерности движения. Реализация увязанного графика оборота локомотивов подразумевает внесение корректировок как в помесечную, так и в посуточную увязку с графиком движения поездов. Поддержка баланса внутри суток подчинена требованиям интервального регулирования тяговых ресурсов [1].

Вместе с тем в ходе осуществления перевозочного процесса внутрисуточная неравномерность дислокации эксплуатируемого парка, т. е. его перенасыщение или недостаток на отдельных участках полигонов, достигает значительных размеров. Резервов тяги в местах размена оказывается недостаточно, баланс нарушается, и согласно технологии интервального регулирования выполнение графика определяется своевременностью переброса резервов локомотивов с одной станции размена тяги на другую [2, 3]. Однако такой переброс ввиду отсутствия устойчивых механизмов организации подсылки тяговых ресурсов, значительной протяженности участков обращения локомотивов, недостатка информации о наличии резервов тяги в местах близлежащего размена и большой стоимости резервного пробега локомотивов как инструмент регулировки практически не используется, и размен тяги на станциях оборота и перецепки поддерживается по выходу локомотивов из пункта технического обслуживания локомотивов (ПТОЛ). Это приводит к остановкам работы станций, неритмичности приема поездов, существенному снижению пропускной способности [4].

В этой связи актуальной и важной целью является решение научной проблемы создания механизма организации подсылки тяговых ресурсов к станциям их оборота и перецепки. Достижение этой цели позволит не только компенсировать влияние на баланс тяговых ресурсов внутрисуточной неравномерности дислокации эксплуатируемого парка, но и в целом

повысить степень рациональной эксплуатации парка локомотивов, усилить пропускную способность линий.

Постановка задачи. В первом приближении проблема может быть решена применительно к станциям стыкования родов тока — наиболее простому виду станций оборота и перецепки, где происходит 100% размен поездных локомотивов и локомотивных бригад для дальнейшего продвижения поездопотока [5, 6]. Станции стыкования родов тока, как правило, не имеют дополнительных примыканий, используя размен по направлениям «один к одному» (рис. 1).

Модель баланса тяговых ресурсов на таких станциях может быть представлена следующим образом:

$$\begin{cases} \left[\sum_{i=1}^n M_i^{\text{отпр}} + \sum_{i=1}^n M_i^{\text{ПТОЛ отпр}} + \sum_{i=1}^n M_i^{\text{сл отпр}} \right]^{\text{неч}} = \\ = \left[\sum_{i=1}^n M_i^{\text{пр}} + \sum_{i=1}^n M_i^{\text{ПТОЛ пр}} + \sum_{i=1}^n M_i^{\text{сл пр}} \right]^{\text{чет}}; \\ \left[\sum_{i=1}^n M_i^{\text{отпр}} + \sum_{i=1}^n M_i^{\text{ПТОЛ отпр}} + \sum_{i=1}^n M_i^{\text{сл отпр}} \right]^{\text{чет}} = \\ = \left[\sum_{i=1}^n M_i^{\text{пр}} + \sum_{i=1}^n M_i^{\text{ПТОЛ пр}} + \sum_{i=1}^n M_i^{\text{сл пр}} \right]^{\text{неч}}, \end{cases} \quad (1)$$

где левая часть уравнения содержит сумму величин тяговых ресурсов по отправлению, а правая — по прибытию. При этом слагаемые $\sum_{i=1}^n M_i^{\text{отпр}}$, $\sum_{i=1}^n M_i^{\text{ПТОЛ отпр}}$ и $\sum_{i=1}^n M_i^{\text{сл отпр}}$ отражают количество локомотивов i -х серий, отправленных со станции с поездами по перецепке ($\sum_{i=1}^n M_i^{\text{пер отпр}}$), по выходу из ПТОЛ, а также по регулировочному заданию, а слагаемые $\sum_{i=1}^n M_i^{\text{пр}}$, $\sum_{i=1}^n M_i^{\text{ПТОЛ пр}}$, $\sum_{i=1}^n M_i^{\text{сл пр}}$ — количество локомотивов i -х серий, прибывших на станцию с поездами для перецепки ($\sum_{i=1}^n M_i^{\text{пер пр}}$), захода в ПТОЛ, а также по регулировочному заданию.

Для соблюдения равенства частей в модели баланса (1) значения скоростей входящих поездопотоков встречных направлений $v_{\text{потока}}^{\text{вх чет/неч}}$ должны быть максимально приближены друг к другу

$$v_{\text{потока}}^{\text{вх чет}} \approx v_{\text{потока}}^{\text{вх неч}}. \quad (2)$$

Однако ввиду распространенной разницы заложенных в графике движения поездов скоростей и размеров входящих с противоположных направлений поездопотоков

$$N^{\text{вх чет}} \neq N^{\text{вх неч}}, \quad v_{\text{потока}}^{\text{вх чет}} \neq v_{\text{потока}}^{\text{вх неч}} \quad (3)$$

соблюдить равенство слагаемых одной части (1) соответствующим слагаемым другой в процессе увязки, как правило, не удастся, и в графике оборота локомотивов ни одна из составляющих баланса тяговых ресурсов не равна другой:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n M_i^{\text{пер отпр}} \neq \sum_{i=1}^n M_i^{\text{пер пр}}; \\ \sum_{i=1}^n M_i^{\text{ПТОЛ отпр}} \neq \sum_{i=1}^n M_i^{\text{ПТОЛ пр}}; \\ \sum_{i=1}^n M_i^{\text{сл отпр}} \neq \sum_{i=1}^n M_i^{\text{сл пр}}. \end{cases} \quad (4)$$

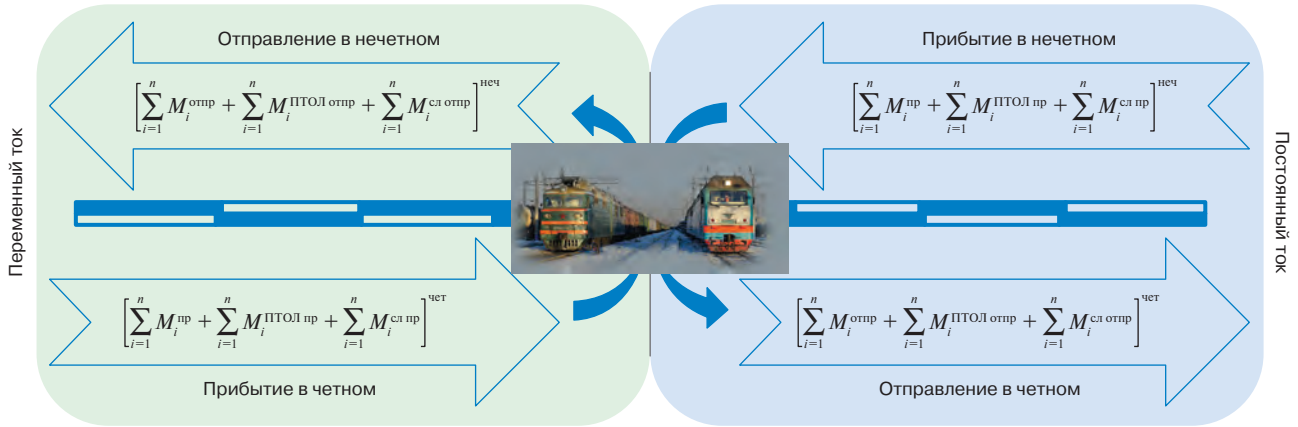


Рис. 1. Система размена тяги на станциях стыкования родов тока

Fig. 1. Traction exchange system at current junction stations

Важно, что условия непарности (4), связанные с разностью частей $\Delta M^{\text{отпр/пр}}$ модели (1) и разностью $\Delta v^{\text{вх чет/неч}}$ (3), связанной с разницей $\Delta M^{\text{вх чет/неч}}$, присутствуют в графиках в виде постоянных величин

$$\begin{cases} \Delta M^{\text{отпр/пр}} = \text{const}; \\ \Delta M^{\text{вх чет/неч}} = \text{const}; \\ \Delta v^{\text{вх чет/неч}}_{\text{потока}} = \text{const} \end{cases} \quad (5)$$

и соответствуют друг другу

$$\begin{cases} \Delta M^{\text{отпр/пр}} = f(\Delta v^{\text{вх чет/неч}}_{\text{потока}}); \\ \Delta M^{\text{отпр/пр}} = f(\Delta M^{\text{вх чет/неч}}); \\ \Delta M^{\text{вх чет/неч}} = f(\Delta v^{\text{вх чет/неч}}_{\text{потока}}), \end{cases} \quad (6)$$

чем и обуславливают справедливость выражения (1).

Вместе с тем на практике внутрисуточная неравномерность перевозок создает на станции ситуацию, когда в течение длительного периода времени проявляется рассогласование фактического времени подвода локомотивов в составе прибывающих поездов с противоположных направлений с графиковым временем [7, 8]. Условия (5) и (6) также рассогласовываются. В соответствии с проведенными исследованиями причиной такого рассогласования является существенная разница между значениями графиковых и реальных скоростей входящих поездопотоков встречных направлений $v^{\text{вх чет/неч}}_{\text{потока}}$. Несоблюдение графиковых условий (4)–(6) обуславливает невозможность достижения баланса локомотивов и полного размена тяги.

Задача установления баланса тяговых ресурсов в этом случае может быть решена за счет использования резерва локомотивов [9–11]. Модель резерва тяговых

ресурсов (РТР), применяемая сегодня на практике и позволяющая гарантировать размен тяги, в общем виде выглядит так¹:

$$\sum_{i=1}^n M_i^{\text{РТР}} = \sum_{i=1}^n M_i^{\text{НР}} + \sum_{i=1}^n M_i^{\text{РР}}, \quad (7)$$

где $\sum_{i=1}^n M_i^{\text{НР}}$ — нормативный резерв

$$\sum_{i=1}^n M_i^{\text{НР}} = \sum_{i=1}^n M_i^{\text{ЦТ}} + \sum_{i=1}^n M_i^{\text{ЦД}}, \quad (8)$$

включающий две составляющие: $\sum_{i=1}^n M_i^{\text{ЦТ}}$ — локомотивы технологического резерва, определенные Дирекцией тяги, и $\sum_{i=1}^n M_i^{\text{ЦД}}$ — локомотивы оперативного резерва, определенные Дирекцией управления движением; $\sum_{i=1}^n M_i^{\text{РР}}$ — регулировочный резерв

$$\sum_{i=1}^n M_i^{\text{РР}} = \sum_{i=1}^n M_i^{\text{ПТОЛ}} + \sum_{i=1}^n M_i^{\text{доп сл}}, \quad (9)$$

также включающий в себя две части: $\sum_{i=1}^n M_i^{\text{ПТОЛ}}$ — локомотивы, прогнозируемые к выходу из ПТОЛ, и $\sum_{i=1}^n M_i^{\text{доп сл}}$ — локомотивы, прогнозируемые к подсылке по регулировочному заданию.

Очевидно, что регулировочный резерв $\sum_{i=1}^n M_i^{\text{РР}}$ предназначен для ввода в действие при исчерпании нормативного резерва $\sum_{i=1}^n M_i^{\text{НР}}$, его величина не может быть определена заранее и должна подчиняться условиям расхода $\sum_{i=1}^n M_i^{\text{НР}}$, поставленным согласно (3), (6) в зависимости от разности скоростей $\Delta v^{\text{вх чет/неч}}_{\text{потока}}$.

Следует отметить, что $\Delta v^{\text{вх чет/неч}}_{\text{потока}}$ можно представить разными видами скоростей [12]. Однако применительно к проводимому исследованию целесообразно использовать участковые скорости $v_{\text{уч}}$ как наиболее точно описывающие динамику изменения движения потоков поездов на участках приближения к станции.

¹ Об утверждении временной методики расчета среднесуточного на планируемый месяц количества локомотивов эксплуатируемого парка, оставляемых в оперативный резерв Центральной дирекции управления движением — филиала ОАО «РЖД»: распоряжение ОАО «РЖД» от 28 октября 2014 г. № 428 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.consultant.ru> (дата обращения: 24.06.2024).

Таким образом, исследования показывают, что задача установления баланса тяговых ресурсов на станциях стыкования родов тока может быть решена на основе поиска зависимости между величиной потребного регулировочного резерва $\sum_{i=1}^n M_i^{PP}$ (и прежде всего потребной величиной подсылки $\sum_{i=1}^n M_i^{доп\ сл}$) и разницей прогнозных значений входящих поездопотоков встречных направлений, выраженных через разность участковых скоростей $\Delta v_{уч}^{вх\ чет/неч}$.

Методы исследования. Как отмечалось, на практике задача обеспечения баланса тяговых ресурсов внутри суточного интервала решается в рамках технологии интервального регулирования, которая вводит понятия и оперирует понятиями тяговыми ресурсами, а также сокращенной схемой подвязки тяговых ресурсов к поездам в условиях изменения оперативной обстановки.

Технология интервального регулирования делит сутки на трехчасовые интервалы, и модель регулировочного резерва тягово-графиковых ресурсов в рамках технологии соответствует модели (7), но применительно к рассматриваемому интервалу:

$$\sum_{i=1}^n M_i^{PP\ 3ч} = \sum_{i=1}^n M_i^{ПТОЛ\ 3ч} + \sum_{i=1}^n M_i^{доп\ сл\ 3ч} . \quad (10)$$

Анализ эксплуатационной работы приводит к выводу, что из двух составляющих $\sum_{i=1}^n M_i^{PP\ 3ч}$ сегодня на станциях стыкования родов тока активно используется потенциал $\sum_{i=1}^n M_i^{ПТОЛ\ 3ч}$ и практически не используются возможности $\sum_{i=1}^n M_i^{доп\ сл\ 3ч}$ [13, 14].

Вместе с тем, согласно проведенным исследованиям работы станций за период 2019–2022 гг., в среднем за сутки 30 % всех прибывающих с поездами электровозов обоих родов тока поступает на ПТОЛ для проведения технического обслуживания ТО-2, а доля такого элемента, как «проход локомотивом контрольного поста до захода на смотровую канаву для проведения ТО-2» (далее — «от КП до ТО-2»), в обороте локомотива по станции равна 40 %, при этом время ожидания освобождения стойл для проведения ТО-2 электровозам постоянного и переменного тока составляет от 1 ч и более [15]. Результатом непроизводительных простоев поездных локомотивов из-за ожидания проведения ТО-2 являются задержки поездов обоих направлений на подходах к станции по причине «невыдача локомотива из эксплуатационного депо на график» № 2226ПД, 2564 (рис. 2, 3) и 2579ПМ, 2225ТПМ (рис. 4, 5).

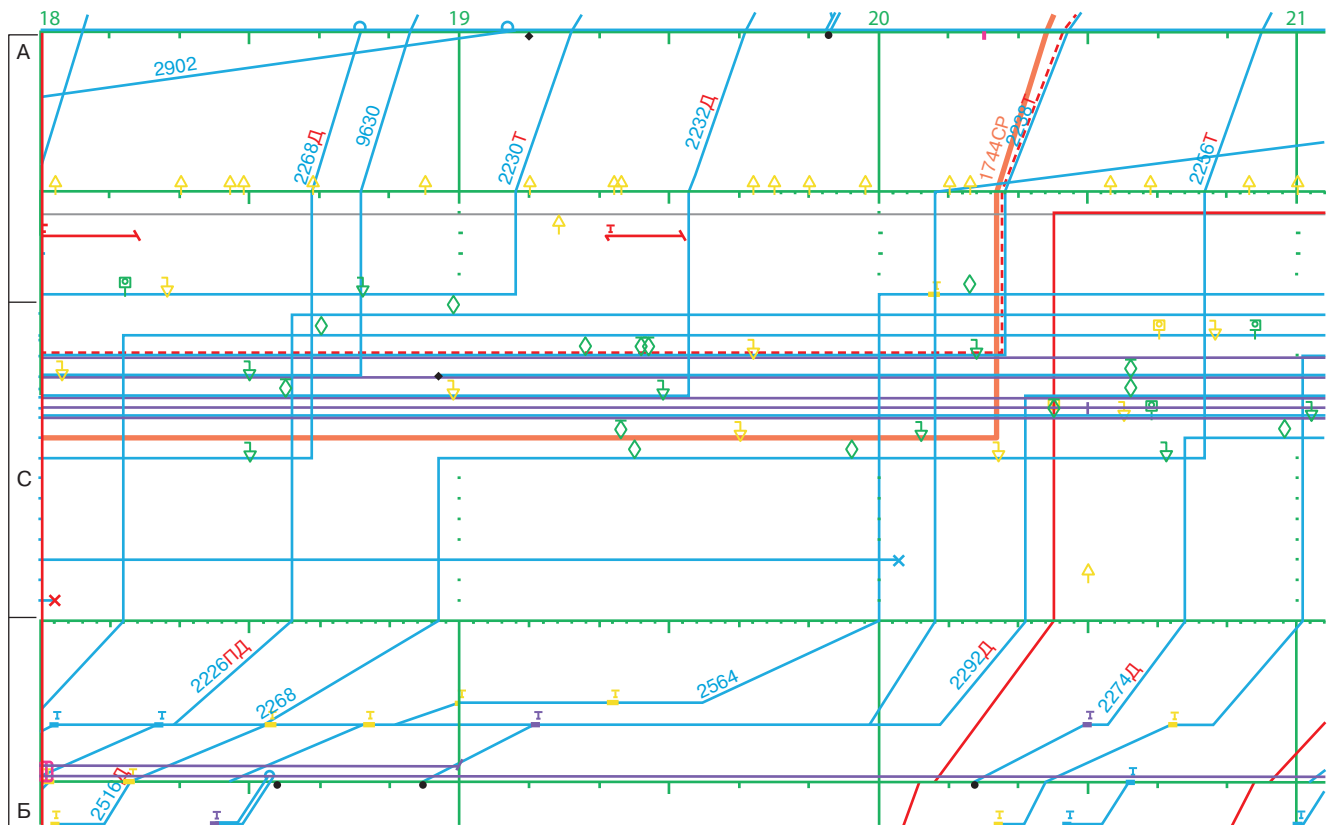


Рис. 2. Пример задержек четных поездов в интервале с 18:00 до 21:00

Fig. 2. Example of delays of even-numbered trains from 18:00 to 21:00

Все вышесказанное позволяет сделать вывод о неэффективности отдельного применения $\sum_{i=1}^n M_i^{\text{ПТОЛ 3 ч}}$ как основы регулировочного резерва, в связи с чем и возникает необходимость использования подсылки тяговых ресурсов $\sum_{i=1}^n M_i^{\text{доп сл 3 ч}}$ как базового инструмента регулировки.

Fig. 3. Fragment of Fig. 2. Train No. 2226PD, 2564 delays:
 ----- delay of even-numbered trains on the approach to
 the current junction station C

Согласно схеме (рис. 6) в случае исчерпания нормативного резерва тяговых ресурсов $\sum_{i=1}^n M_i^{\text{HP}3\text{ч}}$ проводится анализ возможности выдачи необходимого числа локомотивов в заданное время из ПТОЛ $\sum_{i=1}^n M_i^{\text{ПТОЛ}3\text{ч}}$ (как части регулировочного резерва $\sum_{i=1}^n M_i^{\text{PP}3\text{ч}}$) с проверкой соответствия характеристик каждого предназначенного к выдаче локомотива характеристикам предназначенного к отправлению поезда (блок 1) и принятием решения о подвозке локомотива

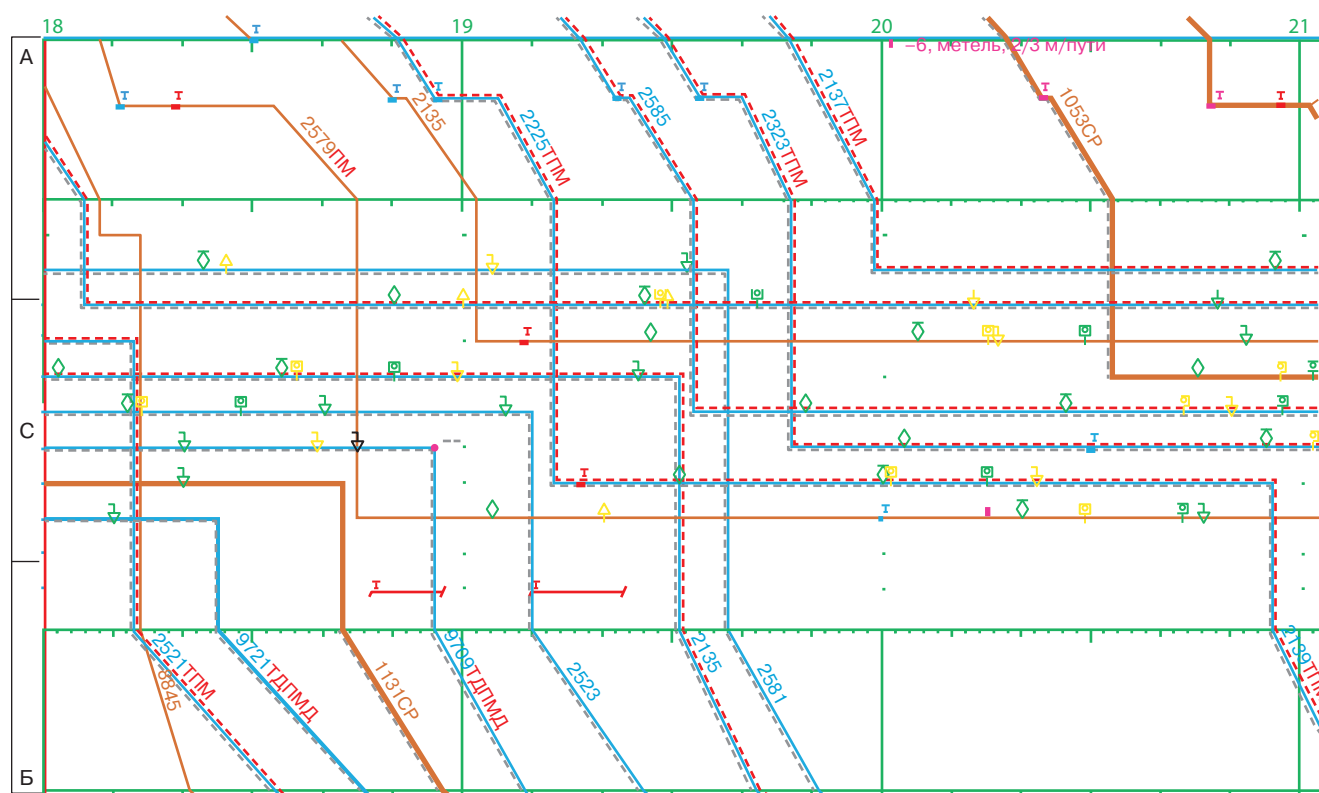


Fig. 4. Example of delays of odd-numbered trains from 18:00 to 21:00

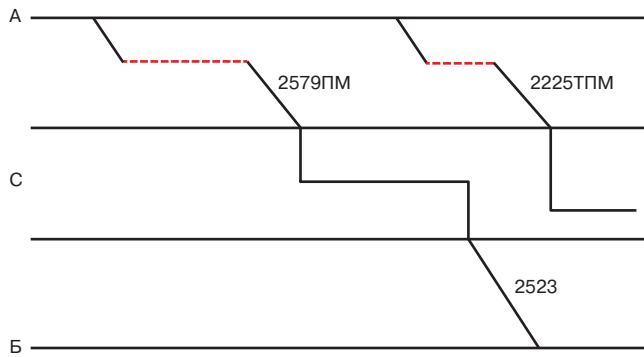


Рис. 5. Фрагмент рис. 4. Задержки поездов № 2579ПМ, 2225ТПМ:

----- задержка поездов нечетного направления на подходе к станции стыкования родов тока С
Fig. 5. Fragment of Fig. 4. Train No. 2579PM, 2225TPM delays: ----- delay of odd-numbered trains on the approach to the current junction station C

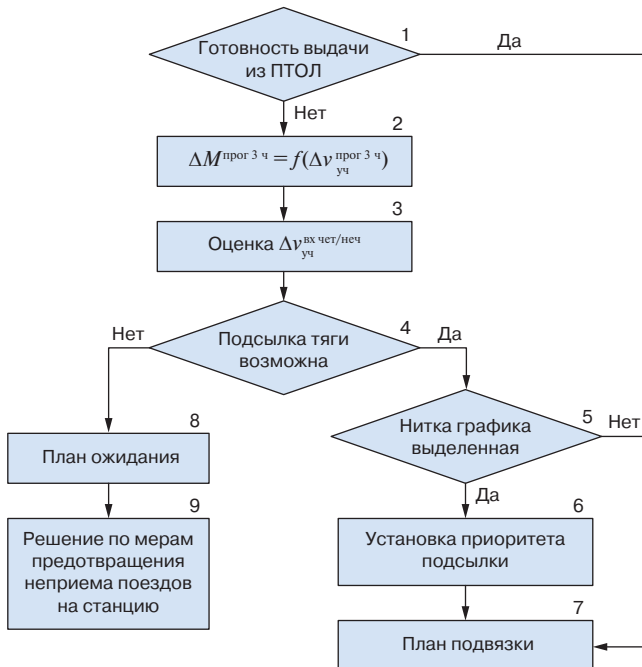


Рис. 6. Схема предлагаемого подхода к организации подвязки в трехчасовом интервале при исчерпании нормативного резерва

Fig. 6. Proposed organisation of coupling in a three-hour interval with the depletion of standard reserve

к нитке графика движения поездов (блок 7). При несоответствии характеристик локомотива, предназначенного к выдаче из ПТОЛ, характеристикам поезда или отсутствию такого локомотива на основе прогнозного графика движения поездов определяется отклонение участковых скоростей встречных потоков поездов $\Delta v_{уч}^{прог 3 ч}$ друг от друга в прогнозируемом трехчасовом интервале и активизация зависимости $\Delta M^{прог 3 ч} = f(\Delta v_{уч}^{прог 3 ч})$ для расчета величины $\Delta M^{прог 3 ч}$ в планируемом трехчасовом интервале как отклонения

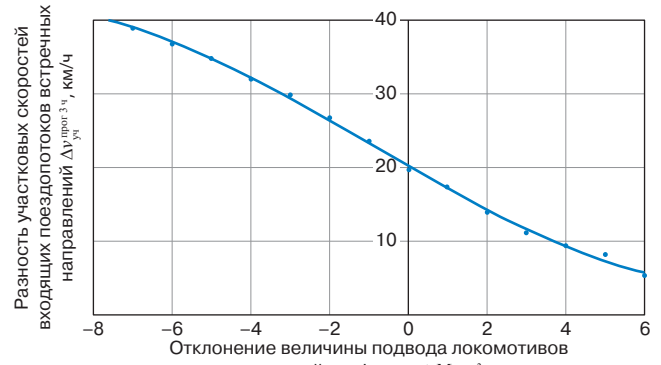


Рис. 7. Внутрисуточная зависимость величины подсылки тяговых ресурсов от баланса участковых скоростей встречных потоков поездов по трехчасовым интервалам

Fig. 7. Intra-day dependence of the dispatched amount of traction resources on the balance of service speeds of oncoming train flows at three-hour intervals

от числа локомотивов подвода, заданного графиком (блок 2). Далее выполняется проверка наличия избытка тяговых ресурсов соответствующих серий на близлежащих станциях полигона и осуществляется оценка значения участковой скорости поездопотока соответствующих направлений $v_{уч}^{вх чет/неч}$ (блок 3) и возможности подсылки тяговых ресурсов по регулировке (блок 4). При наличии такой возможности устанавливается приоритет подсылки (блок 6) в зависимости от категории нитки графика (блок 5) и принимается предварительное решение о подвязке локомотива к поезду (блок 7). При отсутствии возможности подсылки не обеспеченная тяговым ресурсом нитка графика заносится в план ожидания по обеспечению тягой (блок 8) и осуществляются меры по предотвращению неприема поездов на станцию (блок 9).

Предлагаемая схема не противоречит практике работы, но содержит новый элемент: зависимость $\Delta M^{прог 3 ч} = f(\Delta v_{уч}^{прог 3 ч})$ (блок 2), установленную на основе анализа статистических данных в рамках исследования.

В ходе анализа в качестве базового периода был принят год, наихудший по показателям эксплуатационной работы. За каждые сутки анализируемого периода исследовались данные на основе исполненных графиков движения поездов, что дало возможность установить сначала наличие среднесуточной зависимости $\Delta M^{прог сут} = f(\Delta v_{уч}^{прог сут})$, а затем и среднеинтервальной (внутрисуточной) зависимости $\Delta M^{прог 3 ч} = f(\Delta v_{уч}^{прог 3 ч})$ (рис. 7), используемой в предлагаемом подходе.

Предлагаемая зависимость позволяет прогнозировать подсылку тяговых ресурсов в любой период суток с опережением на величину, определяемую временем подсылки:

$$t_{ij}^{доп сл} = \frac{S_{ij}^{доп сл}}{v_{уч}^{вх чет/неч}}, \quad (11)$$

где $S_{ij}^{\text{доп сл}}$ — протяженность маршрута подсылки i -й серии локомотива от станции избытка тяговых ресурсов, км.

Например, для конкретной станции стыкования родов тока С, согласно оперативным данным по подходам поездов с четного и нечетного направлений, включающим номера N_i и массы брутто $m_{\text{бр}}$ поездов, серии локомотивов M_i и их распределение по составляющим баланса тяги в заданном трехчасовом интервале, после определения нормативного резерва и захода/выхода локомотивов из ПТОЛ устанавливается, что две нитки графика в интервале остаются не обеспеченными тягой, что требует подсылки двух электровозов постоянного тока серий 2ЭС4К и 3ЭС4К. Этот результат требует проверки вследствие принятия мер по восстановлению парности тяговых ресурсов с опережением по времени на девятичасовой период, в течение которого оперативная ситуация может измениться.

При использовании прогнозного графика движения поездов для определения разности между участковыми скоростями встречных потоков поездов в заданном интервале (средняя участковая скорость входящего потока поездов четного направления — 45,6 км/ч, нечетного — 17,6 км/ч) устанавливается ее значение (27,8 км/ч), по которому с помощью полученной зависимости (рис. 7) определяется число локомотивов (3 ед.), прогнозируемых к прибытию, что подтверждает объем и возможность подсылки.

Далее с учетом соответствующих значений участковой скорости производится формирование вариантов восстановления парности с подбором опережения по времени на три-, шести-, девятичасовые периоды и оценкой возможных маршрутов подсылки со станций В и Т (таблица).

Выбор рабочего маршрута определяется по критерию минимизации времени подсылки:

$$t_{ij}^{\text{доп сл}} \rightarrow \min. \quad (12)$$

Для рассматриваемого случая критерию соответствует маршрут Т—С (время подсылки 3,2 ч), по которому согласно приоритету нитки графика первым должен отправиться электровоз серии 3ЭС4К, вторым — электровоз серии 2ЭС4К.

Т а б л и ц а

Варианты возможных маршрутов подсылки локомотивов резервом

Table

Possible routes for dispatching reserve locomotives

Маршрут подсылки	N_i	$m_{\text{бр}}$	M_i	$S_{ij}^{\text{доп сл}}$	$v_{\text{уч}}^{\text{нечт}}$	$t_{ij}^{\text{доп сл}}$
В—С	91XX	8988	3ЭС4К	232	49,7	4,7
Т—С				153,8	48,1	3,2
В—С	25XX	5677	2ЭС4К	232	49,7	4,7
Т—С				153,8	48,1	3,2

Обсуждение и заключение. Применение предлагаемого подхода с использованием зависимости $\Delta M^{\text{прог 3 ч}} = f(\Delta v_{\text{уч}}^{\text{прог 3 ч}})$ позволяет повысить эффективность технологии установления баланса тяговых ресурсов на станциях стыкования родов тока путем создания механизма для обоснования объема и своевременности подсылки резервов по регулировке $\sum_{i=1}^n M_i^{\text{доп сл 3 ч}}$. При этом использование инструментария $\Delta M^{\text{прог 3 ч}} = f(\Delta v_{\text{уч}}^{\text{прог 3 ч}})$ не исключает установление баланса за счет других видов резервов ($\sum_{i=1}^n M_i^{\text{НР 3 ч}}$ и $\sum_{i=1}^n M_i^{\text{ПТОЛ 3 ч}}$).

Полученные в ходе исследования экономические оценки позволяют предположить, что эффект от применения технологии установления баланса с использованием $\Delta M^{\text{прог 3 ч}} = f(\Delta v_{\text{уч}}^{\text{прог 3 ч}})$ на одной станции стыкования родов тока в сутки составит приблизительно 170 тыс. руб., а по итогам года может достигнуть уровня 60 млн руб. В масштабе сети российских железных дорог сумма эффекта по аналогичным станциям может быть оценена примерно в 4,5 млн руб. в сутки, что в год составит более 1,6 млрд руб.

Попытки решить проблему путем оптимизации оборота локомотивов на основе автоматизированного составления графиков оборота дали положительные результаты, но не привели к окончательному решению. В условиях автоматизации построение оптимального графика оборота локомотивов на участках обращения сводится к решению задачи линейного программирования, в которой минимизируется целевая функция затрат, связанных с перцепкой. Однако преодоление многовариантности при построении оптимальных графиков оборота в условиях динамического изменения оперативной обстановки продолжает оставаться актуальной задачей. И это несмотря на использование принципа рассмотрения не всего множества возможных перцепок, а лишь небольшой его части [16].

Существует авторитетное мнение, что для решения задачи управления тяговыми ресурсами необходимо применение специальной динамической оптимизационной модели. При этом в качестве расчетного основания должна использоваться динамическая транспортная задача с задержками [17–19].

Подводя итоги, следует отметить, что предпринимаемые специалистами усилия по увязке и сопровождению графика оборота локомотивов, формированию резервов и применению технологии интервального регулирования тяговых ресурсов, казалось бы, исключают затруднения в обеспечении поездов грузового движения локомотивами. Тем не менее существует серьезная проблема установления баланса тяговых ресурсов в местах размена тяги во внутрисуточных периодах, что приводит к остановкам работы станций, неритмичности приема поездов, существенному снижению пропускной способности.

Изложенные в статье результаты не являются альтернативой развивающимся в настоящее время подходам. На основе ряда частных решений, и прежде всего доказательства наличия зависимости между колебаниями скоростей поездопотоков и величиной потребных резервов тяги, установленной для заданного размера эксплуатируемого парка, предлагается уточнить существующие модели эксплуатации локомотивного парка во внутрисуточных периодах. Это позволит не только существенно компенсировать влияние на баланс тяговых ресурсов внутрисуточной неравномерности дислокации локомотивного парка, но и в целом повысить степень его рациональной эксплуатации, усилить пропускную способность линий.

Финансирование: авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

Funding: the authors received no financial support for the research, authorship, and publication of this article.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах.

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest and no financial interests in any material discussed in this article.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Некрашевич В. И. Использование поездных локомотивов в грузовом движении / ВНИИЖТ; БелГУТ. Гомель: БелГУТ, 2001. 269 с.
2. Nekrashevich V. I. *Use of train locomotives in freight traffic*. Gomel: BelGUT; 2001 269 p. (In Russ.).
3. Kotenko A., Kotenko O. Locomotive Team Productivity as a Criterion for Optimal Locomotive Fleet Management. In: Manakov A., Edigarian A. (eds) *International Scientific Siberian Transport Forum TransSiberia – 2021*. Cham: Springer; 2022. p. 512–520. (Lecture Notes in Networks and Systems; vol 402). https://doi.org/10.1007/978-3-030-96380-4_56.
4. Мехедов М. И., Мугинштейн Л. А. Пропускная и провозная способность полигона в зависимости от тяговых ресурсов // Управление товарными потоками и перевозочным процессом на железнодорожном транспорте на основе клиентоориентированности и логистических технологий: коллективная монография членов и научных партнеров Объединенного ученого совета ОАО «РЖД». СПб., 2019. С. 225–238. (Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО «РЖД»).
5. Mehedov M. I., Muginshteyn L. A. Site throughput and carrying capacity as a function of traction resources. In: *Management of commodity flows and carriage processes on railway transport on the basis of customer orientation and logistics technologies: a joint monograph by members and scientific partners of the Joint Scientific Council of the Russian Railways*. St. Petersburg; 2019. p. 225–238. (Bulletin of the Joint Scientific Council of the Russian Railways). (In Russ.).
6. Моргунов А. И. Методические подходы к построению прогнозного графика оборота локомотивов // Развитие железнодорожного транспорта в условиях реформ: сб. науч. тр. М.: Интекст, 2003. С. 81–87.
7. Morgunov A. I. Methodological approaches to locomotive turnaround schedule forecasting. In: *Development of Railway Transport during Reforms: Collection of scientific articles*. Moscow: Intext Publ.; 2003. p. 81–87. (In Russ.).
8. Гордон М. А. Особенности работы систем управления движением поездов на станциях стыкования в Российской Федерации // Автоматика на транспорте. 2019. Т. 5, № 1. С. 62–77. <https://doi.org/10.20295/2412-9186-2019-1-62-77>.
9. Gordon M. A. Peculiarities of train traffic control systems at docking stations in Russia. *Transport Automation Research*. 2019;5(1):62-77. (In Russ.). <https://doi.org/10.20295/2412-9186-2019-1-62-77>.
10. Имитационная модель функционирования станции стыкования / Д. И. Бодриков [и др.] // Наука и техника транспорта. 2021. № 2. С. 45–49. EDN: <https://www.elibrary.ru/vunook>.
11. Bodrikov D. I., Vorobyov A. A., Smirnov V. P., Fadeikin T. N. Simulation model of current change station operation. *Science and Technology in Transport*. 2021;(2):45-49. (In Russ.). EDN: <https://www.elibrary.ru/vunook>.
12. Тяговое обеспечение поездной работы при изменениях оперативной обстановки / Е. О. Дмитриев [и др.] // Вестник транспорта Поволжья. 2021. № 2 (86). С. 58–66. EDN: <https://www.elibrary.ru/kynndt>.
13. Dmitriyev E. O., Sukhov A. A., Petrov A. S., Alekseyevnina E. A. Traction support of train operation during changes in operational situation. *Vestnik transporta Povolzhya*. 2021;(2):58-66. (In Russ.) EDN: <https://www.elibrary.ru/kynndt>.
14. Осипов Н. И. Применение имитационного моделирования для оценки влияния величины интервала прибытия поездов на работу станций стыкования родов тягового тока // Фундаментальные и прикладные вопросы транспорта. 2022. № 4 (7). С. 16–22. https://doi.org/10.52170/2712-9195_2022_4_16.
15. Osipov N. I. Simulation modelling to estimate the influence of the trains arrival interval on the work of traction current junction stations. *Fundamental'nyye i prikladnyye voprosy transporta*. 2022;(4):16-22. (In Russ.). https://doi.org/10.52170/2712-9195_2022_4_16.
16. Имитационная модель определения рациональных размеров неснижаемого резерва локомотивов на станциях их оборота / Е. А. Сотников [и др.] // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2018. Т. 77, № 3. С. 157–164. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2018-77-3-157-164>.
17. Sotnikov E. A., Gonik M. M., Khomyakov S. V., Mikhaylov S. V. Simulation model for determining the rational dimensions of the irreducible reserve of locomotives at the stations of its turnover. *Russian Railway Science Journal*. 2018;77(3):157-164. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2018-77-3-157-164>.
18. Нормирование размеров неснижаемого резерва локомотивов на станциях их оборота / Е. А. Сотников [и др.] // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2020. Т. 79, № 1. С. 3–8. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2020-79-1-3-8>.
19. Sotnikov E. A., Gonik M. M., Khomyakov S. V., Mikhaylov S. V. Rationing the size of the irreducible reserve of locomotives at the turnover stations. *Russian Railway Science Journal*. 2020;79(1):3-8. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2020-79-1-3-8>.
20. Кувондилов Ж. О., Цаплин А. Е. Методика анализа и математическая модель функции готовности локомотивного парка с учетом холодного резерва // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2019. Т. 16, вып. 4. С. 631–641. <https://doi.org/10.20295/1815-588X-2019-4-631-641>.
21. Kuvondikov J. O., Tsaplin A. E. Method of analysis and simulation model of locomotive fleet availability function accounting for cold standby reserve. *Proceedings of Petersburg Transport University*. 2019;16(4):631-641. (In Russ.). <https://doi.org/10.20295/1815-588X-2019-4-631-641>.
22. Мачерет Д. А. Анализ долгосрочной динамики скоростей в грузовом движении // Железнодорожный транспорт. 2012. № 5. С. 66–71. EDN: <https://www.elibrary.ru/nlbijm>.
23. Macheret D. A. Analysis of long-term trends of speeds in freight traffic. *Zheleznodorozhnyy transport*. 2012;(5):66-71. (In Russ.). EDN: <https://www.elibrary.ru/nlbijm>.
24. Коробейников А. П., Стародубцева В. А. Анализ эффективности работы станций стыкования // Научные горизонты. 2022. № 4 (56). С. 55–59. EDN: <https://www.elibrary.ru/vtclldj>.

Korobeynikov A. P., Starodubtseva V. A. Analysis of the efficiency of docking stations. *Cientific Horizons*. 2022;(4):55-59. (In Russ.). EDN: <https://www.elibrary.ru/vtclldj>.

14. Серегин И. В., Немцов Ю. В. Определение оптимальных маршрутов следования поездов повышенной массы и длины при наличии лимитирующих участков железнодорожной сети // Вестник транспорта Поволжья. 2023. № 4 (100). С. 88–94. EDN: <https://www.elibrary.ru/efypll>.

Seregin I. V., Nemtsov Yu. V. Determination of optimal routes of weighted and lengthened trains with limiting sections of the railway network. *Vestnik transporta Povolzhya*. 2023;(4):88-94. (In Russ.). EDN: <https://www.elibrary.ru/efypll>.

15. Мехедов М. И., Корниенко Н. В. Влияние технического и технологического оснащения пункта технического обслуживания локомотивов на пропускную способность железнодорожной линии // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2021. Т. 80, № 4. С. 225–232. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-4-225-232>.

Mekhedov M. I., Kornienko N. V. Influence of technical and technological equipment of a locomotive maintenance point on the capacity of a railway line. *Russian Railway Science Journal*. 2021;80(4):225-232. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-4-225-232>.

16. Максимов Д. В. Автоматизация составления графика оборота локомотивов // Труды ВНИИЖТ. М., 1980. Вып. 633. С. 86–96.

Maksimov D. V. Automation of locomotives turnaround scheduling. *Proceedings of the Railway Research Institute*. Moscow; 1980. Issue. 633. p. 86–96. (In Russ.).

17. Козлов П. А., Вакуленко С. П. Проблема оптимизации оборота поездных локомотивов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения (Вестник РГУПС). 2016. № 3. С. 80–89. EDN: <https://www.elibrary.ru/wvnpnd>.

Kozlov P. A., Vakulenko S. P. Train locomotive turnaround optimisation issue. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey so-obshcheniya (Vestnik RGUPS)*. 2016;(3):80-89. (In Russ.). EDN: <https://www.elibrary.ru/wvnpnd>.

18. Козлов П. А., Вакуленко С. П. Расчет согласованных режимов оборота локомотивов и технического обслуживания // Наука и техника транспорта. 2016. № 3. С. 90–95. EDN: <https://www.elibrary.ru/wmvaxl>.

Kozlov P. A., Vakulenko S. P. Calculation of agreed locomotive turnaround and maintenance modes. *Science and Technology in Transport*. 2016;(3):90-95. (In Russ.). EDN: <https://www.elibrary.ru/wmvaxl>.

19. Козлов П. А., Вакуленко С. П. Модель оптимального графика оборота поездных локомотивов // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2015. № 2. С. 15–20. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2015-0-2-15-20>.

Kozlov P. A., Vakulenko S. P. Simulation Model to Optimize Turnover Schedule for Train Locomotives. *Russian Railway Science Journal*. 2015;(2):15-20. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2015-0-2-15-20>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Наталья Владимировна КОРНИЕНКО, ведущий технолог, научный центр «Цифровые модели перевозок и технологии энергосбережения» (НЦ «ЦМПЭ»), Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ, 129626, г. Москва, ул. 3-я Мытищинская, д. 10), Author ID: 1080941, <https://orcid.org/0000-0002-1375-2071>

Михаил Иванович МЕХЕДОВ, канд. техн. наук, заместитель генерального директора, директор НЦ «ЦМПЭ», Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ, 129626, г. Москва, ул. 3-я Мытищинская, д. 10), Author ID: 1019989, <https://orcid.org/0000-0002-8174-214X>

Алексей Геннадьевич КОТЕНКО, д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник, НЦ «ЦМПЭ», Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ, 129626, г. Москва, ул. 3-я Мытищинская, д. 10), Author ID: 759781, <https://orcid.org/0000-0003-1638-9965>, Author ID (SCOPUS): 57194491163, Researcher ID (WoS): AGC-1482-2022

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Natalya V. KORNIENKO, Leading Technologist, Digital Models of Transportation and Energy Saving Technologies Research Centre, Railway Research Institute (129626, Moscow, 10, 3rd Mytishchinskaya St.), Author ID: 1080941, <https://orcid.org/0000-0002-1375-2071>

Mikhail I. MEKHEDOV, Cand. Sci. (Eng.), Deputy General Director, Director of the Digital Models of Transportation and Energy Saving Technologies Research Centre, Railway Research Institute (129626, Moscow, 10, 3rd Mytishchinskaya St.), Author ID: 1019989, <https://orcid.org/0000-0002-8174-214X>

Alexey G. KOTENKO, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief Researcher, Digital Models of Transportation and Energy Saving Technologies Research Centre, Railway Research Institute (129626, Moscow, 10, 3rd Mytishchinskaya St.), Author ID: 759781, <https://orcid.org/0000-0003-1638-9965>, Author ID (SCOPUS): 57194491163, Researcher ID (WoS): AGC-1482-2022

ВКЛАД АВТОРОВ

Наталья Владимировна КОРНИЕНКО. Формулировка цели, новизны, методологии исследования, подготовка и анализ исходных данных, описание материалов, выводы (35%).

Михаил Иванович МЕХЕДОВ. Формирование направления исследовательской деятельности (30%).

Алексей Геннадьевич КОТЕНКО. Формулировка цели, новизны, методологии исследования, подготовка и анализ исходных данных, описание материалов, выводы (35%).

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Natalya V. KORNIENKO. Setting the goal, novelty, research methodology, preparation and analysis of initial data, description of materials, conclusions (35%).

Mikhail I. MEKHEDOV. Formation of the line of research (30%).

Alexey G. KOTENKO. Setting the goal, novelty, research methodology, preparation and analysis of initial data, description of materials, conclusions (35%).

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

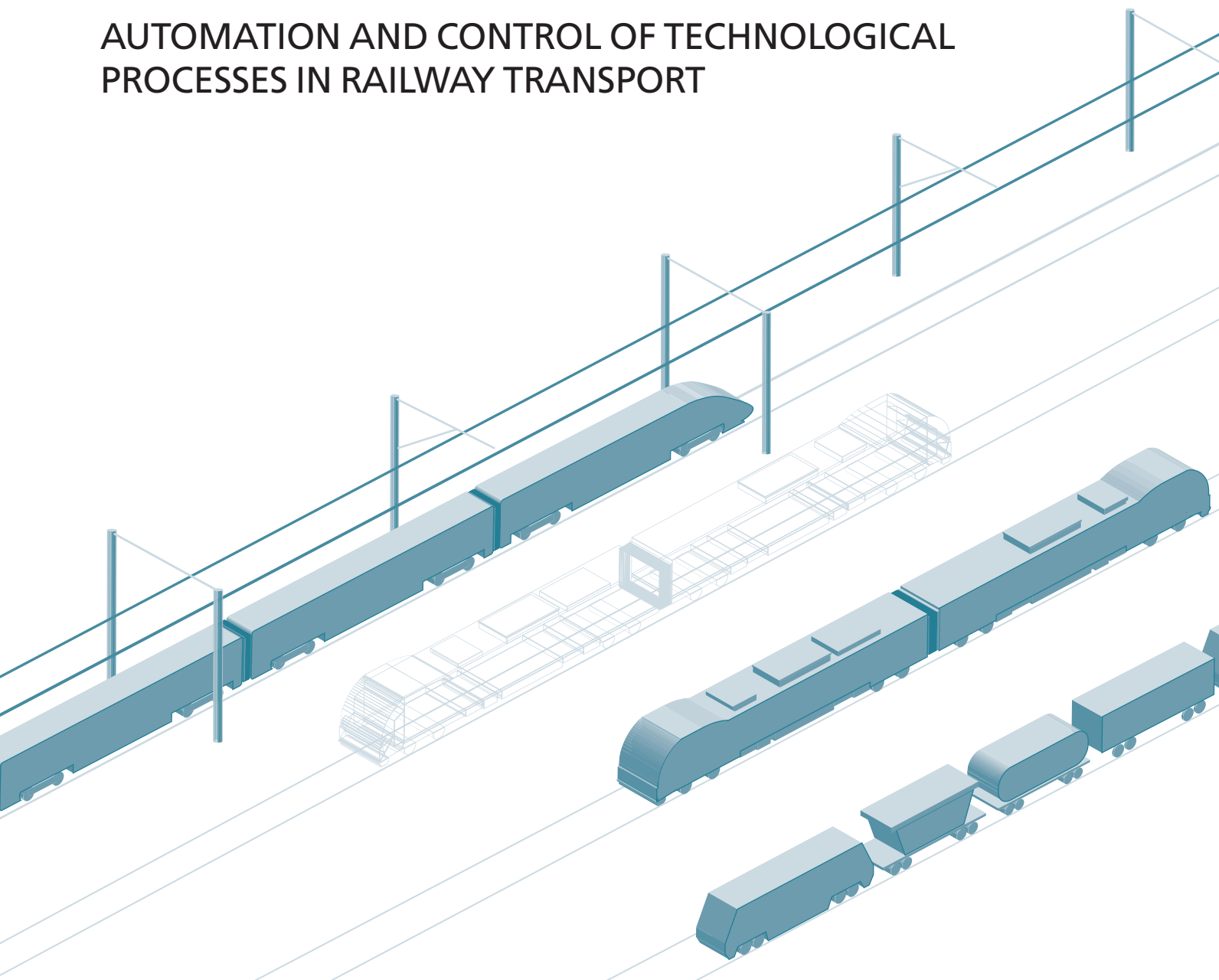
The authors have read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию 05.07.2024, рецензия от первого рецензента получена 22.07.2024, рецензия от второго рецензента получена 29.07.2024, принята к публикации 08.08.2024.

The article was submitted 05.07.2024, first review received 22.07.2024, second review received 29.07.2024, accepted for publication 08.08.2024.

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

AUTOMATION AND CONTROL OF TECHNOLOGICAL
PROCESSES IN RAILWAY TRANSPORT



АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ
НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

Оригинальная статья

УДК 656.222.4

EDN: <https://elibrary.ru/rxclkz>Планирование работы машинистов городского рельсового
транспортаА. В. Маркевич¹, В. Г. Сидоренко²✉¹Терралинк Девелопмент,

Москва, Российская Федерация

²Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ))

Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Введение. Статья посвящена обобщению опыта решения задач планирования работы машинистов городского рельсового транспорта, результаты которого оказывают существенное влияние на безопасность движения. Целью исследования является выявление общих черт в подходах к планированию работы производственных и человеческих ресурсов городского рельсового транспорта; анализ результатов, достигнутых в планировании работы машинистов; определение направления расширения сферы применения и дальнейших исследований, связанных с комбинированием различных методов при решении задач планирования.

Материалы и методы. Объектом исследования является математическое обеспечение элементов интеллектуальных транспортных систем, связанных с планированием работы машинистов. Для формализации задачи построения графиков работы машинистов введено описание результатов построения в формате кортежей, т. е. последовательностей компонентов.

Результаты. Анализ опыта создания сценариев управления различными видами ресурсов (производственными и человеческими) позволил выявить единство постановок задач и подходов к их решению при повышении комфортности получения транспортных услуг и условий работы людей, чему уделяется существенное внимание на этапе планирования перевозочного процесса. Проанализированы результаты функционирования созданных авторами систем, которые являются составными частями интеллектуальных транспортных систем, и достигаемые при этом эффекты. Предложен новый для отечественных железных дорог подход к формализации задачи планирования работы машинистов, иллюстрирующий предложенную классификацию задач планирования и позволяющий объединить результаты построения графиков работы машинистов, выполняющих разные типы работ. Показана возможность применения метода динамического программирования Беллмана и генетического алгоритма к решению поставленной задачи. Выполнена статистическая обработка полученных данных. Выявлены предпосылки для создания единой методологии интеллектуализации планирования работы ресурсов разных типов на городском рельсовом транспорте.

Обсуждение и заключение. Полученные результаты могут быть использованы и при формировании графиков работы локомотивных бригад, например, для условий Московского центрального кольца, при дополнении существующей модели. Использование разработанных алгоритмов позволяет улучшить показатели равномерности автоматически построенных графиков работ по сравнению с построенными вручную применительно к реальным транспортным системам.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: интеллектуальные транспортные системы, критерии качества управления, планирование, локомотивные бригады, машинист, электроподвижной состав, график движения поездов, равномерность

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Маркевич А. В., Сидоренко В. Г. Планирование работы машинистов городского рельсового транспорта // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2024. Т. 83, № 3. С. 259–269.



AUTOMATION AND CONTROL OF TECHNOLOGICAL PROCESSES IN RAILWAY TRANSPORT

Original article

UDK 656.222.4

EDN: <https://elibrary.ru/rxclkz>



Urban railway driver scheduling

Agata V. Markevich¹, Valentina G. Sidorenko²✉

¹Terralink Development,
Moscow, Russian Federation

²Russian University of Transport,
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The article summarises the experience of urban railway driver scheduling with a significant impact on traffic safety. The study is intended to identify commonalities in the scheduling of production and human resources in urban railways to analyse the results achieved in driver scheduling; to identify further research and applications related to the combination of different scheduling methods.

Materials and methods. The object of research is mathematical support of elements of smart transport systems related to driver scheduling. The formalisation of driver scheduling required a description of construction results in the format of suites, i. e. component sequences.

Results. The analysis of resource management scenarios (production and human) has revealed the unity of problem statements and approaches to their solution while improving the comfort of transport services and peoples working conditions, which is given considerable attention at the stage of transport scheduling. The paper analyses the functioning of the systems created by the authors, which systems are part of smart transport systems, and the effects achieved. The paper proposes a new, for Russian railways, way to formalise driver scheduling, illustrating the proposed classification of scheduling tasks and combining the scheduling results for drivers performing different types of work. The article shows possible application of the Bellman dynamic programming method and genetic algorithm to the solution of the problem. The article provides statistical processing of the obtained data. The paper identifies prerequisites for creating a unified methodology for smart scheduling of different types of resources on urban railways.

Discussion and conclusion. The results can also be used in scheduling locomotive crews, for example, for the Moscow Central Ring, with the existing model expanded. The algorithms produce automatic schedules more balanced than manual schedules with respect to real transport systems.

KEYWORDS: smart transport systems, management quality criteria, scheduling, locomotive crews, driver, electric rolling stock, train schedule, uniformity

FOR CITATION: Markevich A. V., Sidorenko V. G. Urban railway driver scheduling. *Russian Railway Science Journal*. 2024;83(3):259-269. (In Russ.).

✉ valenfalk@mail.ru (V. G. Sidorenko)

© Markevich A. V., Sidorenko V. G., 2024

Введение. Для мегаполисов и крупных городских агломераций характерна тенденция сращивания систем городского рельсового транспорта (метрополитен, легкое метро, трамвай, монорельс) и пригородного железнодорожного транспорта, объединение их в единую транспортную систему, к которой предъявляются единые требования по безопасности, интенсивности и комфортности движения [1–4]. В нашей стране лидером в этом направлении является Москва, но и в других городах-миллионниках прослеживается это направление развития транспортной инфраструктуры. Примером могут служить Нижегородская и Екатеринбургская агломерации. Необходимость выполнения единых требований определяет потребность в использовании опыта, накопленного для одного вида транспорта и для других, с которыми этот вид транспорта интегрируется. При создании элементов интеллектуальных транспортных систем для Московского центрального кольца (МЦК) и Московских центральных диаметров (МЦД) широко применяется опыт, накопленный при решении аналогичных задач для метрополитена. Обеспечения заданного уровня мобильности населения, максимизации показателей использования транспортной инфраструктуры, повышения безопасности и эффективности транспортного процесса, комфортности для работников и пользователей транспорта возможно достичь путем автоматизированного поиска и принятия к реализации максимально эффективных сценариев управления на основе использования комбинации различных методов управления, оптимизации и машинного обучения. Предотвращение инцидентов безопасности на транспорте напрямую зависит от того, насколько качественно выполнено планирование транспортных процессов. Устойчивость составленных планов и графиков к различным внешним возмущениям позволит минимизировать потери в случае возникновения различных сбойных ситуаций или инцидентов безопасности [5].

Цель данной статьи — показать необходимость и возможность комбинирования различных методов решения задач управления на разных этапах решения задачи построения графика работы (ГР) машинистов городского рельсового транспорта, а также показать еще одну область применения для МЦК опыта, накопленного на метрополитене.

При решении задач управления можно выявить единство подходов к планированию функционирования как человеческих ресурсов, так и подвижного состава и составлению трех тесно связанных между собой технологических документов, регламентирующих организацию эксплуатационной работы (рис. 1):

- график движения поездов (ГДП);
- график оборота подвижного состава;
- график работы локомотивных бригад.

В документах всех трех типов прослеживается единство условных обозначений и принципов построения, выбранных критериев качества графика (рис. 1). Стоит отметить, что общность подходов к решению задач управления находит отражение в том, что рациональное построение каждого из графиков дает широкий спектр положительных эффектов, которые пересекаются между собой и усиливаются. При составлении схемы авторами учтен принятый в ОАО «РЖД» подход к оценке эффективности работ плана научно-технического развития. Это нашло подтверждение в ходе создания и широкой эксплуатации на Московском метрополитене и адаптации к условиям МЦК таких систем, как автоматизированная система построения планового графика движения поездов [6] и интеллектуальная система построения ГР машинистов [7].

Результаты решения задачи обеспечения равномерности интервалов движения поездов при построении ГДП представлены в работе [8], а равномерности проведения технического обслуживания подвижного состава при построении графика оборота подвижного состава в работе [9]. В работах [10–16] рассматриваются вопросы построения графика работы локомотивных бригад для пригородного и дальнего сообщения, условия организации работы на которых отличаются от условий на городском рельсовом транспорте. Зарубежные авторы также обращаются в своих работах к данной теме [17–21]. Вопросы равномерности распределения работ в указанных статьях не рассматриваются. В данной статье рассмотрено решение задачи обеспечения равномерности загрузки локомотивных бригад на примере работы машинистов городского рельсового транспорта. К системам городского рельсового транспорта относятся МЦК, МЦД и метрополитен.

В случае когда управление подвижным составом осуществляется только машинистом, без участия помощника, как это реализовано в настоящее время на Московском метрополитене, локомотивная бригада состоит только из машиниста, и задача построения графика работы локомотивных бригад сводится к задаче построения ГР машинистов. В случае когда управление подвижным составом осуществляется машинистом совместно с помощником, процесс построения графика работы локомотивных бригад может быть проведен в два этапа. Сначала выполняется построение ГР машинистов, а затем с учетом особенностей формирования локомотивной бригады (например, психологической совместимости машинистов и помощников) ГР помощников. Алгоритмы построения обоих ГР схожи, различаются ограничения. При этом процесс построения графика работы локомотивных бригад может носить итерационный характер.

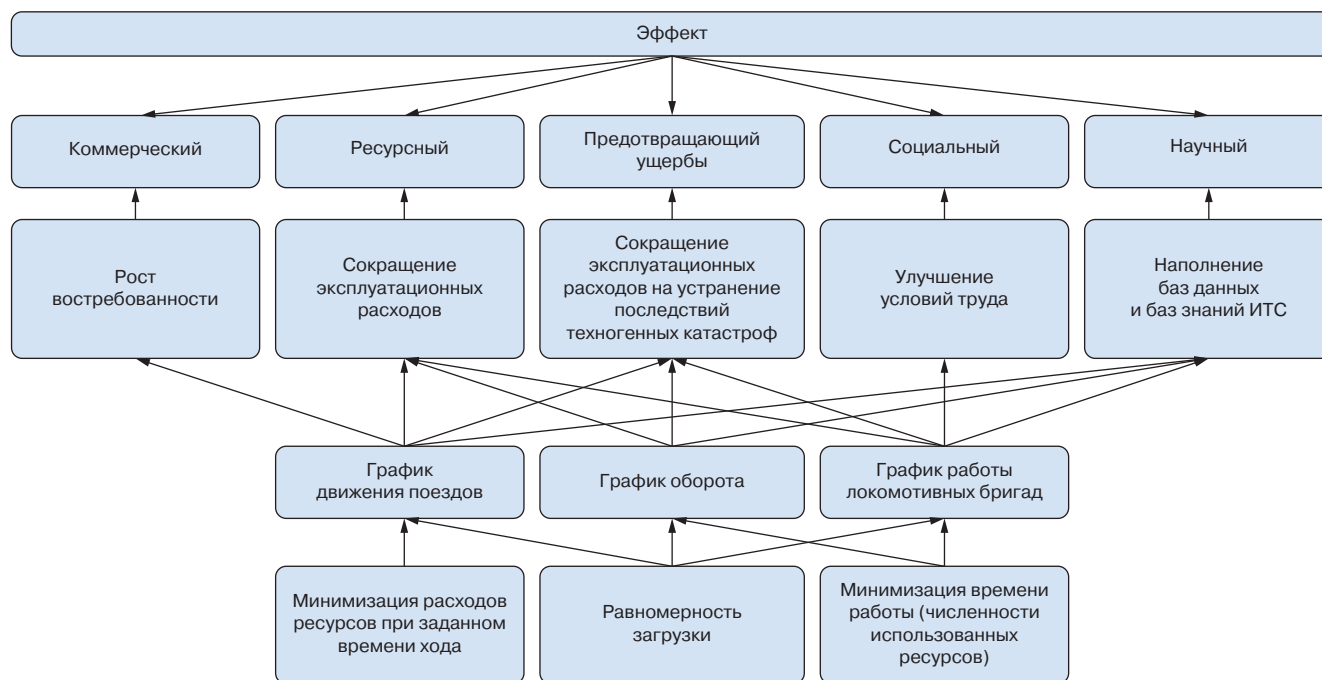


Рис. 1. Единство подходов к определению эффективности результатов планирования

Fig. 1. Unity of approaches to determining scheduling efficiency

Материалы и методы. Анализ технологических процессов Московского метрополитена и МЦК показал, что существует три типа работ, которые выполняют машинисты, непосредственно задействованные в организации пассажирского движения. Это позволило выделить три рассматриваемых «типа» машинистов:

- поездные (основные) — управляющие одним и тем же составом в течение длительного времени внутри рабочей смены;
- маневровые — осуществляющие маневровые перемещения состава при смене направления движения;
- подменные — управляющие составами во время обеденных перерывов поездных и маневровых машинистов.

Пример объединения этих работ представлен на рис. 2 в формате графика оборота, принятом на Московском метрополитене, с нанесенной на него разбивкой по основным рабочим сменам (РС) и подменным рабочим интервалам (РИ). На рисунке проиллюстрирован принцип объединения ГР основных и подменных машинистов с учетом времени проезда до станции осуществления подмены. В ситуации 1 основной машинист № 4 маршрута 4 прежде чем начать работу основным машинистом, осуществляет подмену машиниста № 2 на маршруте 7. В ситуации 2 машинист № 2 маршрута 11 осуществляет подмену дважды: до работы основным машинистом подменяет машиниста № 1 на маршруте 21, а после — машиниста № 4 на маршруте 22. В ситуации 3 машинист № 3 маршрута 21

прежде чем начать работу основным машинистом, осуществляет подмену машиниста № 4 на маршруте 38. При этом допустимая длительность суммарной РС не превышает. Длительность основных РС рассчитывается с учетом времени приемки и сдачи подвижного состава, что отражено на рис. 2. Высота изображений интервалов работы машинистов различна: в начале основной РС и подменного РИ изображение выше, чем в середине, что соответствует режиму приемки, а в конце — ниже, что соответствует сдаче. Средняя часть изображения соответствует непосредственно движению. Длительность интервалов времени приемки-сдачи определяется правилами приемки и сдачи подвижного состава в зависимости от места нахождения состава. Данные получены с использованием созданной авторами интеллектуальной системы построения ГР машинистов [7].

Для формализации задачи построения ГР машинистов авторами по аналогии с показавшими свою эффективность при построении ГДП и графика оборота формализациями введено описание результатов построения ГР машинистов в формате кортежей (последовательностей компонентов) [5]. Введено понятие «работа» A — это кортеж, включающий в себя следующие компоненты (поля):

- S — состав, на котором проводится работа;
- T — тип работы (основной, подменный или маневровый машинист, простой);
- L — длительность выполнения работы;

• t_b — момент времени начала выполнения работ с указанием суток;

• W — машинист, выполняющий работу;

• C — стоимость выполнения работ, которая зависит от значений перечисленных выше полей рассматриваемого corteja.

Компоненты S , T , L , t_b являются константами в рамках решения задачи построения ГР машинистов, значения которых определены результатами решения задачи построения ГДП и графика оборота, разбиением их на РС и РИ. Значения компонентов W и C определяются в результате решения задачи построения ГР машинистов. Значение компонента C является функцией остальных полей corteja.

Совокупность всех работ всех типов A описывает ГР машинистов.

При использовании введенной формализации критерий качества R_T ГР машинистов, позволяющий минимизировать финансовые затраты на оплату труда машинистов при выполнении заданных ГДП и графика оборота, сформулируем следующим образом:

$$R_T = \sum_{a=1}^{N_A} (A_a : C \cdot A_a : L) \rightarrow \min, \quad (1)$$

где N_A — количество работ всех типов для всех составов, которые надо выполнить для реализации заданных ГДП и графика оборота; a — индекс работы из рассматриваемого множества, параметр суммирования; A_a — работа с индексом a .

Ограничениями при решении этой задачи являются:

• требования выполнения всех работ всех N_T типов на всех N_M составах имеющимся множеством машинистов:

$$\forall A, 0 < A : W \leq I_W,$$

где I_W — число задействованных машинистов;

• отсутствие одновременного назначения на выполнение одной и той же работы более одного машиниста, что недопустимо на уровне введенной формализации;

• отсутствие назначения одному машинисту более одной работы в один и тот же момент времени:

$$\forall 0 < a, b \leq N_A, A_a : W \neq A_b : W,$$

где b — индекс работы из рассматриваемого множества; A_b — работа с индексом b ;

• требования Трудового кодекса РФ, Положения об особенностях режима рабочего времени и времени отдыха работников конкретного транспортного предприятия, ГДП и графика оборота [7, 22]. В указанных статьях приведены математические выражения, формализующие следующие учитываемые ограничения:

— работа в течение двух смен подряд запрещается;

— рабочий день может быть разделен на части, чтобы общая продолжительность рабочего времени

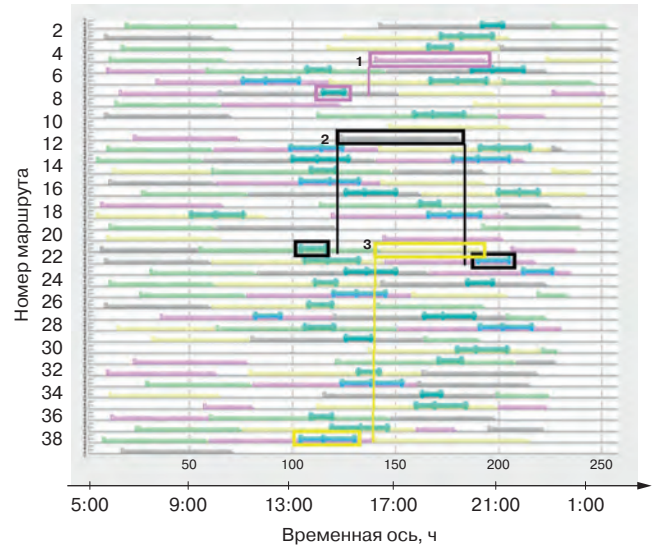


Рис. 2. Примеры объединения работ различных типов в одном ГР машинистов:

зеленым цветом обозначены интервалы работы основного машиниста № 1; черным — № 2; желтым — № 3; розовым — № 4. Голубым цветом указаны возможности для осуществления подмен

Fig. 2. Examples of different work types combined in a single driver schedule:

green colour indicates work intervals of Main Driver 1; black — No. 2; yellow — No. 3; pink — No. 4. Light blue shows potential substitutions

не превышала установленной продолжительности ежедневной работы;

— ограничение на максимальную продолжительность рабочего времени в течение недели или месяца;

— в течение рабочего дня (смены), через 3–4,5 ч после начала работы, не в первые 30 мин работы, работнику должен быть предоставлен перерыв для отдыха и питания продолжительностью не более 2 ч и не менее 30 мин;

— продолжительность еженедельного непрерывного отдыха не может быть менее 42 ч;

— в нерабочие праздничные дни допускается производство работ, приостановка которых невозможна по производственно-техническим условиям работ, вызываемых необходимостью обслуживания населения;

— ограничение на максимальное количество рабочих часов в день при работе в течение одной смены или при работе в течение двух смен, а также на продолжительность выполнения конкретных работ (например, работы в качестве основного, подменного или маневрового машиниста);

— нельзя устанавливать более двух смен подряд, охватывающих ночной промежуток времени (для метрополитена и МЦК это различные временные периоды, определяемые особенностями организации перевозочного процесса) по местному времени;

— продолжительность отдыха в течение суток должна превышать длительность рабочего дня накануне

не менее чем в два раза и не может быть менее заданной величины (например, для метрополитена это 12 ч);

- число выходных дней должно быть не менее числа воскресных дней в отчетном периоде;
- машинисты могут консолидировать отдых и использовать его одновременно, но только за две недели;
- при работе ночью в две смены перерыв между ними должен быть более заданной величины.

Логика ограничений при переходе от одной транспортной системы к другой не меняется. Меняются числовые параметры, отражающие особенности организации режима рабочего времени и времени отдыха работников конкретного транспортного предприятия, что учитывается путем изменения соответствующих настроек интеллектуальной системы построения ГР машинистов. Необходимость учета тех или иных ограничений тоже отражается в изменении соответствующих настроек интеллектуальной системы построения ГР машинистов [7]. Явочная численность локомотивных бригад с учетом их возможных отвлечений (больничные, обучение и т. д.) учитывается путем введения соответствующих ограничений на интервалы времени, когда работники могут быть задействованы в реализации заданного графика оборота. Отвлечения, привлечение резервных сотрудников на случай нестандартных ситуаций или отказов технических средств может рассматриваться как еще один тип работ, который также должен учитываться. В рамках данной работы это не освещается, так как рассматривается задача определения занятости сотрудников в реализации заданного ГДП и графика оборота, но разработанное математическое обеспечение позволяет реализовать данное расширение.

Для иллюстрации способа формализации учитываемых ограничений рассмотрим формализацию ограничения на максимальную продолжительность рабочего времени в течение недели или месяца:

$$\sum_{d=1}^D \sum_{a=1}^{N_d} (A_a : L((A_a : W = m) \text{ и } (A_a : t_b \in d))) \leq T_{\max}, \quad (2)$$

$$m = 1, \dots, I_W,$$

где $T_{\max}$ — максимальная продолжительность рабочего времени в течение заданного периода времени (недели или месяца); D — количество дней в периоде времени (неделе или месяце), для которого задана максимальная продолжительность рабочего времени $T_{\max}$; $d = 1, \dots, D$ — номер дня в периоде времени (неделе или месяце), для которого задана максимальная продолжительность рабочего времени $T_{\max}$.

Решение этой задачи возможно с использованием, например, генетического алгоритма [23] при условии, что предварительно сформирована база данных вариантов ГР машинистов отдельно для каждого типа работ. В этом случае один из вариантов построения хромосом предполагает следующее:

- множество аллелей (значений, которые может принимать ген) одного из генов имеет мощность, равную числу вариантов ГР основных машинистов; этот ген соответствует всему варианту целиком, значение аллеля идентифицирует этот вариант;
- каждому из обеденных перерывов или какой-то их группе, которые отстоят друг от друга менее чем на заданный промежуток времени, соответствует отдельный ген;
- аналогично для группы маневровых работ.

Формирование подмножества работ, у которых компонент T имеет значение, соответствующее работе в качестве основного машиниста, происходит при автоматизированном построении ГР основных машинистов. В результате формируется база данных вариантов ГР этого типа, рассматриваемых генетическим алгоритмом в ходе решения задачи построения объединенного ГР машинистов с использованием критерия (1). При автоматизированном построении ГР основных машинистов в качестве критерия оптимальности используется критерий равномерности назначения (загрузки) основных машинистов на сформированное расписание РИ $R_M(x_1, \dots, x_N)$, который формализуется следующим образом:

$$R_M(x_1, \dots, x_N) = \sum_{i=1}^{I_{MW}} \left[\sum_{k=1}^N (f_{Mk} | x_k = i) \right]^2, \quad (3)$$

где $i = 1, \dots, I_{MW}$ — возможные значения номера основного машиниста из результирующего множества машинистов, задействованных в качестве основных (M_{MW}); I_{MW} — число задействованных основных машинистов, мощность множества M_{MW} (подмножество множества всех задействованных машинистов с мощностью I_W); N — число РИ, на которые разбит весь график оборота; f_{Mk} — вес ребра, соответствующего назначению выбранного основного машиниста на k -й РИ, равный длительности РИ; x_k — номер основного машиниста, задействованного для реализации k -го РИ.

Решение задачи назначения основных машинистов на сформированное расписание РИ можно выполнить, используя метод динамического программирования, где на k -м этапе решения важно не только то, как были реализованы предыдущие ($k - 1$) РИ, но и сколько машинистов для этого было задействовано и насколько равномерно. При использовании равного числа машинистов для всех решений выбирается тот вариант, который обеспечивает минимум текущего значения критерия (3):

$$R_{Mk_j}(x_1^j, \dots, x_k^j) = \min_{j=1, \dots, J_{k-1}} \left[\Delta R_{Mk_j}(x_k^j) + R_{M(k-1)_j}(x_1^j, \dots, x_{k-1}^j) \right], k = 2, \dots, N, \quad (4)$$

где $R_{Mk_j}(x_1^j, \dots, x_k^j)$ — значение критерия оптимальности после выполнения назначений на текущий k -й РИ j -м способом; $\Delta R_{Mk_j}(x_k^j)$ — приращение значения

критерия оптимальности после выполнения назначений на текущий k -й РИ j -м способом при заданном способе назначений на предыдущие $(k - 1)$ РИ; $x_1^j, \dots, x_k^j$ — номера машинистов, задействованных для реализации k РИ j -м способом, если ввести соответствие между формулами (1) и (4) и считать, что в формуле (1) значение a , равное единице, соответствует работам основных машинистов; J_k — число вариантов решения задачи на k -м этапе.

Определим значение $\Delta R_{Mk}(x_k)$:

$$\begin{aligned} \Delta R_{Mk}(x_k) &= R_{Mk}(x_1, \dots, x_k) - R_{M(k-1)}(x_1, \dots, x_{k-1}) = \\ &= R_{Mk}(x_1, \dots, x_k) - R_{M(k-1)}(x_1, \dots, x_{k-1}, x_k = 0) = \\ &= \sum_{i=1}^{I_{MW}} \left[\sum_{n=1}^k (f_{Mn} | x_n = i) \right]^2 - \sum_{i=1}^{I_{MW}} \left[\sum_{n=1}^{k-1} (f_{Mn} | x_n = i) \right]^2 = \\ &= \sum_{i=1}^{I_{MW}} \left\{ \left[\sum_{n=1}^k (f_{Mn} | x_n = i) \right]^2 - \left[\sum_{n=1}^{k-1} (f_{Mn} | x_n = i) \right]^2 \right\} = \\ &= \sum_{i=1}^{I_{MW}} \left\{ \left[\sum_{n=1}^k (f_{Mn} | x_n = i) - \sum_{n=1}^{k-1} (f_{Mn} | x_n = i) \right] \left[\sum_{n=1}^k (f_{Mn} | x_n = i) + \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \sum_{n=1}^{k-1} (f_{Mn} | x_n = i) \right] \right\} = \sum_{i=1}^{I_{MW}} \left\{ (f_{Mk} | x_k = i) \times \right. \\ &\quad \left. \times \left[\sum_{n=1}^{k-1} 2(f_{Mn} | x_n = i) + (f_{Mk} | x_k = i) \right] \right\}, \end{aligned} \quad (5)$$

где f_{Mn} — вес ребра, соответствующего назначению выбранного основного машиниста на n -й РИ, равный длительности РИ; x_n — номер основного машиниста, задействованного для реализации n -го РИ.

Полученное выражение позволяет проводить рекуррентное вычисление критерия оптимальности $R_M(x_1, \dots, x_N)$ на каждом последующем этапе решения задачи с использованием ранее вычисленных значений суммарных продолжительностей всех РС каждого из машинистов.

На первом этапе решения задачи $R_{M1}(x_1 = 1)$ существует только один вариант назначения машинистов. С учетом проверки условий возможности добавления нового РИ уже задействованным машинистам на нескольких следующих этапах, число которых не превышает результирующее количество задействованных для реализации заданного графика оборота машинистов, может отсутствовать ветвление.

Каждый j -й способ реализации назначения машинистов на k -м этапе отличается значением переменной x_k и числом ее возможных значений (текущей мощностью множества M_{MW}). Для уменьшения числа перебираемых вариантов могут использоваться и дополнительные условия. Например, рассмотрение из нескольких способов, при которых каждый из машинистов к k -му этапу имеет одно и то же количество РИ, выбор из рассмотренных только того,

который обеспечивает минимум текущего значения критерия оптимальности.

Выражение (4) используется для выполнения обратного хода метода динамического программирования для восстановления пути оптимального решения задачи.

Результаты исследования. Рассмотрим результаты, полученные с использованием разработанного алгоритма подхода к составлению ГР основных машинистов, при котором применяются выражения (3), (4), (5). Использование критериев равномерности чередования рабочего времени и времени отдыха при построении ГР машинистов (рис. 3) позволяет получить более равномерное распределение рабочих смен по сравнению с реализуемыми на практике (рис. 4). Для определения показателей учитывались 7 дней, следующих за текущим. Линией красного цвета изображен уровень среднего значения показателя за весь период наблюдения. Представленные на рис. 3 и 4 значения среднеквадратического отклонения (СКО) и размаха (разности между наибольшим и наименьшим значениями, представленными на графике) подтверждают повышение равномерности.

Подход к решению задачи повышения эффективности использования рабочего времени подменных и маневровых машинистов схож с рассмотренным.

Полученные выражения позволяют уменьшать количество рассматриваемых вариантов при решении оптимизационных задач, повышать скорость поиска решений и объединять в единый график выполнения работ различных типов на основе критерия (1).

Полученные результаты могут быть использованы и при формировании графика работы локомотивных бригад, например, для условий МЦК при дополнении существующей модели ограничениями, связанными с необходимостью обеспечить допустимое комплектование локомотивных бригад [7].

Рассмотрим подробнее пути получения эффекта от использования разработанных на кафедре управления и защиты информации РУТ (МИИТ) элементов интеллектуальных транспортных систем, функционирование которых связано с комплексным автоматизированным построением ГДП, графика оборота и графика работы локомотивных бригад для городского рельсового транспорта, к которому в Москве относятся не только метрополитен, но МЦК и МЦД. Интегрировать полученные результаты в части математического обеспечения в уже использующиеся программные средства планирования работы можно путем создания соответствующих программных модулей, совместимых по форматам данных с эксплуатируемыми.

Коммерческий эффект связан с ростом востребованности транспортных систем в случае сокращения межпоездных интервалов, повышения безопасности движения и комфорта, что напрямую связано с соблюдением равномерности движения и использования ресурсов.

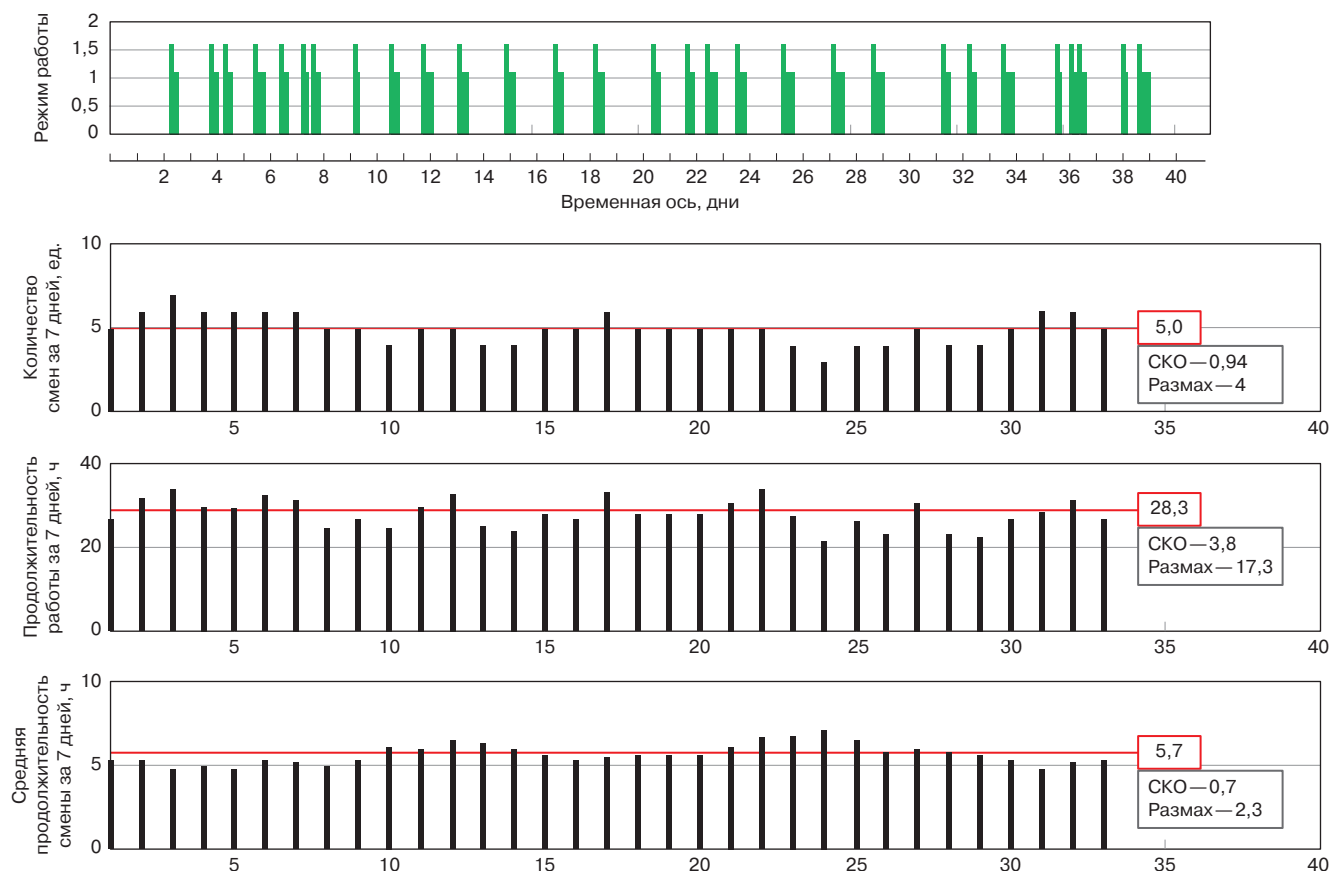


Рис. 3. Примеры графика работы машиниста, построенного с учетом критерия равномерности

Fig. 3. Examples of a driver schedule built according to the uniformity criterion

Ресурсный эффект от внедрения средств автоматизации планирования определяется сокращением связанных с порожним пробегом составов эксплуатационных расходов, вызванных дополнительным расходом электроэнергии на тягу и потребностью в дополнительных локомотивных бригадах. Согласно выполненной оценке, использование разработанной интеллектуальной системы построения графика работы локомотивных бригад поможет сократить потребность в трудовых ресурсах при формировании ГР машинистов на 20–25 %. Одновременно повысится производительность труда сотрудников, решающих задачи планирования, так как внедрение интеллектуальной системы позволит сократить время, затрачиваемое на построение графика работы локомотивных бригад, с дней до часов.

Предотвращающий ущерб эффект определяется сокращением эксплуатационных расходов на устранение последствий техногенных катастроф, вероятность наступления которых повышается при неустойчивом характере плановых графиков.

Социальный эффект во многом определяется улучшением условий труда, к которым относится соблюдение особенностей режима рабочего времени

и времени отдыха локомотивных бригад, в первую очередь связанных с организацией работы в ночное время, которая, как показано в [5, 24], оказывает существенное влияние на безаварийность движения, а следовательно, способствует получению предотвращающего ущерба эффекта.

Научный эффект связан с тем, что на основе выполненного обобщающего анализа накопленного опыта и выявления общих черт процессов планирования, реализуемых применительно к различным видам ресурсов, возможно выделение и построение шаблонов проектирования программного обеспечения соответствующих интеллектуальных систем. Одновременно в ходе сбора данных и выполнения экспериментов происходит наполнение баз данных и баз знаний интеллектуальных транспортных систем [4–9, 22–25].

Определенные в работе критерии качества управления нацелены на получение перечисленных эффектов от внедрения соответствующих интеллектуальных систем. Критерий минимизации расхода ресурсов при заданном времени хода способствует обеспечению пунктуальности перевозок, не допуская неоправданного расхода ресурсов, т. е. в первую очередь позволяет обеспечить коммерческий и предотвращающий ущерб

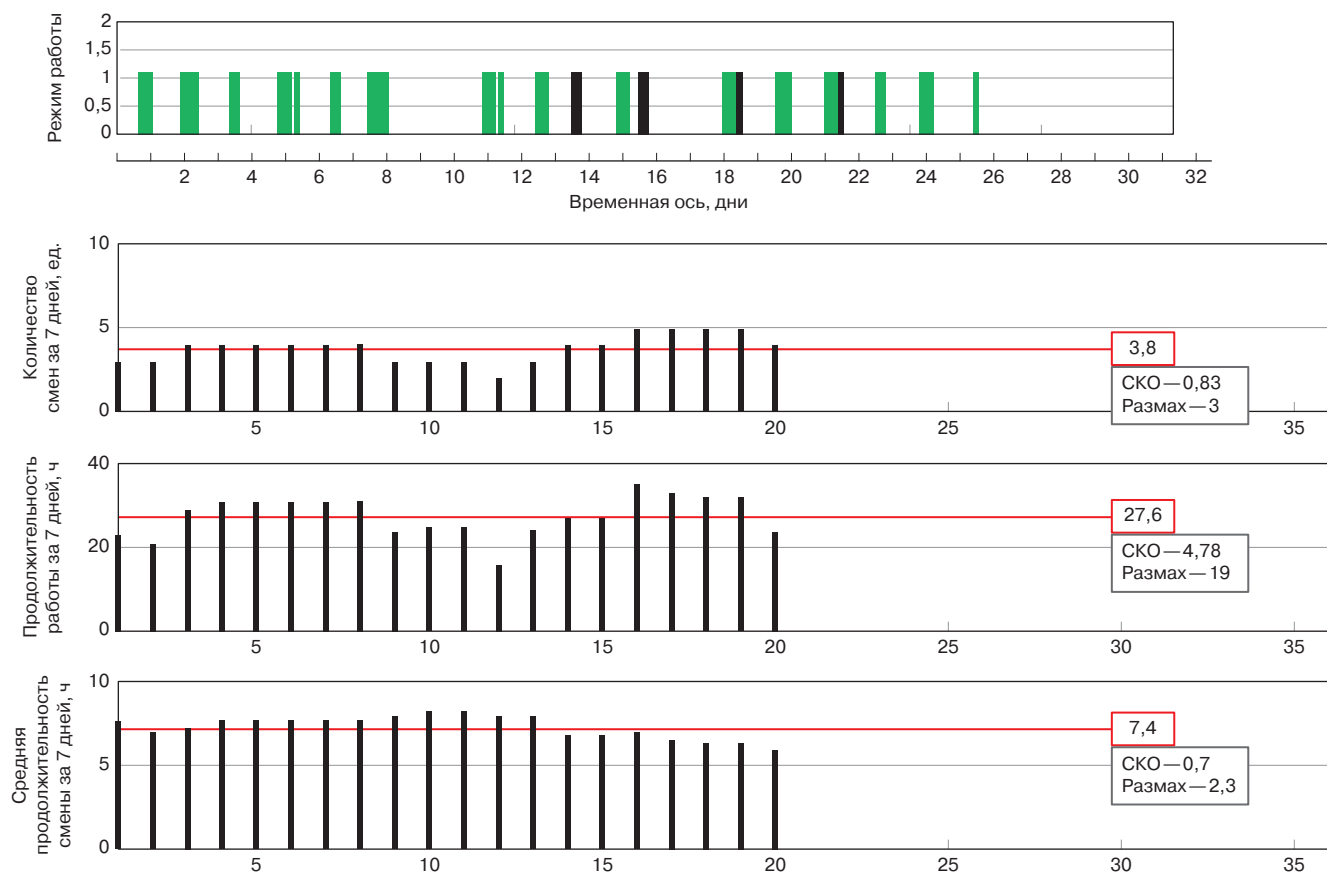


Рис. 4. Фрагмент реального графика работы машиниста

Fig. 4. Fragment of a real driver schedule

эффекты [26]. Равномерность загрузки, как отмечалось выше, способствует получению всех видов эффекта. Минимизация времени работы или размера использованных ресурсов позволяет достичь ресурсного эффекта.

Обсуждение и заключение. Проанализирован опыт, накопленный авторами в ходе создания интеллектуальных систем планирования на городском рельсовом транспорте. Научная новизна полученных результатов заключается в следующем:

- Выявлены общие и отличительные черты производственных и человеческих ресурсов разных классов с точки зрения задач планирования, что позволило интегрировать результаты практического использования известных авторам интеллектуальных систем планирования.

- Выявлены единство критериев качества управления для ресурсов разных типов и подходов к формализации и решению соответствующих задач управления, а также особенности этих требований в зависимости от класса управляемого объекта, что позволит организовать процессы планирования функционирования различных объектов в едином пространстве методов решения задач с учетом наличия взаимосвязи между ними.

- Представлены результаты, подтверждающие применимость предложенных и реализованных авторами подходов к решению поставленных задач.

Практическая ценность полученных результатов заключается в том, что в совокупности с ранее полученными они могут стать основой единой методологии создания и развития мощного множества интеллектуальных транспортных систем, позволят создать инструменты, облегчающие разработку подобных систем, задающие их типовую структуру (фреймворк), и множество шаблонов проектирования программного обеспечения таких систем. Подобные проекты имеют фундаментальный характер и являются примером проектирования систем от частного к общему.

Благодарности: авторы выражают благодарность рецензентам за полезные замечания, способствовавшие улучшению статьи.

Acknowledgments: the authors express their gratitude to the reviewers for their constructive comments, improving the quality of the article.

Финансирование: авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

Funding: the authors received no financial support for the research, authorship, and publication of this article.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах.

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest and no financial interests in any material discussed in this article.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Троицкая Н. А., Титова С. С. Интеграция Московского центрального кольца и центральных диаметров в транспортную систему столицы // Транспортное строительство. 2023. № 1. С. 2–5. EDN: <https://elibrary.ru/maqpwr>.

Troitskaya N. A., Titova S. S. Integration of the Moscow Central Ring and central diameters into the capitals transport system. *Transport construction*. 2023;(1):2–5. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/maqpwr>.

2. Николаев К. Ю. Выбор полигона и параметров применения технологии «трамвай — поезд» в России // Транспорт Российской Федерации. 2020. № 5 (90). С. 40–44. EDN: <https://elibrary.ru/zpawcl>.

Nikolayev K. Yu. Selection of operating domain and parameters for application of the tram — train technology in Russia. *Transport of the Russian Federation*. 2020;(5):40–44. (In Russ.). (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/zpawcl>.

3. Вакуленко С. П. Разработка вариантов модернизации Московской монорельсовой транспортной системы / С. П. Вакуленко [и др.] // Метро и туннели. 2020. № 4. С. 28–35.

Vakulenko S. P., Romenskiy D. Yu., Mnatsakanov V. A., Dorokhov A. V., Vlasov D. N. Development of upgrade options for the Moscow Monorail. *Metro and tunnels*. 2020;(4):28–35. (In Russ.).

4. Опыт и перспективы автоматизации управления перевозочным процессом скоростного транспорта городских агломераций / В. Г. Сидоренко [и др.] // Автоматика на транспорте. 2023. Т. 9, № 1. С. 33–48. <https://doi.org/10.20295/2412-9186-2023-9-01-33-48>.

Sidorenko V. G., Kopylova E. V., Safronov A. I., Tumanov M. A. Experience and perspectives of transportation process control automation for rapid-transit transport of urban agglomerations. *Transport automation research*. 2023;9(1):33–48. (In Russ.). <https://doi.org/10.20295/2412-9186-2023-9-01-33-48>.

5. Подходы к оценке качества планирования и управления движением пассажирских поездов метрополитена / Т. А. Исаков [и др.] // Автоматика на транспорте. 2020. Т. 6, № 1. С. 38–63. <https://doi.org/10.20295/2412-9186-2020-6-1-38-63>.

Isakov T. A., Safronov A. I., Sidorenko V. G., Chzho M. A. Approaches to quality assessment of subway traffic planning and management. *Transport automation research*. 2020;6(1):38–63. (In Russ.). <https://doi.org/10.20295/2412-9186-2020-6-1-38-63>.

6. Сидоренко В. Г., Сафронов А. И. Применение генетических алгоритмов при решении задач планирования перевозочного процесса городской рельсовой транспортной системы // Автоматика на транспорте. 2023. Т. 9, № 1. С. 49–62. <https://doi.org/10.20295/2412-9186-2023-9-01-49-62>.

Sidorenko V. G., Safronov A. I. Application of genetic algorithms at solution of tasks for transportation process planning of city rail transport system. *Transport automation research*. 2023;9(1):49–62. (In Russ.). <https://doi.org/10.20295/2412-9186-2023-9-01-49-62>.

7. Маркевич А. В., Сидоренко В. Г. Интеллектуальная система построения графика работы машинистов метрополитена // Надежность. 2023. № 23(3). С. 63–72. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2023-23-3-63-72>.

Markevich A. V., Sidorenko V. G. An intelligent system for constructing metro train driver working schedules. *Dependability*. 2023;(23):63–72. (In Russ.). <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2023-23-3-63-72>.

8. Сидоренко В. Г., Сафронов А. И. К вопросу об оценке быстротейшего метода выравнивания временных интервалов // Информатизация образования и науки. 2014. № 1 (21). С. 120–130.

Sidorenko V. G., Safronov A. I. Concerning the estimation of the fastness of the time interval equalisation method. *Informatizatsiya obrazovaniya i nauki*. 2014;(1):120–130. (In Russ.).

9. Сидоренко В. Г., Чжо М. А. Исследование возможности применения генетических алгоритмов к решению задач планирования работы электроподвижного состава метрополитена // Электроника и электрооборудование транспорта. 2017. № 6. С. 37–40.

Sidorenko V. G., Chzho M. A. Application of genetic algorithms to the scheduling of metro electric rolling stock. *Electronics and electrical equipment of transport*. 2017;(6):37–40. (In Russ.).

10. Бархатный В. Д., Крюков Н. Д. Выбор участков и способов организации работы локомотивных бригад. М.: Транспорт, 1974. 36 с.

Barkhatnyy V. D., Kryukov N. D. *Selection of sections and methods of organisation of locomotive crew work*. Moscow: Transport Publ.; 1974. 36 p. (In Russ.).

11. Высоцкий Ю. Л. Сокращение времени нахождения локомотивных бригад на станциях пунктов их оборота // Труды НИИЖТа. 1979. Вып. 201/14. С. 55–61.

Vysotskiy Yu. L. Reduction of locomotive crew time at their turnaround stations. *Trudy Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnoy transporta*. 1979;201/14:55–61. (In Russ.).

12. Мищенко Н. Г. Оптимизация длин участков обращения локомотивов и работы локомотивных бригад // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения (Вестник РГУПС). 2002. № 2. С. 62–77.

Mishchenko N. G. Optimisation of locomotive turnaround section lengths and locomotive crew work. *Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya (Vestnik RGUPS)*. 2002;(2):62–77. (In Russ.).

13. Пазойский Ю. О. Автоматизация составления графика работы локомотивных бригад в пригородном сообщении // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 1996. № 4. С. 33–39.

Pazoyskiy Yu. O. Automation of locomotive crew scheduling in suburban traffic. *Russian Railway Science Journal*. 1996;(4):33–39. (In Russ.).

14. Пوماзунов С. И., Муха Ю. А., Нестеренко С. И. Планирование и организация работы локомотивных бригад // Железнодорожный транспорт. 1977. № 6. С. 40–44.

Pomazunov S. I., Mukha Yu. A., Nesterenko S. I. Scheduling and organisation of locomotive crew work. *Zheleznodorozhnyy transport*. 1977;(6):40–44. (In Russ.).

15. Некрасевич В. И., Сальченко В. Л., Ковалев В. Н. Организация работы локомотивных бригад по именным графикам // Железнодорожный транспорт. 2001. № 2. С. 68.

Nekrashevich V. I., Salchenko V. L., Kovalev V. N. Organisation of work of locomotive crews according to nominal schedules. *Zheleznodorozhnyy transport*. 2001;(2):68. (In Russ.).

16. Тишкин Е. М. Организация работы локомотивных бригад на основе графика движения поездов. М.: Транспорт, 1968. 27 с.

Tishkin E. M. *Organisation of locomotive crew work on using train schedules*. Moscow: Transport; 1968. 27 p. (In Russ.).

17. Pang Shinsiong, Chen Mu-Chen. Optimize railway crew scheduling by using modified bacterial foraging algorithm. *Computers & Industrial Engineering*. 2023;180:109218. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109218>.

18. Janacek J., Kohani M., Koniorczyk M., Marton P. Optimization of periodic crew schedules with application of column generation method. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2017; 83:165–178. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2017.07.008>.

19. Neufeld J., Scheffler M., Tamke F., Hoffmann K., Buscher U. An Efficient Column Generation Approach for Practical Railway Crew Scheduling with Attendance Rates. *European Journal of Operational Research*. 2020;293:113–1130. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2020.12.058>.

20. Rühlmann C., Thonemann U. Railway crew scheduling with semi-flexible timetables. *OR Spectrum*. 2020;42:835-862. <https://doi.org/10.1007/s00291-020-00592-y>.

21. Heil J. A Solution Approach for Railway Crew Scheduling with Attendance Rates for Multiple Networks. In: *Operations Research Proceedings*. [S. l.]; 2018. p. 547–553 https://doi.org/10.1007/978-3-030-18500-8_68.

22. Markevich A. V., Sidorenko V. G. Automation of Scheduling for Drivers of the Subway Rolling Stock. In: *IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS), Batumi, Georgia. 2021*. [S. l.]; 2021. p. 1–10. <https://doi.org/EWDTS52692.2021.9580990>.

23. Baranov L. A., Sidorenko V. G., Safronov A. I., Aung K. M. Application of Genetic Algorithms for the Planning of Urban Rail Transportation System. In: *Traffic Flow Theory and Research in Civil and Transportation Engineering (TSTP 2021). Lecture Notes in Intelligent Transportation and Infrastructure*. Cham: Springer; 2022. p. 21–39. https://doi.org/10.1007/978-3-030-93370-8_2.

24. Кулагин М. А., Маркевич А. В., Сидоренко В. Г. Единство подходов к интеллектуализации цифровой трансформации управления производственным и человеческим потенциалом на железнодорожном транспорте // Наука 1520 ВНИИЖТ: Загляни за горизонт: сб. материалов II Междунар. конф., Москва, 24–25 августа 2023 г. М., 2023. С. 256–260.

Kulagin M. A., Markevich A. V., Sidorenko V. G. Unity of approaches to the intellectualisation of digital transformation of production and human potential management on railway transport. In: *Science 1520 VNIIZhT: Look beyond the horizon: Proceedings of the II International Conf., Moscow, 24–25 August 2023*. Moscow; 2023. p. 256–260. (In Russ.).

25. Копылова Е. В., Туманов М. А., Сидоренко В. Г. Проблемы и перспективы создания интеллектуальных систем управления технологическими процессами на линейных объектах пассажирского комплекса железнодорожного транспорта // Наука и техника транспорта. 2023. № 4. С. 95–100. EDN: <https://elibrary.ru/ynespv>.

Kopylova E. V., Tumanov M. A., Sidorenko V. G. Problems and prospects of creating smart control systems of technological processes at linear objects of passenger railway transport complex. *Science and Technology in Transport*. 2023;(4):95-100. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/ynespv>.

26. Baranov L. A., Sidorenko V. G., Balakina E. P., Safronov A. I. Minimization of Energy Consumption for Urban Rapid-Transit Traction. *Russian Electrical Engineering*. 2021;92:492-498. <https://doi.org/10.3103/S1068371221090030>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Агата Владимировна МАРКЕВИЧ,

канд. техн. наук, бизнес-аналитик практики САП, Терралинк Девелопмент (115088, г. Москва, 2-й Южнопортовый проезд, д. 33, стр. 1), vlajuk.a@mail.ru, Author ID: 3308-0237

Валентина Геннадьевна СИДОРЕНКО,

д-р техн. наук, профессор, кафедра «Управление и защита информации», Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ), 127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9), Author ID: 1071-6147, <https://orcid.org/0000-0003-4941-9008>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Agata V. MARKEVICH,

Cand. Sci. (Eng.), Business Analyst of SAP Practice, Terralink Development (115088, Moscow, 33/1, 2 Yuzhnoportovyy pas.), vlajuk.a@mail.ru, Author ID: 3308-0237

Valentina G. SIDORENKO,

Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Control and Information Security, Russian University of Transport (127994, Moscow, 9, bldg. 9, Obratsova St.), Author ID: 1071-6147, <https://orcid.org/0000-0003-4941-9008>

ВКЛАД АВТОРОВ

Агата Владимировна МАРКЕВИЧ. Реализация разработанных алгоритмов в интеллектуальной системе построения графика работы машинистов метрополитена и их апробация для реальных условий городских рельсовых транспортных систем (50%).

Валентина Геннадьевна СИДОРЕНКО. Анализ накопленного опыта, разработка математического обеспечения интеллектуальной системы построения графика работы машинистов метрополитена (50%).

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Agata V. MARKEVICH. Implementation and approbation of the developed algorithms in the smart metro driver scheduling system in real urban railways (50%).

Valentina G. SIDORENKO. Experience analysis, development of mathematical support for the smart metro driver scheduling system (50%).

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The authors have read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию 01.03.2024, рецензия от первого рецензента получена 26.03.2024, рецензия от второго рецензента получена 29.05.2024, рецензия от третьего рецензента получена 31.05.2024, принята к публикации 05.06.2024.

The article was submitted 01.03.2024, first review received 26.03.2024, second review received 29.05.2024, third review received 31.05.2024, accepted for publication 05.06.2024.

ВНИМАНИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ!

ЭЛЕКТРОННЫЕ ВЕРСИИ СТАТЕЙ ЖУРНАЛА В ОТКРЫТОМ ДОСТУПЕ

На сайте www.elibrary.ru открыт доступ к электронным версиям статей, опубликованных в научно-техническом журнале «Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта».

Для работы с фондами библиотеки пользователю необходимо самостоятельно зарегистрироваться, заполнив регистрационную форму на главной странице [eLibrary.ru](http://elibrary.ru). Доступ возможен по Вашему логину и паролю с любого компьютера, имеющего выход в интернет.

Материалы журнала, размещенные на сайте Научной электронной библиотеки для свободного использования, допускается использовать, копировать, цитировать исключительно в некоммерческих целях с соблюдением соответствующих положений действующего авторского законодательства (Гражданский кодекс РФ от 18.12.2006 № 230-ФЗ, Часть IV; Глава 70 «Авторское право») с обязательным указанием имени автора/ов произведения и источника заимствования.

На сайте журнала www.journal-vniizht.ru контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ
НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

Оригинальная статья

УДК 629.056.8

EDN: <https://elibrary.ru/knirgq>**Высокоточное позиционирование робототехнических комплексов на программных траекториях с использованием измерений спутниковых навигационных систем****С. В. Соколов^{1,2}, А. Л. Охотников²✉, Д. В. Маршаков¹, И. В. Решетникова¹**¹Московский технический университет связи и информатики (МТУСИ),
Москва, Российская Федерация²Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации,
автоматизации и связи на железнодорожном транспорте (НИИАС),
Москва, Российская Федерация**АННОТАЦИЯ**

Введение. Основной проблемой при обработке спутниковых измерений остается борьба с их помехами, особенно интенсивными в условиях пересеченной местности, городской инфраструктуры, при усилении атмосферных возмущений, создании искусственных помех. Практика применения спутниковых навигационных систем последних лет показала неэффективность использования в подобных условиях традиционных методов обработки спутниковых сообщений, построенных на основе метода наименьших квадратов или его модификаций. Данные алгоритмы не в состоянии обеспечить требуемую точность пространственной ориентации для подвижных робототехнических комплексов, функционирующих в условиях интенсивных возмущений различной физической природы. Это приводит к необходимости применения алгоритмов обработки стохастической информации, более эффективных, чем метод наименьших квадратов, в частности построенных на основе теории нелинейной стохастической фильтрации. Основной трудностью в этом случае является синтез уравнений движения робототехнических комплексов, инвариантных к виду их движения и случайным условиям среды функционирования. В то же время, как показывает практика, подавляющее большинство комплексов движется по программным траекториям, обеспечивающим возможность аналитического описания параметров их движения, что создает предпосылки к решению задачи синтеза данных уравнений.

Материалы и методы. Предложен навигационный алгоритм для робототехнических комплексов, движущихся по заданной траектории в условиях случайных возмущающих факторов. В основу алгоритма положено комплексирование методов нелинейной стохастической фильтрации для оценки состояния динамических систем, функционирующих в условиях помех, с нетрадиционными алгоритмами обработки спутниковых измерений и данных электронных карт.

Результаты. Для робототехнического комплекса, осуществляющего экологический мониторинг, моделировалось движение в плоскости местного меридиана из начальной точки с долготой 30° и широтой 45°. Выполнен анализ точности разработанного алгоритма путем оценки траектории робототехнического комплекса при использовании двух классов спутниковых навигационных систем — средней и низкой точности.

Обсуждения и заключение. Результаты численного эксперимента в совокупности с отмеченными выше преимущественными особенностями предложенного метода позволяют сделать вывод о возможности его эффективного практического применения для позиционирования подвижных робототехнических комплексов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: робототехнические комплексы, спутниковые измерения, электронные карты, стохастическая фильтрация, расширенный фильтр Калмана

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Соколов С. В., Охотников А. Л., Маршаков Д. В., Решетникова И. В. Высокоточное позиционирование робототехнических комплексов на программных траекториях с использованием измерений спутниковых навигационных систем // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2024. Т. 83, № 3. С. 270–277.

✉ a.ohotnikov@vnias.ru (А. Л. Охотников)© Соколов С. В., Охотников А. Л., Маршаков Д. В.,
Решетникова И. В., 2024



AUTOMATION AND CONTROL OF TECHNOLOGICAL PROCESSES IN RAILWAY TRANSPORT

Original article

UDK 629.056.8

EDN: <https://elibrary.ru/knirgq>



High-precision positioning of robotic systems on programme trajectories using satellite navigation measurements

Sergey V. Sokolov^{1,2}, Andrey L. Okhotnikov²✉, Daniil V. Marshakov¹, Irina V. Reshetnikova¹

¹Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russian Federation

²Research and Design Institute of Informatisation, Automation and Communication on Railway Transport, Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The main issue in processing satellite measurements remains the struggle with their interference, especially intensive in rugged terrain, cities, atmospheric disturbances and artificial interference. Use of satellite navigation in recent years shows that such conditions undermine traditional satellite signal processing methods based on the least squares method or its modifications. These algorithms are unable to provide the required accuracy of spatial orientation for mobile robotic systems operating under intensive disturbances of various physical nature. This requires new algorithms for processing stochastic information more efficient than the least squares method, in particular, based on the theory of nonlinear stochastic filtration. The main challenge in this case is the synthesis of equations of motion of robotic complexes invariant to its type and random conditions of the environment of its functioning. At the same time, as practice shows, the vast majority of complexes move along programme trajectories that allow for analytical description of their motion parameters, which creates prerequisites for solving the problem of synthesis of these equations.

Materials and methods. This paper proposes a navigation algorithm for robotic systems moving along a given trajectory under random perturbing factors. The algorithm is based on the combination of nonlinear stochastic filtering methods for estimating the state of dynamic systems operating under disturbances with non-traditional algorithms for processing satellite measurements and electronic map data.

Results. For an environmental monitoring robot system, the authors modelled the motion in the plane of the local meridian from an initial point with longitude 30° and latitude 45°. The paper analyses the accuracy of the developed algorithm by estimating the trajectory of the robotic system using two classes of satellite navigation systems: medium and low precision.

Discussion and conclusion. The results of the numerical experiment together with the above-mentioned advantages of the proposed method allow us to consider its effective practical application for positioning of mobile robotic systems.

KEYWORDS: robotic systems, satellite measurements, electronic maps, stochastic filtering, extended Kalman filter

FOR CITATION: Sokolov S. V., Okhotnikov A. L., Marshakov D. V., Reshetnikova I. V. High-precision positioning of robotic systems on programme trajectories using satellite navigation measurements. *Russian Railway Science Journal*. 2024;83(3):270-277. (In Russ.).

Введение. Одним из наиболее эффективных путей решения задачи высокоточной пространственной ориентации подвижных робототехнических комплексов (РТК), например беспилотных поездов, в настоящее время является обработка навигационных спутниковых измерений [1–15]. Основной проблемой здесь была и остается борьба с помехами измерений, особенно интенсивными в условиях городской инфраструктуры, пересеченной местности, при активизации атмосферных (и особенно искусственных) помех, не говоря уже о неизбежных инструментальных погрешностях передатчика спутника и навигационного приемника [5–20]. Как показала практика использования спутниковых навигационных систем в течение последних двух лет, отсутствие универсальных методов решения данной проблемы не позволяет обеспечить требуемую эффективность функционирования подвижных РТК в вышеперечисленных условиях, что, в свою очередь, требует разработки новых подходов к решению задачи высокоточной пространственной ориентации РТК.

Практически все современные методы обработки спутниковых измерений используют или метод наименьших квадратов (МНК), или его различные модификации [5–9, 13–15, 19]. Это позволяет обеспечить заданную точность решения задачи пространственной ориентации для неподвижных объектов, но оказывается неэффективным для подвижных РТК, функционирующих в условиях интенсивных возмущений различной физической природы.

С другой стороны, для оценки состояния динамических систем, эксплуатируемых в стохастических средах, существует обширный класс методов обработки измерений, значительно более эффективных, чем МНК. К таким методам, в частности, относятся методы нелинейной стохастической фильтрации, позволяющие учитывать как динамику РТК, так и стохастические характеристики среды функционирования [8, 10–12, 15–18]. Основной трудностью их применения при использовании спутниковых измерений является синтез уравнений движения РТК, инвариантных к виду его движения и условиям среды эксплуатации. Решение подобной задачи рассмотрено далее в первой части статьи.

Помимо реализации стохастических методов обработки спутниковых измерений, весьма эффективным подходом к решению задачи высокоточной пространственной ориентации РТК является использование аналитического описания известной траектории его движения. Постоянно нарастающее применение электронных карт позволяет реализовать априорную высокоточную аппроксимацию заданного (программного) маршрута движения РТК набором траекторных интервалов, на которых существуют аналитические зависимости его навигационных параметров, что, во-первых, резко сокращает вычислительные затраты при их оценке, а во-вторых, обеспечивает высокую

точность привязки к траектории даже в условиях интенсивных помех измерения [21, 22]. Таким образом, цель работы состоит в предложении нового подхода к обработке спутниковых измерений, который бы обеспечивал возможность существенного повышения точности пространственной ориентации РТК (до субметрового диапазона) при резком сокращении вычислительных затрат за счет совместного использования аппроксимации заданного маршрута движения РТК набором аналитических траекторных интервалов с отработанными методами стохастической динамики.

Последовательность решения задачи определим следующим образом. На первом этапе сформируем стохастические дифференциальные уравнения параметров пространственной ориентации РТК и их стохастического наблюдателя, используя зашумленные спутниковые измерения. На втором этапе редуцируем полученные уравнения к виду, соответствующему программному движению по траекторному участку, представляющему собой участок ортодромии и полученному при соответствующей аппроксимации заданной траектории РТК набором кратчайших траекторных интервалов. На заключительном этапе на основе дифференциальных уравнений параметров пространственной ориентации РТК и их стохастического наблюдателя на ортодромии построим навигационный алгоритм РТК, обеспечивающий искомую стохастическую оценку параметров его пространственной ориентации.

Синтез дифференциальных уравнений параметров пространственной ориентации РТК. Для возможности синтеза дифференциальных уравнений навигационных параметров РТК используем модели спутниковых измерений (псевдодальности и псевдоскорости) на этапе первичной обработки и в самой общей (стохастической) форме. В стандартном режиме использования спутниковых измерений модель измерений псевдодальности Z_R имеет вид [1–6, 8, 9]:

$$Z_R = \sqrt{(\xi_c - \xi)^2 + (\eta_c - \eta)^2 + (\zeta_c - \zeta)^2} + W_R, \quad (1)$$

где ξ_c, η_c, ζ_c — заданные пространственные координаты спутника в гринвичской системе координат (ГСК); ξ, η, ζ — пространственные координаты РТК в ГСК; W_R — погрешность измерений псевдодальности.

Аналогично модель измерений псевдоскорости Z_V в стандартном режиме может быть описана как

$$Z_V = [(\xi_c - \xi)(V_{\xi_c} - V_{\xi}) + (\eta_c - \eta)(V_{\eta_c} - V_{\eta}) + (\zeta_c - \zeta)(V_{\zeta_c} - V_{\zeta})] \times \\ \times \left(\sqrt{(\xi_c - \xi)^2 + (\eta_c - \eta)^2 + (\zeta_c - \zeta)^2} \right)^{-1} + W_V, \quad (2)$$

где $V_{\xi_c}, V_{\eta_c}, V_{\zeta_c}$ — проекции скорости спутника на оси ГСК; $V_{\xi}, V_{\eta}, V_{\zeta}$ — проекции скорости РТК на оси ГСК; W_V — погрешность измерений псевдоскорости.

С учетом равномоности множества случайных факторов, обусловленных атмосферными помехами, инструментальными погрешностями передатчика спутника и навигационного приемника и др. и влияющих на погрешности измерений псевдодальности W_R и псевдоскорости W_V , условно примем их белыми гауссовскими шумами с нулевыми средними и интенсивностями D_R и D_V соответственно.

Уравнение (2) относительно пространственных координат РТК в ГСК $[\xi \eta \zeta]^T$ может быть записано в следующей стохастической дифференциальной форме:

$$\begin{aligned} & [(\xi_c - \xi)V_{\xi c} + (\eta_c - \eta)V_{\eta c} + (\zeta_c - \zeta)V_{\zeta c}] - \\ & - \sqrt{(\xi_c - \xi)^2 + (\eta_c - \eta)^2 + (\zeta_c - \zeta)^2} (Z_V - W_V) = \\ & = \|\xi_c - \xi \quad \eta_c - \eta \quad \zeta_c - \zeta\| \dot{\xi} \dot{\eta} \dot{\zeta}^T. \end{aligned} \quad (3)$$

Так как для определения всех пространственных координат РТК данного уравнения недостаточно, то для редукции количества переменных в уравнении (3) используем заявленную ранее возможность разбиения всей траектории движения РТК на ортодромические траекторные интервалы (кратчайшие траектории между текущими точками), на которых существует известная аналитическая зависимость между пространственными координатами движущегося объекта [21, 22]:

$$\begin{aligned} \xi &= \cos P_0 P \eta - \sin P_0 a_0 \sqrt{a_1 - \eta^2}, \\ \zeta &= \sin P_0 P \eta + \cos P_0 a_0 \sqrt{a_1 - \eta^2}, \end{aligned} \quad (4)$$

где $\sqrt{1 + P^2} = a_0$; $\frac{r^2}{1 + P^2} = a_1$;

$$\begin{aligned} P &= (\xi_1 \zeta_0 - \xi_0 \zeta_1) / \sqrt{(\xi_1^2 + \zeta_1^2)(\xi_0^2 + \zeta_0^2)} / \\ & / \left(\frac{\eta_0^2}{r^2 - \eta_0^2} + \frac{\eta_1^2}{r^2 - \eta_1^2} - 2 \frac{\eta_0 \eta_1}{\sqrt{(r^2 - \eta_0^2)(r^2 - \eta_1^2)}} \times \right. \\ & \left. \times \frac{\xi_1 \zeta_0 + \xi_0 \zeta_1}{\sqrt{(\xi_1^2 + \zeta_1^2)(\xi_0^2 + \zeta_0^2)}} \right)^{1/2}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_0 &= \arctg \left(\left(\eta_0 \xi_1 \sqrt{r^2 - \eta_1^2} \sqrt{\zeta_0^2 + \xi_0^2} - \right. \right. \\ & \left. \left. - \eta_1 \xi_0 \sqrt{r^2 - \eta_0^2} \sqrt{\zeta_1^2 + \xi_1^2} \right) / \right. \\ & \left. / \left(\eta_1 \zeta_0 \sqrt{r^2 - \eta_0^2} \sqrt{\zeta_1^2 + \xi_1^2} - \right. \right. \\ & \left. \left. - \eta_0 \zeta_1 \sqrt{r^2 - \eta_1^2} \sqrt{\zeta_0^2 + \xi_0^2} \right) \right); \end{aligned}$$

ξ_0, η_0, ζ_0 — пространственные координаты начальной точки ортодромического отрезка; ξ_1, η_1, ζ_1 — пространственные координаты конечной точки ортодромического отрезка; r — радиус Земли.

Помимо аналитической зависимости между пространственными координатами движущегося объекта используем также аналитическую связь проекций его линейной скорости в ГСК, полученную путем дифференцирования (4):

$$\begin{aligned} V_{\xi} &= \left[\cos P_0 P + \sin P_0 a_0 \left(\sqrt{a_1 - \eta^2} \right)^{-1} \eta \right] V_{\eta} \\ V_{\zeta} &= \left[\sin P_0 P - \cos P_0 a_0 \left(\sqrt{a_1 - \eta^2} \right)^{-1} \eta \right] V_{\eta} \end{aligned} \quad (5)$$

Исходя из соотношений (4), (5), окончательно уравнение вектора пространственных координат РТК (3) на ортодромии сформируем в следующем виде:

$$\begin{aligned} & \left[(\xi_c - \cos P_0 P \eta + \sin P_0 a_0 \sqrt{a_1 - \eta^2}) V_{\xi c} + (\eta_c - \eta) \times \right. \\ & \left. \times V_{\eta c} + (\zeta_c - \sin P_0 P \eta - \cos P_0 a_0 \sqrt{a_1 - \eta^2}) \times V_{\zeta c} \right] - \\ & - (Z_V - W_V) \left[(\xi_c - \cos P_0 P \eta + \sin P_0 a_0 \sqrt{a_1 - \eta^2})^2 + \right. \\ & \left. + (\eta_c - \eta)^2 + (\zeta_c - \sin P_0 P \eta - \cos P_0 a_0 \sqrt{a_1 - \eta^2})^2 \right]^{1/2} = \\ & = (\xi_c - \cos P_0 P \eta + \sin P_0 a_0 \sqrt{a_1 - \eta^2}) \left(\cos P_0 P + \sin P_0 \times \right. \\ & \left. \times a_0 \left(\sqrt{a_1 - \eta^2} \right)^{-1} \eta \right) V_{\eta} + (\eta_c - \eta) V_{\eta} + \\ & + (\zeta_c - \sin P_0 P \eta - \cos P_0 a_0 \sqrt{a_1 - \eta^2}) \times \\ & \times \left(\sin P_0 P - \cos P_0 a_0 \left(\sqrt{a_1 - \eta^2} \right)^{-1} \eta \right) V_{\eta}. \end{aligned}$$

Учитывая характер движения РТК по сфере Земли (т. е. $\sqrt{\xi^2 + \eta^2 + \zeta^2} = r$), получим

$$\begin{aligned} & q_{0t} + q_{1t} \eta + q_{2t} \sqrt{a_1 - \eta^2} - (Z_V - W_V) \times \\ & \times \sqrt{\Theta_{1t} + \Theta_{2t} \eta + \Theta_{3t} \sqrt{a_1 - \eta^2}} = \\ & = \left(\chi_{0t} + (a_0^2 - P^2 - 1) \eta + \frac{\Theta_{3t}}{2} \left(\sqrt{a_1 - \eta^2} \right)^{-1} \eta \right) \dot{\eta}, \end{aligned}$$

где $\dot{\eta} = V_{\eta}$, $\xi_c V_{\xi c} + \eta_c V_{\eta c} + \zeta_c V_{\zeta c} = q_{0t}$,

$\xi_c \cos P_0 P + \eta_c + \zeta_c \sin P_0 P = \chi_{0t}$,

$-(V_{\xi c} P \cos P_0 + V_{\eta c} + V_{\zeta c} P \sin P_0) = q_{1t}$,

$a_0 (V_{\xi c} \sin P_0 - V_{\zeta c} \cos P_0) = q_{2t}$,

$\Theta_{1t} = \xi_c^2 + \eta_c^2 + \zeta_c^2 + r^2$,

$\Theta_{2t} = -2[\xi_c P \cos P_0 + \eta_c + \zeta_c P \sin P_0]$,

$\Theta_{3t} = 2a_0[\xi_c \sin P_0 - \zeta_c \cos P_0]$ — временные функции.

В форме Ланжевена, исходной для построения алгоритмов стохастической оценки, данное уравнение принимает вид

$$\dot{\eta} = \frac{q_{0t} + q_{1t}\eta + q_{2t}\sqrt{a_1 - \eta^2}}{\chi_{0t} + (a_0^2 - P^2 - 1)\eta + \frac{\Theta_{3t}}{2}(\sqrt{a_1 - \eta^2})^{-1}\eta} - \frac{Z_V\sqrt{\Theta_{1t} + \Theta_{2t}\eta + \Theta_{3t}\sqrt{a_1 - \eta^2}}}{\chi_{0t} + (a_0^2 - P^2 - 1)\eta + \frac{\Theta_{3t}}{2}(\sqrt{a_1 - \eta^2})^{-1}\eta} + \frac{\sqrt{\Theta_{1t} + \Theta_{2t}\eta + \Theta_{3t}\sqrt{a_1 - \eta^2}}}{\chi_{0t} + (a_0^2 - P^2 - 1)\eta + \frac{\Theta_{3t}}{2}(\sqrt{a_1 - \eta^2})^{-1}\eta} W_V$$

или

$$\dot{\eta} = F_{\eta}(\eta, t) + F_{0\eta}(\eta, t)W_V, \quad (6)$$

где

$$F_{\eta}(\eta, t) = \frac{q_{0t} + q_{1t}\eta + q_{2t}\sqrt{a_1 - \eta^2}}{\chi_{0t} + (a_0^2 - P^2 - 1)\eta + \frac{\Theta_{3t}}{2}(\sqrt{a_1 - \eta^2})^{-1}\eta} - \frac{Z_V\sqrt{\Theta_{1t} + \Theta_{2t}\eta + \Theta_{3t}\sqrt{a_1 - \eta^2}}}{\chi_{0t} + (a_0^2 - P^2 - 1)\eta + \frac{\Theta_{3t}}{2}(\sqrt{a_1 - \eta^2})^{-1}\eta},$$

$$F_{0\eta}(\eta, t) = \frac{\sqrt{\Theta_{1t} + \Theta_{2t}\eta + \Theta_{3t}\sqrt{a_1 - \eta^2}}}{\chi_{0t} + (a_0^2 - P^2 - 1)\eta + \frac{\Theta_{3t}}{2}(\sqrt{a_1 - \eta^2})^{-1}\eta}.$$

Решение данного уравнения с одновременным использованием соотношений (4) является окончательным решением задачи пространственной ориентации РТК по спутниковым измерениям. В силу того, что уравнение (6) является стохастическим, задача пространственной ориентации РТК может быть решена лишь с использованием методов стохастического оценивания пространственной координаты η . В этом случае можно использовать хорошо отработанные методы теории стохастической фильтрации [8, 10–18]. Среди разработанных на сегодняшний день методов фильтрации наиболее эффективным по точности и вычислительным затратам является расширенный фильтр Калмана [15, 17, 18]. Однако его применение требует дополнительного наличия уравнения наблюдателя параметров состояния наблюдаемого объекта. С этой целью проделаем следующие построения.

Модель наблюдателя параметров пространственной ориентации РТК. В силу того, что измерения псевдоскорости были уже полностью использованы при выводе уравнений пространственной ориентации РТК, при построении уравнения наблюдателя пространственной ориентации рассмотрим далее в качестве его выходного сигнала измерения псевдодальности. Исходя из их общей формы (1) и учитывая аналитические зависимости (4), (5), в данном случае имеем

$$Z_{Rort} = \left(\left(\xi_c - \cos P_0 P \eta + \sin P_0 a_0 \sqrt{a_1 - \eta^2} \right)^2 + (\eta_c - \eta)^2 + \left(\xi_c - \sin P_0 P \eta - \cos P_0 a_0 \sqrt{a_1 - \eta^2} \right)^2 \right)^{1/2} + W_R = H(\eta, t) + W_R, \quad (7)$$

где W_R — погрешности измерений псевдодальности,

$$H(\eta, t) = \left(\xi_c^2 + \eta_c^2 + \zeta_c^2 + r^2 - 2[\xi_c P \cos P_0 + \eta_c + \zeta_c P \sin P_0]\eta + 2a_0[\xi_c \sin P_0 - \zeta_c \cos P_0]\sqrt{a_1 - \eta^2} \right)^{1/2} = \sqrt{\Theta_1 + \Theta_2\eta + \Theta_3\sqrt{a_1 - \eta^2}},$$

где $\Theta_1 = \xi_c^2 + \eta_c^2 + \zeta_c^2 + r^2$,

$$\Theta_2 = -2[\xi_c P \cos P_0 + \eta_c + \zeta_c P \sin P_0],$$

$\Theta_3 = 2a_0[\xi_c \sin P_0 - \zeta_c \cos P_0]$ — временные функции.

Здесь следует подчеркнуть, что вся необходимая для наблюдения и последующей оценки пространственной координаты η информация содержится в сигнале измерения псевдодальности только одного спутника (как и информация, необходимая для построения уравнения динамики данной координаты (6) по измерениям псевдоскорости).

Приведенные уравнения наблюдателя (7) и объекта (6) позволяют построить искомый алгоритм оценки в форме расширенного фильтра Калмана:

$$\left. \begin{aligned} \dot{\hat{\eta}} &= F_{\eta}(\hat{\eta}, t) + K(\hat{\eta}, t)(Z_{Rort} - H(\hat{\eta}, t)) \\ K(\hat{\eta}, t) &= R(\hat{\eta}, t) \frac{\partial H(\hat{\eta}, t)}{\partial \hat{\eta}} D_R^{-1} \\ \dot{R}(\hat{\eta}, t) &= 2R(\hat{\eta}, t) \frac{\partial F_{\eta}(\hat{\eta}, t)}{\partial \hat{\eta}} + F_{0\eta}^2(\eta, t) D_V - \\ &\quad - \left(R(\hat{\eta}, t) \frac{\partial H(\hat{\eta}, t)}{\partial \hat{\eta}} \right)^2 D_R^{-1} \end{aligned} \right\}, \quad (8)$$

где $\hat{\eta}$ — стохастическая оценка координаты η , $\hat{\eta} = M(\eta_0)$; $R(\hat{\eta}, t)$ — апостериорная ковариационная функция, $R_0 = M\{(\eta_0 - \hat{\eta}_0)^2\}$, используемые в данном алгоритме совместно с соотношениями (4).

Данный алгоритм обеспечивает полное решение поставленной задачи пространственной ориентации РТК, функционирующего в условиях случайных помех спутниковых измерений. При этом следует отметить, что оценка $\hat{\eta}$ координаты η в пределах текущего траекторного интервала в силу вышеприведенных аналитических зависимостей от нее остальных координат автоматически определяет позиционирование РТК на этом траекторном интервале (с погрешностью, определяемой ошибкой оценки $\hat{\eta}$). То есть исключается возможность позиционирования РТК вне программной

траектории, в отличие от существующих методов позиционирования (например, «припасовки к карте»).

Для оценки точности предложенного подхода был проведен следующий численный эксперимент.

Методика и результаты численного эксперимента.

Для РТК, осуществляющего экологический мониторинг, моделировалось движение в плоскости местного меридиана из начальной точки с долготой 30° и широтой 45° (т. е. $\xi_0 = 2\,253\,549$ м, $\eta_0 = 4\,507\,098$ м, $\zeta_0 = 3\,903\,261$ м) в конечную точку с широтой 47° (т. е. $\xi_1 = 2\,173\,875$ м, $\eta_1 = 4\,660\,125$ м, $\zeta_1 = 3\,765\,152$ м).

Горизонтальная составляющая его скорости в географической системе координат в соответствии с характером мониторинга изменялась во времени по закону

$$V_r = 20 + 5 \sin 0,02t \text{ (м/с)}, \quad (9)$$

а проекция скорости на ось η ГСК, соответственно, как

$$\dot{\eta} = V_r \sqrt{1 - \left(\frac{\eta}{r}\right)^2}. \quad (10)$$

Текущее изменение пространственной координаты η определялось интегрированием уравнения (10) методом Рунге—Кутты 4-го порядка с шагом $\Delta t = 0,01$ с в течение временного интервала $t \in [0; 1000]$ с, а пространственные координаты ξ, ζ вычислялись по соотношениям (4).

Анализ точности разработанного алгоритма (8) осуществлялся путем оценки траектории РТК при использовании двух классов спутниковых навигационных систем (СНС) — средней и низкой точности. При моделировании шума W_v для СНС средней точности использовался белый гауссовский шум с нулевым средним и дисперсией $(0,1 \text{ м/с})^2$, при моделировании шума W_R — то же с нулевым средним и дисперсией $(5 \text{ м})^2$. Для СНС низкой точности дисперсия шума W_v была выбрана равной $(0,3 \text{ м/с})^2$, а шума W_R — равной $(15 \text{ м})^2$.

График погрешности оценки координаты η РТК для СНС средней точности показан на рис. 1.

Из полученных результатов видна ярко выраженная тенденция к резкому уменьшению погрешности оценки координаты η : уже на начальном временном интервале (не более 10 с) данная погрешность снижается до 1,9 м. В дальнейшем она продолжает уменьшаться, не превышая 0,7 м на всем интервале моделирования (см. рис. 2 с фрагментом изменения погрешности оценки η на временном интервале 300–500 с), при том, что требуемый уровень точности для данных СНС определяется в пределах 5 м.

На рис. 3 показан график изменения погрешности оценки координаты η РТК для СНС низкой точности. В данном случае по-прежнему наблюдается хорошая степень сходимости и устойчивости процесса оценивания, хотя уровень погрешностей в установившемся

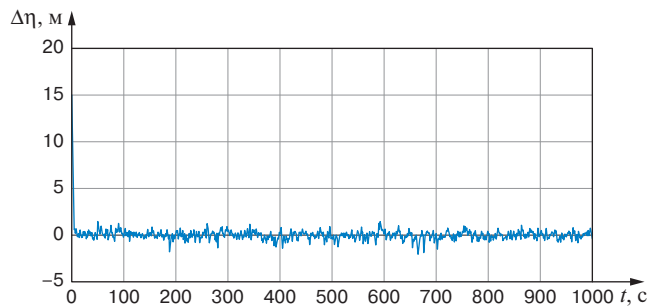


Рис. 1. Погрешность оценки координаты η РТК для СНС средней точности

Fig. 1. Coordinate η estimation error of robotic systems for medium accuracy satellite navigation systems

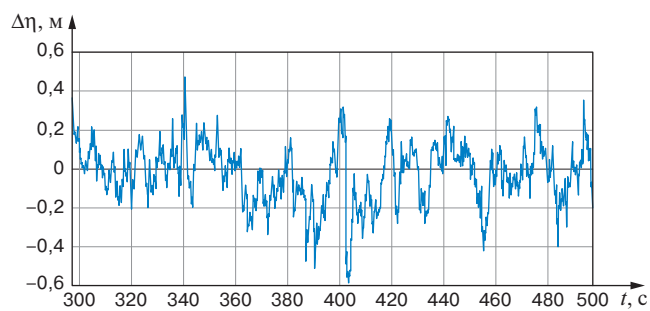


Рис. 2. Фрагмент изменения погрешности оценки координаты η на временном интервале [300; 500] с

Fig. 2. Fragment of the change of the coordinate η estimation error on the time interval of [300; 500] s

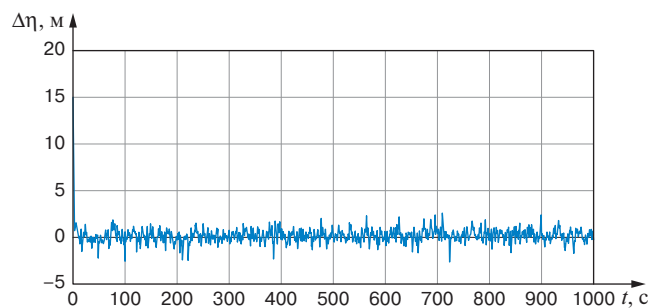


Рис. 3. Погрешность оценки координаты η для СНС низкой точности

Fig. 3. Coordinate η estimation error for low accuracy satellite navigation systems

режиме возрастает до 4,1 м. Но здесь следует иметь в виду, что для объектов с СНС низкой точности подобный уровень погрешностей позиционирования существенно превышает требуемый на сегодняшний день (10 м).

Обсуждение и заключение. Приведенные результаты численного моделирования позволяют сделать выводы, во-первых, о достижении поставленной в работе цели, а во-вторых, сформулировать основные преимущественные особенности предложенного алгоритма по сравнению с традиционными методами позиционирования РТК, а именно:

• учет стохастической динамики наблюдаемого объекта;

• устойчивость определения пространственной ориентации РТК, прежде всего, даже при деградации наблюдаемой спутниковой группировки (за счет достаточного наличия только одного спутника для решения задачи навигации), а также в силу принципиальной принадлежности оценок всех пространственных координат текущему программному траекторному интервалу, обусловленной их аналитическими зависимостями от одной оцениваемой координаты;

• минимальная размерность алгоритма стохастической оценки текущих координат РТК (т. е. минимальный объем вычислительных затрат для бортового вычислителя).

Некоторым ограничением рассмотренного подхода является необходимость наличия программной траектории РТК, но для широкого класса подвижных РТК общего и специального назначения (наземных, воздушных и морских) данный недостаток критичным не является. В целом результаты численного эксперимента в совокупности с отмеченными выше преимущественными особенностями предложенного метода позволяют сделать вывод о возможности его эффективного практического применения для позиционирования подвижных РТК широкого назначения при рассмотренном выше комплексировании электронных карт и первичных спутниковых навигационных измерений.

Финансирование: авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

Funding: the authors received no financial support for the research, authorship, and publication of this article.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах.

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest and no financial interests in any material discussed in this article.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Bhatti J., Humphreys T. Hostile control of ships via false GPS signals: Demonstration and detection. *NAVIGATION: Journal of The Institute of Navigation*. 2017;64(1):51–66. <https://doi.org/10.1002/navi.183>.
2. Nadler A., Bar-Itzhack I. Y. An Efficient Algorithm For Attitude Determination Using GPS. In: *Proceedings of the 11th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GPS 1998)*. [S. l.]; 1998. p. 1783–1789.
3. Соловьев Ю. А. Системы спутниковой навигации. М.: Эко-Трендз, 2000. 270 с.
4. Solov'ev Yu. A. *Satellite navigation systems*. Moscow: Eko-Trendz Publ.; 2000. 270 p. (In Russ.).
5. Closas P., Luise M., Avila-Rodriguez J., Hegarty C., Lee J. Advances in signal processing for GNSSs [From the Guest Editors]. *IEEE Signal Processing Magazine*. 2017;34(5):12–15. <https://doi.org/10.1109/msp.2017.2716318>.

5. Яценков В. С. Основы спутниковой навигации. Системы GPS NAVSTAR и ГЛОНАСС. М.: Горячая линия-Телеком, 2005. 272 с.

Yatsenkov V. S. *Fundamentals of satellite navigation. GPS, NAVSTAR and GLONASS systems*. Moscow: Goryachaya liniya-Telekom Publ.; 2005. 272 p. (In Russ.).

6. Сетевые спутниковые радионавигационные системы / В. С. Шебшаевич [и др.]; под ред. В. С. Шебшаевича. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Радио и связь, 1993. 414 с.

Shebshayevich V. S., Dmitriyev P. P., Ivantsevich I. V., Kalugin A. V., Kovalevskiy E. G., Kudryavtsev I. V., et al. *Network satellite radio-navigation systems*. 2nd ed., revised and expanded. Moscow: Radio i svyaz' Publ.; 1993. 414 p. (In Russ.).

7. Amin M. G., Closas P., Broumandan A., Volakis J. Vulnerabilities, threats, and authentication in satellite-based navigation systems. *Proceedings of the IEEE*. 2016;104(6):1169–1173. <https://doi.org/10.1109/jproc.2016.2550638>.

8. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / под ред. А. И. Перова, В. Н. Харисова. Изд. 4-е, перераб. М.: Радиотехника, 2010. 800 р.

Perov A. I., Kharisov V. N. (eds.) *GLONASS. Principal structure and functions*. 4th ed., revised. Moscow: Radiotekhnika Publ.; 2010. 800 p. (In Russ.).

9. Closas P., Fernandez-Prades C., Fernandez-Rubio J. A. A Bayesian approach to multipath mitigation in GNSS receivers. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*. 2009;3(4):695–706. <https://doi.org/10.1109/jstsp.2009.2023831>.

10. Ferrero A., Ferrero R., Jiang W., Salicone S. The Kalman Filter Uncertainty Concept in the Possibility Domain. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2019;68(11):4335–4347. <https://doi.org/10.1109/tim.2018.2890317>.

11. Al Bitar N., Gavrilov A. A novel approach for aiding unscented Kalman filter for bridging GNSS outages in integrated navigation systems. *NAVIGATION: Journal of The Institute of Navigation*. 2021;68(3):521–539. <https://doi.org/10.1002/navi.435>.

12. Wang D., Ly H., Wu J. Augmented Cubature Kalman filter for nonlinear RTK/MIMU integrated navigation with non-additive noise. *Measurement*. 2017;97:111–125. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.10.056>.

13. Celentano L., Basin M. V. Optimal Estimator Design for LTI Systems with Bounded Noises Disturbances and Nonlinearities Circuits Systems and Signal Processing. *Circuits, Systems and Signal Processing*. 2021;40:3266–3285. <https://doi.org/10.1007/s00034-020-01635-z>.

14. Dunik J., Biswas S. K., Dempster A. G., Pany T., Closas P. State Estimation Methods in Navigation: Overview and Application. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*. 2020;35(12):16–31. <https://doi.org/10.1109/maes.2020.3002001>.

15. Тихонов В. И., Харисов В. Н. Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем. М.: Радио и связь, 2004. 608 р.

Tikhonov V. I., Kharisov V. N. *Statistical analysis and synthesis of radio engineering devices and systems*. Moscow: Radio i svyaz' Publ.; 2004. 608 p. (In Russ.).

16. Langel S., Crespillo O. G., Joerger M. Overbounding the effect of uncertain Gauss-Markov noise in Kalman filtering Navigation. *NAVIGATION: Journal of The Institute of Navigation*. 2021;68(2):259–276. <https://doi.org/10.1002/navi.419>.

17. Asgari M., Khaloozadeh H. Robust extended Kalman filtering for nonlinear systems with unknown input: a UBB model approach. *IET Radar, Sonar and Navigation*. 2020;14(11):1837–1844. <https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2020.0258>.

18. Miller B. M., Kolosov K. S. Robust estimation based on the least absolute deviations method and the Kalman filter. *Automation and Remote Control*. 2020;81(11):1994–2010. <https://doi.org/10.1134/s0005117920110041>.

19. Simandl M., Kralovec J. Filtering, prediction and smoothing with Gaussian sum representation. *IFAC Proceedings Volumes*. 2020;33(15):1157-1162. [https://doi.org/10.1016/s1474-6670\(17\)39910-x](https://doi.org/10.1016/s1474-6670(17)39910-x).

20. Охотников А.Л., Цветков В.Я., Козлов А.В. Алгоритмы транспортных киберфизических систем // Железнодорожный транспорт. 2021. № 12. С. 49–53. EDN: <https://elibrary.ru/kjwwmq>.

Okhotnikov A. L., Tsvetkov V. Ya., Kozlov A. V. Algorithms of transport cyber-physical systems. *Zheleznodorozhnyy transport*. 2021;(12):49-53. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/kjwwmq>.

21. Kucherenko P. A., Sokolov S. V. Analytical Solution of the Navigation Problem on the Orthodromic Trajectory in the Greenwich Co-ordinate System. *Mechanics of Solids*. 2018;53:133-134. <https://doi.org/10.3103/s0025654418050114>.

22. Kucherenko P. A., Sokolov S. V. Analytical Approximation of Functional Dependences of the Geodesic Line Parameters. *Mechanics of Solids*. 2020;55(8):1210-1215. <https://doi.org/10.3103/s0025654420080130>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Сергей Викторович СОКОЛОВ,

д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой информатики и вычислительной техники, Московский технический университет связи и информатики (МТУСИ, 111024, г. Москва, ул. Авиамоторная, д. 8а); главный научный сотрудник, научный отдел, департамент научных исследований, аналитики и совершенствования научно-технической деятельности, Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте (НИИАС, 107078, г. Москва, Орликов пер., д. 5), Author ID: 3225, <https://orcid.org/0000-0002-5246-841X>

Андрей Леонидович ОХОТНИКОВ,

заместитель начальника Департамента — начальник отдела стратегического развития, Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте (НИИАС, 107078, г. Москва, Орликов пер., д. 5), Author ID: 916989, <https://orcid.org/0000-0002-2863-5863>

Даниил Витальевич МАРШАКОВ,

канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры информатики и вычислительной техники, Московский технический университет связи и информатики (МТУСИ, 111024, г. Москва, ул. Авиамоторная, д. 8а), Author ID: 773295, <https://orcid.org/0000-0001-5795-8146>

Ирина Витальевна РЕШЕТНИКОВА,

канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры инфокоммуникационных технологий и систем связи, Московский технический университет связи и информатики (МТУСИ, 111024, г. Москва, ул. Авиамоторная, д. 8а), Author ID: 519983, <https://orcid.org/0000-0001-7318-7396>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sergey V. SOKOLOV,

Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Informatics and Computer Engineering, Moscow Technical University of Communications and Informatics (111024, Moscow, 8a, Aviamotornaya St.); Chief Researcher, Scientific Department, Department of Scientific Research, Analytics and Improvement of Scientific and Technical Activity, Research and Design Institute of Informatization, Automation and Communication on Railway

Transport (107078, Moscow, 5, Orlikov Lane), Author ID: 3225, <https://orcid.org/0000-0002-5246-841X>

Andrey L. OKHOTNIKOV,

Deputy Head of the Department – Head of the Strategic Development Department, Research and Design Institute of Informatization, Automation and Communication on Railway Transport (107078, Moscow, 5, Orlikov Lane), Author ID: 916989, <https://orcid.org/0000-0002-2863-5863>

Daniil V. MARSHAKOV,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Informatics and Computer Engineering, Moscow Technical University of Communications and Informatics (111024, Moscow, 8a, Aviamotornaya St.), Author ID: 773295, <https://orcid.org/0000-0001-5795-8146>

Irina V. RESHETNIKOVA,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of Infocommunication Technologies and Communication Systems, Moscow Technical University of Communications and Informatics (111024, Moscow, 8a, Aviamotornaya St.), Author ID: 519983, <https://orcid.org/0000-0001-7318-7396>

ВКЛАД АВТОРОВ

Сергей Викторович СОКОЛОВ. Формулировка цели и методологии исследования, выводы (35%).

Андрей Леонидович ОХОТНИКОВ. Подготовка, организация и выполнение испытаний, анализ опытных данных, описание результатов (25%).

Даниил Витальевич МАРШАКОВ. Научное сопровождение испытаний, анализ результатов, написание статьи (20%).

Ирина Витальевна РЕШЕТНИКОВА. Анализ исходных данных, описание результатов, выводы (20%).

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Sergey V. SOKOLOV. Formulation of research objective and methodology, conclusions (35%).

Andrey L. OKHOTNIKOV. Preparation, organisation and execution of trials, test data analysis, description of results (25%).

Daniil V. MARSHAKOV. Scientific support of the tests, analysis of results, writing the article (20%).

Irina V. RESHETNIKOVA. Raw data analysis, description of results, conclusions (20%).

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The authors have read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию 17.07.2024, рецензия от первого рецензента получена 06.08.2024, рецензия от второго рецензента получена 27.08.2024, рецензия от третьего рецензента получена 28.08.2024, принята к публикации 30.08.2024.

The article was submitted 17.07.2024, first review received 06.08.2024, second review received 27.08.2024, third review received 28.08.2024, accepted for publication 30.08.2024.

МОНОГРАФИИ И СБОРНИКИ

Научно-издательский отдел предлагает приобрести Труды АО «ВНИИЖТ»:

- Певзнер, В. О. Основы разработки нормативов содержания пути и установления скоростей движения : монография / В. О. Певзнер, Ю. С. Ромен. — Изд. 2-е, перераб. и доп. — Москва : Куна, 2024. — 308 с.
- Генераторно-приводные установки систем автономного электроснабжения железнодорожных вагонов : монография / С. Л. Самошкин, С. Н. Науменко, О. А. Ворон, С. А. Соловьев ; под ред. С. Л. Самошкина. — Москва : КУНА, 2024. — 240 с.
- Коган, А. Я. Динамика пути и его взаимодействие с подвижным составом / А. Я. Коган. — Изд. 2-е, перераб. и доп. — Москва : КУНА, 2023. — 280 с.
- Силюта, А. Г. Методология выбора рациональных характеристик автономных локомотивов / А. Г. Силюта. — Москва : КУНА, 2023. — 86 с.
- Рожицкий, Д. Б. Нетяговая энергетика железнодорожного транспорта. Нормирование потребления топливно-энергетических и водных ресурсов / Д. Б. Рожицкий. — Москва : РАС, 2022. — 324 с.
- Электробезопасность электроустановок транспорта / А. Б. Косарев, С. А. Виноградов, Ю. Н. Король, И. А. Косарев. — Москва : РАС, 2022. — 448 с.
- Кондрашов, В. М. Альтернативные методы исследования динамики железнодорожных экипажей / В. М. Кондрашов, И. Н. Максимов. — Москва : РАС, 2022. — 105 с.
- Обобщение мирового опыта тяжеловесного движения. Управление содержанием подвижного состава. Том 1. Грузовые вагоны / под ред. С. М. Захарова. — Москва : ИННА, 2021. — 456 с.
- Обобщение мирового опыта тяжеловесного движения. Управление содержанием подвижного состава. Том 2. Грузовые локомотивы / под ред. С. М. Захарова. — Москва : ИННА, 2021. — 344 с.
- Марков, Д. П. Атомно-молекулярные механизмы вещественного трения / Д. П. Марков. — Москва : РАС, 2019. — 104 с.
- Актуальные вопросы развития железнодорожного транспорта. Ч. 1 / под ред. А. Б. Косарева, Г. В. Гогричиани. — Москва : РАС, 2019. — 272 с.
- Актуальные вопросы развития железнодорожного транспорта. Ч. 2 / под ред. А. Б. Косарева, Г. В. Гогричиани. — Москва : РАС, 2019. — 300 с.
- Ромен, Ю. С. Взаимодействие пути и экипажа в рельсовой колее / Ю. С. Ромен. — Москва : РАС, 2019. — 160 с.
- АСУ «Экспресс» — автоматизированная система управления пассажирскими перевозками на железнодорожном транспорте / под ред. А. В. Комиссарова. — Москва : РАС, 2019. — 168 с.
- Экспериментальная оценка взаимодействия экипажа и пути при скоростном и высокоскоростном движении / под ред. А. М. Бржезовского. — Москва : РАС, 2019. — 152 с.
- Экономические исследования железнодорожного комплекса и их практическое значение / под ред. О. Ф. Мирошниченко. — Москва : РАС, 2019. — 210 с.
- Певзнер, В. О. Научные основы системы управления состоянием пути / В. О. Певзнер. — Москва : РАС, 2018. — 272 с.
- Научное сопровождение развития высокоскоростных магистралей в России / под ред. А. Б. Косарева, О. Н. Назарова. — Москва : РАС, 2018. — 119 с.
- Особенности системы ведения рельсового хозяйства на российских железных дорогах / под ред. А. Ю. Абдурашитова. — Москва : РАС, 2017. — 160 с.
- Вопросы развития железнодорожного транспорта / под ред. М. М. Железнова, Г. В. Гогричиани. — Москва : РАС, 2017. — 270 с.
- Обобщение мирового опыта тяжеловесного движения. Управление содержанием системы колесо — рельс / под ред. С. М. Захарова. — Москва : Интекст, 2017. — 420 с.
- Савин, А. В. Безбалластный путь / А. В. Савин. — Москва : РАС, 2017. — 192 с.

- Коган, А. Я. Случайные процессы взаимодействия пути и подвижного состава / А. Я. Коган, Э. Д. Загитов, И. В. Полешук. — Москва : РАС, 2016. — 210 с.
- Берент, В. Я. Сильноточный скользящий контакт (свойства, повреждаемость и процессы, протекающие в нем) / В. Я. Берент. — Москва : Аналитика Родис, 2016. — 330 с.
- Антюхин, Г. Г. Совершенствование учета расхода моторного масла тепловозами / Г. Г. Антюхин, И. Л. Поварков. — Москва : Аналитика Родис, 2016. — 104 с.
- Шенфельд, К. П. Развитие методов управления перевозочным процессом на железнодорожном транспорте в современных условиях / К. П. Шенфельд, Е. А. Сотников. — Москва : Научный мир, 2015. — 202 с.
- Косарев, А. Б. Электромагнитные процессы в системах энергоснабжения железных дорог переменного тока / А. Б. Косарев, Б. И. Косарев, Д. В. Сербиненко. — Москва : ВМГ-Принт, 2015. — 349 с.
- Тюрнин, П. Г. Токосъем: надежность, экономичность и пути совершенствования / П. Г. Тюрнин, А. Т. Тибилев, Н. В. Миронос. — Москва : ВМГ-Принт, 2015. — 166 с.
- Ромен, Ю. С. Динамика железнодорожного экипажа в рельсовой колее. Методы расчета и испытаний / Ю. С. Ромен. — Москва : ВМГ-Принт, 2014. — 210 с.
- Современная методология технического нормирования расхода топливно-энергетических ресурсов локомотивами на тягу поездов / Л. А. Мугинштейн, А. И. Молчанов, С. А. Виноградов, К. М. Попов, Е. Н. Школьников. — Москва : ВМГ-Принт, 2014. — 144 с.
- Повышение эффективности устройства и содержания железнодорожного пути / под ред. А. Ю. Абдурашитова. — Москва : ВМГ-Принт, 2014. — 125 с.
- Актуальные проблемы экономики железнодорожного транспорта и пути их решения / под ред. О. Ф. Мирошников. — Москва : ВМГ-Принт, 2014. — 258 с.
- Повышение эффективности инноваций и мотивация их внедрения на железных дорогах России: научно-методическое пособие / под ред. М. М. Толкачевой, Г. Е. Писаревского. — Москва : Интекст, 2014. — 152 с.
- Железнодорожный транспорт на современном этапе / под ред. Б. М. Лапидуса, Г. В. Гогричани. — Москва : ВМГ-Принт, 2014. — 292 с.
- Дыдышко, П. И. Земляное полотно железнодорожного пути: справочник / П. И. Дыдышко. — Москва : Интекст, 2014. — 416 с.
- Железнодорожный транспорт на современном этапе развития / под ред. М. М. Железнова, Г. В. Гогричани. — Москва : Интекст, 2013. — 288 с.
- Путь и путевое хозяйство. Взаимодействие колеса и рельса / под ред. М. М. Железнова. — Москва : Интекст, 2013. — 236 с.
- Лапидус, Б. М. Железнодорожный бизнес: как встать на главный путь / Б. М. Лапидус. — Москва : Интекст, 2013. — 383 с.
- Макроэкономическая роль железнодорожного транспорта: Теоретические основы, исторические тенденции и взгляд в будущее / под ред. Б. М. Лапидуса, Д. А. Мачерета. — Москва : КРАСАНД, 2013. — 324 с.
- Певзнер, В. О. Основы разработки нормативов содержания пути и установления скоростей движения / В. О. Певзнер, Ю. С. Ромен. — Москва : Интекст, 2013. — 224 с.
- Заручейский, А. В. Экспериментальные исследования процессов движения подвижного состава / А. В. Заручейский, П. Т. Гребенюк. — Москва : Интекст, 2013. — 80 с.
- Современные и перспективные конструкции железнодорожного пути для различных условий эксплуатации / под ред. А. Ю. Абдурашитова. — Москва : Интекст, 2013. — 152 с.
- Имитационное моделирование в задачах организации движения поездов / под ред. Л. А. Мугинштейна. — Москва : Интекст, 2012. — 56 с.
- Обобщение мирового опыта тяжеловесного движения. Конструкция и содержание железнодорожной инфраструктуры / под ред. С. М. Захарова. — Москва : Интекст, 2012. — 568 с.
- Проблемы железнодорожного транспорта. Задачи и пути их решения / под ред. Б. М. Лапидуса, Г. В. Гогричани. — Москва : Интекст, 2012. — 260 с.
- Мугинштейн, Л. А. Энергооптимальные методы управления движением поездов / Л. А. Мугинштейн, И. А. Ябло, А. Е. Илютович. — Москва : Интекст, 2012. — 80 с.

По вопросам приобретения книг и за справочной информацией обращаться в научно-издательский отдел АО «ВНИИЖТ»:

anokhov.igor@vniizht.ru
rio@vniizht.ru
тел.: +7 (495) 602-83-01, +7 (495) 602-84-56

Актуальная информация о Трудах ВНИИЖТ доступна на сайте (переход через QR-код):



