

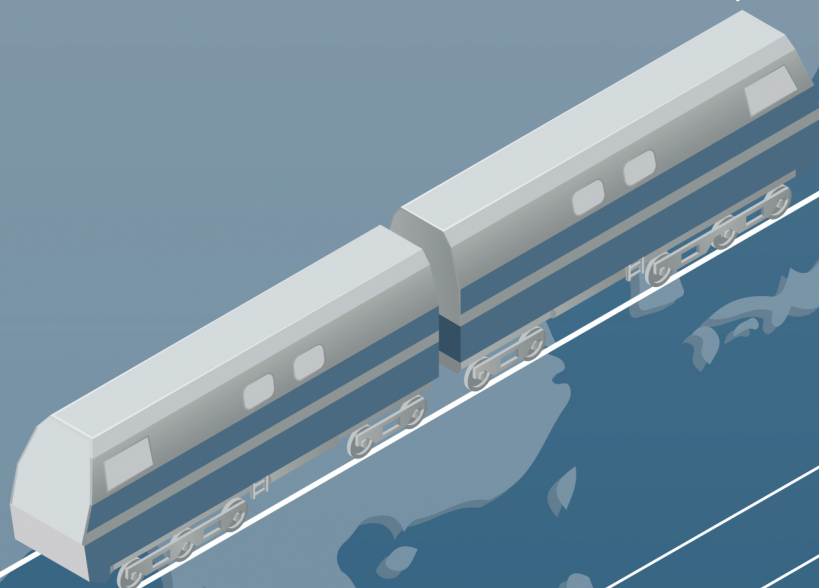


ISSN 2223 – 9731 (Print)
ISSN 2713 – 2560 (Online)



ВЕСТНИК НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ИНСТИТУТА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА RUSSIAN RAILWAY SCIENCE JOURNAL

Том 83, №4. 2024



Издаётся с 1942 г.

Published since 1942

АО «ВНИИЖТ»

Научно-исследовательский институт
железнодорожного транспорта



Узнать больше
о научных проектах
ВНИИЖТ можно
на нашем сайте



**Превращаем
науку в результат**

Подписывайтесь на ВНИИЖТ
в социальных сетях,
чтобы быть в курсе актуальных
новостей о жизни института



ISSN 2223–9731 (Print)

ISSN 2713–2560 (Online)

ВЕСТНИК
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ИНСТИТУТА
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА
(ВЕСТНИК ВНИИЖТ)

RUSSIAN RAILWAY SCIENCE JOURNAL
(VESTNIK VNIIZHT)

ТОМ 83, № 4. 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

ВЕСТНИК ВНИИЖТ

Цель журнала — 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



Директории журналов открытого доступа (DOAJ)



Агентстве 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

RUSSIAN RAILWAY SCIENCE JOURNAL

The aim 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



Directory of Open Access Journals (DOAJ)



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 Эйнихович, 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>

Наumenко 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, редактор-корректор,

Барашков Владислав Владимирович, руководитель группы дизайна

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

Подписано к печати 23.12.2024. Формат бумаги 60×90 1/8. Офсетная печать. Усл. печ. л. 12. Тираж 300 экз. Заказ 169821. 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 Xuwei, 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, Editor-proofreader,
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 23.12.2024. Format is 60×90 1/8. Offset printing. 12 printed sheets. 300 copies. Order No. 169821. Free price

СОДЕРЖАНИЕ

УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССАМИ ПЕРЕВОЗОК

Оценка эффективности интервального регулирования движения поездов на однопутных направлениях железнодорожной сети
С. А. Бессоненко, Е. В. Климова, Н. И. Осипов 287–301

Определение рациональной схемы предоставления «окон» для работ по капитальному ремонту пути
В. Г. Федулин, М. И. Мехедов, В. А. Антонец, В. А. Устинов 302–310

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Оценка возможности использования околोगабаритного пространства для железнодорожных мостов
А. А. Локтев, И. В. Шишкина 312–318

Анализ энергетических затрат на выполняемую электровозами маневровую работу
К. М. Попов 319–335

Технические решения для улучшения условий и плавности движения поездов по стрелочным переводам
Б. Э. Глюзберг, П. В. Трегубчак, И. В. Цитцер 336–347

Эффективное использование и разработка колесообрабатывающих станков для нужд локомотивного комплекса
Р. Х. Рафиков, А. С. Шинкарук, Е. И. Елисейкин 348–361

Влияние динамики взаимодействия пути и подвижного состава на изменение состояния пути и организацию его технического обслуживания в процессе эксплуатации
О. А. Суслов 362–371

Содержание журнала за 2024 год 372–373

CONTENTS

TRANSPORTATION PROCESS MANAGEMENT

Evaluating train interval control performance on single-track lines of the railway network

Sergey A. Bessonenko, Ekaterina V. Klimova, Nikolay I. Osipov 287–301

Streamlined break scheduling for major track repairs

Vyacheslav G. Fedulin, Mikhail I. Mehedov, Vladimir A. Antonets, Vladimir A. Ustinov 302–310

TECHNICAL MEANS OF RAILWAY TRANSPORT

Feasibility of using circumferential space for railway bridges

Alexey A. Loktev, Irina V. Shishkina 312–318

Analysis of energy costs for shunting operations performed by electric locomotives

Kirill M. Popov 319–335

Engineering solutions to improve conditions and smoothness of train traffic on turnout switches

Boris E. Glyuzberg, Pavel V. Tregubchak, Il'ya V. Tsittser 336–347

Efficient use and development of wheel-working machines for the locomotive facility needs

Rafik H. Rafikov, Andrey S. Shinkaruk, Evgeniy I. Eliseykin 348–361

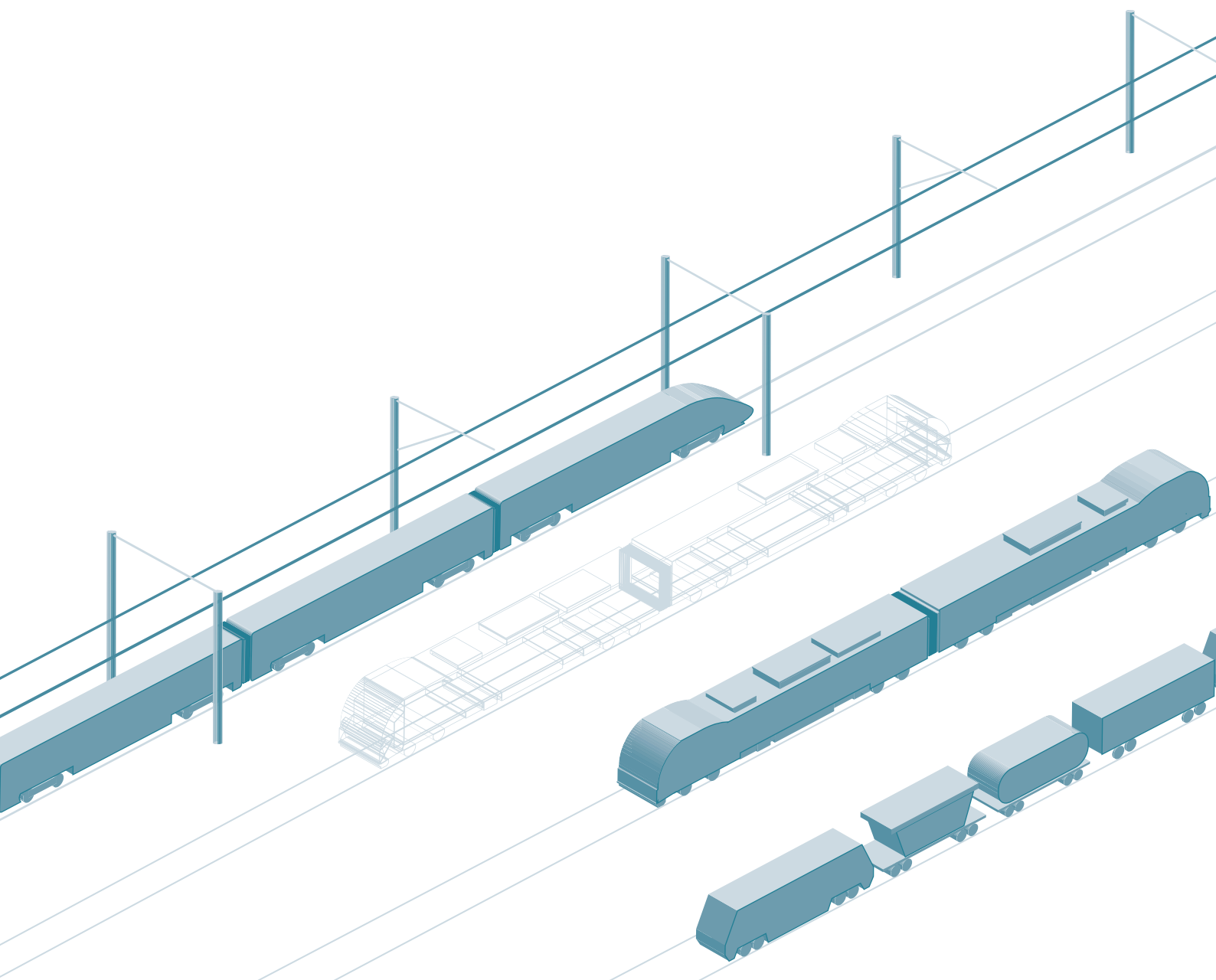
Effects of track and rolling stock interaction on track condition and maintenance

Oleg A. Suslov 362–371

Contents of the Journal for 2024 372–373

УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССАМИ ПЕРЕВОЗОК

TRANSPORTATION PROCESS MANAGEMENT



Оригинальная статья

УДК 656.222.6

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

Оценка эффективности интервального регулирования движения поездов на однопутных направлениях железнодорожной сети

С. А. Бессоненко✉, Е. В. Климова, Н. И. Осипов

Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС)
Новосибирск, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Введение. Значительное развитие систем автоматики и телемеханики, обусловившее многообразие режимов эксплуатации однопутных железнодорожных направлений, вызывает потребность более детального исследования потенциала систем интервального регулирования для повышения эффективности перевозочного процесса. Объектом исследования является перевозочный процесс на однопутном железнодорожном направлении. Предметом исследования является возможность применения систем интервального регулирования движения поездов для наращивания пропускной и провозной способности взамен потребности в строительстве вторых главных путей. Целью исследования является определение диапазона эффективного применения интервального регулирования на однопутных направлениях.

Материалы и методы. Для исследования задействовано многоподходное моделирование, включающее применение процессного подхода для имитации работы дежурного персонала, агентного моделирования для выбора режима движения поезда и системной динамики для тяговых расчетов. С целью оценки экономической эффективности различных вариантов эксплуатации однопутного направления в условиях действия дестабилизирующих факторов применена стратегия игры с «природой». Предложен новый подход к оценке эффективности интервального регулирования через построение сферы равноэкономических решений использования интервального регулирования и строительства вторых главных путей.

Результаты. По результатам прогонов имитационной модели сформированы матрицы показателей и конфигурации, по критериям теории игр выполнена экономическая оценка различных стратегий эксплуатационной работы на однопутном направлении. Наибольшую эффективность в качестве меры по отдалению потребности возведения вторых главных путей продемонстрировала координатная система интервального регулирования «Анаконда». Получена сфера равноэкономических решений целесообразного использования интервального регулирования и строительства вторых главных путей.

Обсуждение и заключение. Предложенный метод выбора наиболее экономически эффективной системы интервального регулирования на однопутном направлении на основе построения сферы равноэкономических решений в сочетании с играми с «природой» может быть использован для рационализации распределения инвестиционных ресурсов железнодорожного транспорта. Сформулированные на основе его применения выводы не противоречат положениям теории транспортных потоков и позволяют снизить степень неопределенности при развитии инфраструктуры однопутных направлений.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: железнодорожная сеть, однопутное направление, интервальное регулирование движения поездов, результирующая пропускная способность, имитационное моделирование, теория игр, технико-экономическая эффективность, сфера равноэкономических решений

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Бессоненко С. А., Климова Е. В., Осипов Н. И. Оценка эффективности интервального регулирования движения поездов на однопутных направлениях железнодорожной сети // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2024. Т. 83, № 4. С. 287–301.



TRANSPORTATION PROCESS MANAGEMENT

Original article

UDK 656.222.6

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



Evaluating train interval control performance on single-track lines of the railway network

Sergey A. Bessonenko✉, Ekaterina V. Klimova, Nikolay I. Osipov

Siberian Transport University,
Novosibirsk, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The significant development of automation and telemechanics systems, which caused a variety of operating modes of single-track lines, requires a more detailed study of the potential of interval control systems for more efficient transport. The object of the study is the transport process on a single-track line. The subject of the study is the potential of train interval control systems to increase throughput and carrying capacity instead of building second main tracks. The study intends to determine an effective performance range of interval control on single-track lines.

Materials and methods. The study involved a multi-approach simulation, including a process approach to simulate the work of on-duty personnel, agent-based simulation for train mode selection and system dynamics for traction calculations. Different operating options for a single-track line under destabilising factors were assessed using the game with Nature strategy. The paper proposes a new approach to assessing interval control through the creation of an equal economic solution sphere of interval control use and construction of second main tracks.

Results. Simulation model runs created matrices of indicators and configurations, and different operational strategies on a single-track line were assessed using game theory criteria. The Anaconda Coordinate Interval Control System has proved to be the most effective way to reduce the need for second main track construction. The paper presents an equal economic solution sphere of feasible use of interval control and construction of second main tracks.

Discussion and conclusion. The proposed method of selecting the most feasible interval control system on a single-track line based on the creation of an equal economic solution sphere in combination with the game with Nature could be used to rationalise the allocation of railway transport investment. The conclusions from its application do not contradict the theory of traffic flows and reduce uncertainty in the development of single-track line infrastructure.

KEYWORDS: railway network, single-track line, train interval control, resulting throughput capacity, simulation modelling, game theory, technical and economic efficiency, equal economic solution sphere

FOR CITATION: Bessonenko S. A., Klimova E. V., Osipov N. I. Evaluating train interval control performance on single-track lines of the railway network. *Russian Railway Science Journal*. 2024;83(4):287-301. (In Russ.).

Введение. Стремительное переориентирование грузопотоков в восточном направлении, произошедшее за последние несколько лет, предопределило функционирование транспортной инфраструктуры Российской Федерации в условиях дефицита пропускных и провозных способностей, в связи с чем необходимы мобилизация резервов и внедрение инноваций, ориентированных на сокращение экстенсивного расширения инфраструктуры благодаря наиболее полной реализации ее потенциала. Одним из перспективных способов повышения пропускной способности железнодорожной сети является сокращение межпоездных интервалов за счет ликвидации избыточного расстояния между поездами, в связи с чем выявлена востребованность исследований по оценке эффективности систем интервального регулирования движения поездов (СИРДП).

Значительный научно-практический интерес при определении целесообразности применения СИРДП представляет анализ устойчивости поездопотока к дестабилизирующим факторам при действии различных систем. Специалистами УрГУПС с применением комплекса ИМЕТРА¹ оценено положительное влияние виртуальной сцепки (ВСЦ) на восстановление движения по участку железной дороги после его перерыва [1]; учеными НИИАС на основе графического метода выполнена оценка пропускной способности участка для различных длин зон и значений ограничения скорости, на основе которой сделан вывод о положительном влиянии на перевозочный процесс использования ВСЦ в сравнении с традиционной автоблокировкой [2]; сотрудниками ДонИЖТ определено допустимое время отсутствия цифровой радиосвязи в СИРДП [3]. Анализ достижений в области оценки эффективности СИРДП показывает, что в детальном исследовании нуждаются как многие другие факторы (например, неравномерность), так и варианты СИРДП, в том числе и координатные системы интервального регулирования (КСИР).

Внедрение СИРДП наиболее целесообразно на двухпутных особогрузонапряженных линиях, эксплуатируемых в условиях острого дефицита пропускной способности [4]. Другим, только набирающим популярность аспектом в отечественных теории и практике является применение СИРДП на однопутных линиях [5]. На данный момент теоретические аспекты анализа целесообразности СИРДП на однопутных линиях значительно проработаны в США. Американскими учеными на основе имитационного моделирования оценена эффективность интервального регулирования

как инструмента по снижению простоя под скрещением пакетов поездов [6], как меры по повышению целесообразности обращения коротких грузовых поездов [7] и определена прямая зависимость эффективности СИРДП от количества двухпутных перегонов [8].

Результаты иностранных исследований, представляя неоспоримый интерес в контексте рассматриваемой проблемы, тем не менее не могут быть интегрированы в отечественную железнодорожную сеть без существенной адаптации ввиду кардинальных отличий как в плане принципов функционирования СИРДП [9], так и резервов инфраструктуры в целом [10]. Кроме того, СИРДП уже достаточно активно внедряются на сети железных дорог ОАО «РЖД», что делает возможным дальнейшее их развитие с учетом опыта реального производства [4].

Отечественные научные работы по оценке целесообразности сокращения межпоездных интервалов на однопутных направлениях на современном этапе связаны с определением положения автоблокировки (без сравнения различных вариантов интервального регулирования) в перечне мероприятий по освоению возрастающих объемов перевозок (между строительством дополнительных разъездов и вторых главных путей) [11]. Известна методика оценки пропускной способности с помощью имитационного моделирования на основе вариантных графиков движения поездов, позволяющая определить потенциал автоблокировки с «фиксированными» блок-участками (АБЦ) в сравнении с полуавтоблокировкой для нейтрализации негативного влияния неравномерности на эксплуатационную работу [12].

Другим направлением является анализ характеристик поездопотока при ликвидации скрещений с переходом к движению без остановок на промежуточных станциях, характерному для двухпутных направлений. Данный переход допустим при наличии ярко выраженной непарности размеров движения (следствием которой является специализация однопутных линий для пропуска поездов одного направления [13]) или при использовании караванного типа графика. Следует отметить, что если первый способ в силу специфики местных условий в отдельных случаях может оказаться целесообразным, то применение второго на постоянной основе окажет негативное влияние на срок доставки грузов и ухудшит показатели использования локомотивного парка, нивелировав эффект от уплотнения поездопотока.

¹ Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015662972 Российская Федерация. Система макро моделирования транспортных узлов и полигонов ИМЕТРА: № 2015619807; заявл. 15.10.2015; опубл. 08.12.2015 / Козлов П.А., Иванов И.В., Пермикин В.Ю.; ООО «Аналитические и управляющие системы на транспорте «Транспортный алгоритм».

	Приrost пропускной способности без сбоев	Аналитические расчеты	Возведение развозных и разгонных путей	Отказы связи	Имитационное моделирование	Интеграция в эксплуатируемую линию	Внедрение дополнительных светофоров в горловинах	Интеграция в проектируемую линию	Техническая реализация	Влияние системы тягового энергоснабжения	Влияние ограничений скорости	Влияние на показатели эксплуатационной работы	Модернизация локомотивного хозяйства	Новые схемы путевого развития станций	Влияние неравномерности перевозок	Влияние сбоев системы интервального регулирования	Сравнение с двухпутной конфигурацией	Восстановление после перерыва в движении	Экономическая эффективность	Охваченность теорией игр
АБТЦ, однопутный полигон			×	×			×													
АБТЦ, двухпутный полигон			×	×			×										×			
ВСЦ, однопутный полигон																				
ВСЦ, двухпутный полигон																	×			
АБТЦ-МШ, однопутный полигон				×																
АБТЦ-МШ, двухпутный полигон				×													×			
КСИР, однопутный полигон																				
КСИР, двухпутный полигон																	×			

Рис. 1. Матрица исследований в области оценки эффективности интервального регулирования движения поездов:

■ — высокая степень изученности; ■ — средняя степень изученности; ■ — низкая степень изученности;  — исследование аспекта не требуется

Fig. 1. Matrix of studies in the field of train interval control performance evaluation:

■ — high degree of research; ■ — medium degree of research; ■ — low degree of research;  — no aspect study is required

Основная часть имеющихся исследований касательно эффективности СИРДП сводится к оценке технической эффективности (рис. 1), тогда как большое значение имеет и экономическая сторона данной проблемы. Решения, позволяющие обеспечить наибольшую пропускную способность (реализующая концепцию «подвижных» блок-участков автоблокировка (АБТЦ-МШ), радиоблокировка), предполагают значительные инвестиции и с большой долей вероятности могут оказаться нецелесообразными при внедрении на однопутных направлениях.

Целью данного исследования является определение экономической границы достаточности применения основных вариантов интервального регулирования на однопутных направлениях в качестве инструмента для устранения потребности в строительстве вторых главных путей.

Материалы и методы. Блок-схема авторского алгоритма оценки эффективности интервального регулирования на однопутном направлении представлена на рис. 2. Для проводимого исследования предложено применение многоподходного моделирования в среде AnyLogic. Подробное описание

авторской методики моделирования эксплуатационной работы однопутного направления при различных вариантах интервального регулирования, уровня инфраструктуры и типа графика движения представлено в работе [5].

Процессный подход задействован для принятия пользователем модели решений по продвижению поездопотока по направлению и имитации логики функционирования технических станций. Во время движения поезда посредством диаграмм состояний для каждого агента-поезда симулируются действия машиниста по выбору режимов ведения, соединение по цифровой связи и работа локомотивной сигнализации. На основе принципов системной динамики с помощью связей между накопителем, параметрами, табличными функциями и переменными методом Эйлера решается основное уравнение движения поезда. Важной особенностью разработанной модели является возможность учета человеческого фактора регулированием фактически реализуемой доли силы тяги, поскольку в процессе движения машинист использует лишь часть мощности локомотива [14], что существенно повышает вероятность «невыдержки»

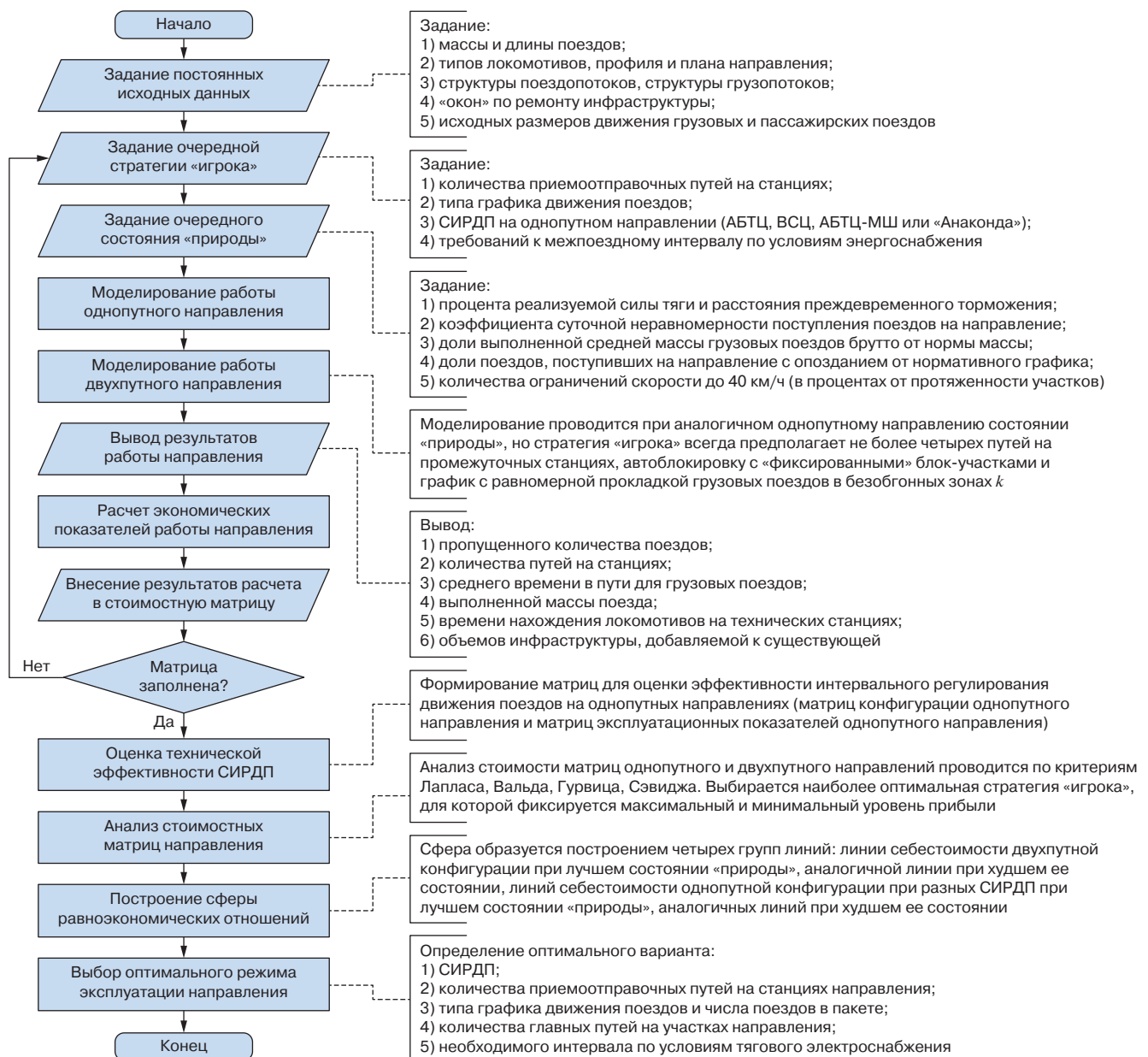


Рис. 2. Блок-схема авторского алгоритма оценки эффективности интервального регулирования движения поездов на однопутном направлении

Fig. 2. Block diagram of the author algorithm for assessing the efficiency of train interval control on a single-track line

оптимального межпоездного интервала. В модели заложены тяговые характеристики основных локомотивов, применяемых на сети. При выявлении в ходе моделирования на участковой станции отсутствия локомотива под готовый к отправлению состав происходит его генерирование и размещение на выходе из депо.

В качестве моделируемого объекта принято одно из однопутных направлений железнодорожной сети,

на котором согласно Стратегии развития железнодорожного транспорта в РФ до 2030 г.² планируется строительство сплошных вторых главных путей. На данном направлении проведена валидация авторской модели. Анализ реальных и моделируемых поездных ситуаций и сопоставление их результатов (количественных и качественных показателей работы направления) позволяют сделать вывод о возможности

² Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года [Электронный ресурс]: утв. распоряжением Правительства РФ от 17 июня 2008 г. № 877-р. URL: <https://mintrans.gov.ru/documents/1/1010> (дата обращения: 23.08.2024).

использования многоподходного моделирования для объективной оценки качества продвижения поездопотоков в условиях различных вариантов конфигурации однопутного направления. Характеристики рассматриваемого однопутного направления приведены в табл. 1.

Значительное сокращение неопределенности при принятии управленческих и инвестиционных решений на железнодорожном транспорте может обеспечить использование теории игр [15] — теории математических моделей принятия решений в условиях конфликта. Например, анализ предложенного в работе [16] алгоритма выбора решений, сокращающих потери поездо-часов, подтверждает актуальность применения теории игр для оптимизации функционирования железнодорожных систем.

Для данного исследования задействованы игры с «природой», при которых сознательно действует один из участников («игрок»), а второй участник («природа») не имеет заинтересованности в исходе игры (табл. 2). Стратегии «игрока» заключаются в изменении инфраструктуры, прогнозных объемов перевозок или графика движения поездов. Важное значение для

применения теории игр с целью оценки эффективности СИРДП имеет наиболее полное описание состояний «природы» через параметры, варьирование которых определяет степень ее агрессивности по отношению к потоку поездов. В то же время для оптимизации количества сочетаний, проанализированных в исследовании, каждый аспект состояния «природы» рассматривается в качестве либо наиболее благоприятного, либо наименее благоприятного с целью формирования верхней и нижней границ технико-экономической эффективности, определение которых является первоочередной задачей при принятии инвестиционных решений.

В данной работе проанализировано влияние на эффективность интервального регулирования ограничений скорости (рис. 3), суточной неравномерности (коэффициент которой на практике может достигать значения 1,3 [17]; аналогичное значение применяется и в теоретических исследованиях [12]) и поступления на направление поездов с отклонением от графика на 30 мин (на величину, являющуюся репрезентативной для анализа эффективности решений по нагону поездами ниток нормативного графика³).

Таблица 1

Характеристики исследуемого направления, принятые при моделировании

Table 1

Characteristics of the line under studying adopted in modelling

Параметр	Базовые значения
Количество участков	2
Протяженность	169 км
Установленная скорость движения	Грузовые поезда: 80 км/ч; Пассажирские поезда: 120 км/ч
Суммарное количество приемоотправочных путей на всех промежуточных (участковых) станциях	34 (10)
Руководящий уклон	9 ‰
Количество кривых	220
Количество промежуточных станций	14
Количество участковых станций	1
Унифицированный межпоездный интервал по условиям энергоснабжения (нечетное направление/четное направление)	10 мин/13 мин
Род тяги	Электровозная (94 км постоянного тока, 61 км переменного тока)
Эксплуатируемая СИРДП	АБТЦ
Серия грузовых локомотивов на участке постоянного тока	2ЭС6
Серия грузовых локомотивов на участке переменного тока	ВЛ80С
Серия пассажирских локомотивов (электropоездов) на участке постоянного тока	ЭП2К (ЭД4)
Серия пассажирских локомотивов (электropоездов) на участке переменного тока	ЭП1 (ЭД9М)
Норма массы и длины грузовых поездов	4000 т, 62 усл. ваг.
Норма массы и длины контейнерных поездов	2500 т, 45 физ. ваг.
Норма массы пассажирских поездов	1100 т брутто
Размеры движения пассажирских (пригородных) поездов	4 пары (5 пар)

³ Бадажков М.А. Повышение эффективности использования графика движения грузовых поездов: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.08. Новосибирск, 2022. 182 с.

Таблица 2

Параметры стратегий «игрока» и состояний «природы»

Table 2

Parameters of Player strategies and states of Nature

Параметр	Принимаемые значения
Стратегии «игрока»	
Система интервального регулирования (для однопутной конфигурации)	АБТЦ; ВСЦ; АБТЦ-МШ; КСИР
Система интервального регулирования (для двухпутной конфигурации)	АБТЦ
Количество главных путей на перегоне	I; II
Прогнозные размеры движения пар грузовых поездов	16; 28; 40
Доля контейнерных поездов от общего количества грузовых поездов	0,25; 0,75
Состояния «природы»	
Доля движения поездопотока при действии ограничений скорости (до 40 км/ч) относительно протяженности направления	0; 0,6
Доля грузовых поездов, поступивших на направление с отклонением от нормативного графика на 30 мин	0; 0,3
Коэффициент суточной неравномерности поступления поездов на направление	1; 1,3
Доля выполненной средней массы грузовых поездов брутто от нормы массы	0,95; 0,7

В исследовании проанализирована эксплуатационная работа однопутного направления в условиях функционирования АБТЦ, ВСЦ пяти поездов, АБТЦ-МШ, КСИР (в виде реализующей концепцию оптоволоконной рефлектометрии системы «Анаконда» [18, 19], которой для аналогичных контрольному режиму рельсовых цепей надежности и гарантии безопасного нахождения нескольких поездов на перегоне надлежит пройти значительное количество исследований, проработок конструкторских решений и испытаний). Основным результатом проведения суточных прогонов является система матриц показателей и конфигурации однопутного направления (рис. 4). Экономический эффект от эксплуатации направления определяется на основе выполненного грузооборота с учетом маршрутной скорости грузовых поездов; расходы на развитие направления определяются инвестициями в строительство дополнительной путевой инфраструктуры, обустройство контактной сети, СИРДП, микропроцессорную централизацию, модернизацию локомотивного хозяйства; для оценки эксплуатационных расходов задействован метод расходных ставок.

Для сравнения двух вариантов оснащения инфраструктуры железнодорожного направления применяется метод определения зон равноэкономических решений, при котором до достижения определенного критического предела грузонапряженности экономически целесообразным является менее капиталоемкий вариант оснащения направления, а после достижения — более капиталоемкий. Например, известно исследование, в котором применение данного метода позволило разграничить зоны целесообразности тепловозной и электровозной тяги [20].

Результаты исследования. Значения выполненных размеров движения грузовых поездов за сутки

(рис. 5), годового грузооборота (рис. 6), маршрутной скорости (рис. 7), числа дополнительных приемо-отправочных путей (длиной 1050 м) на промежуточных и участковой станциях (рис. 8) и потребного количества локомотивов (рис. 9) отражают различия в характеристиках поездопотока при различных сочетаниях стратегий «игрока» и состояний «природы». Общим трендом для каждого показателя является эффективность более прогрессивной СИРДП при более слабом влиянии негативных аспектов и уравнивание до традиционных систем при сильном их влиянии.

При малой интенсивности негативных факторов и для однопутной и для двухпутной конфигураций возможно овладение размерами движения в 52 пары грузовых поездов; при повышении интенсивности данных факторов (главным образом в условиях действия ограничения скоростного режима) для однопутной конфигурации пропуск данных размеров движения в полном объеме в течение моделируемых суток

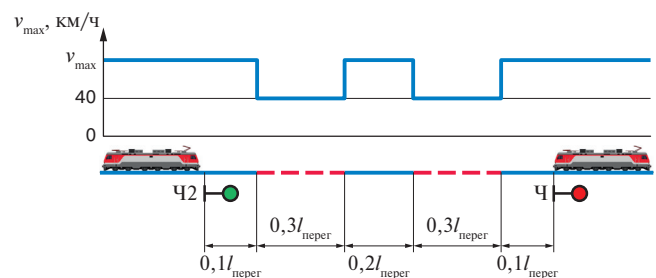


Рис. 3. Расположение зон действия ограничений скорости на перегонах:

 $l_{\text{перег}}$ — протяженность перегона, км

Fig. 3. Location of speed limit zones on space intervals:

 $l_{\text{перег}}$ — length of space interval, km

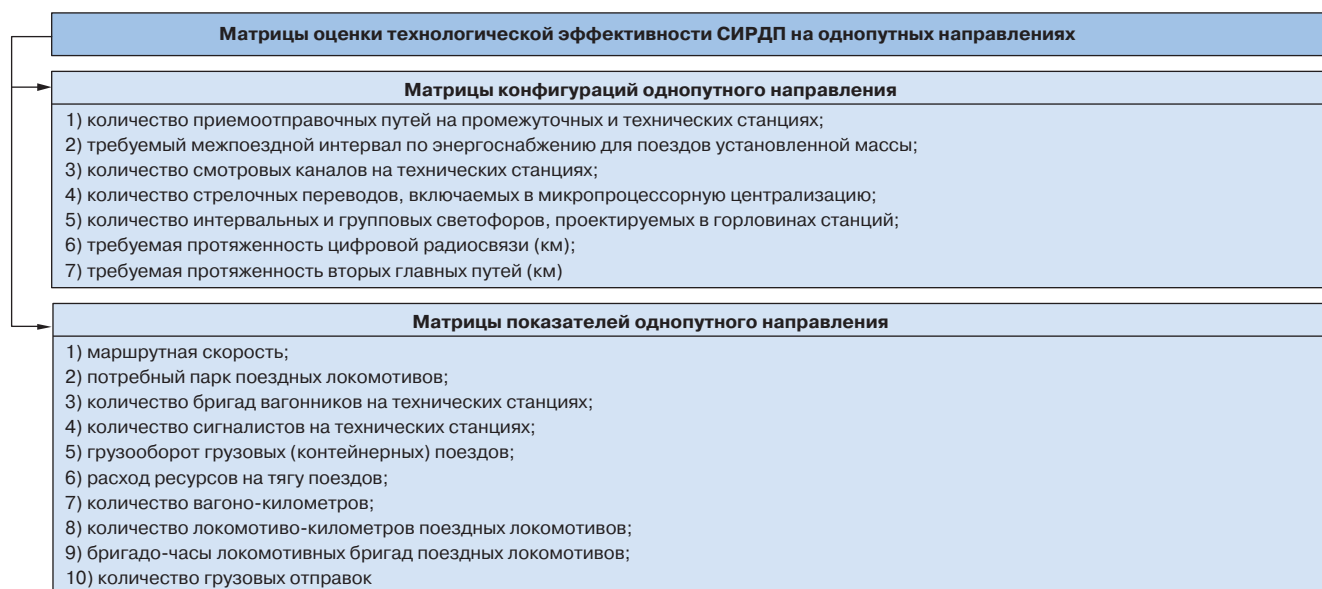


Рис. 4. Схема совокупности матриц для оценки эффективности интервального регулирования движения поездов на однопутных направлениях

Fig. 4. Schematic diagram of the matrix set for evaluating the efficiency of train interval control on single-track lines

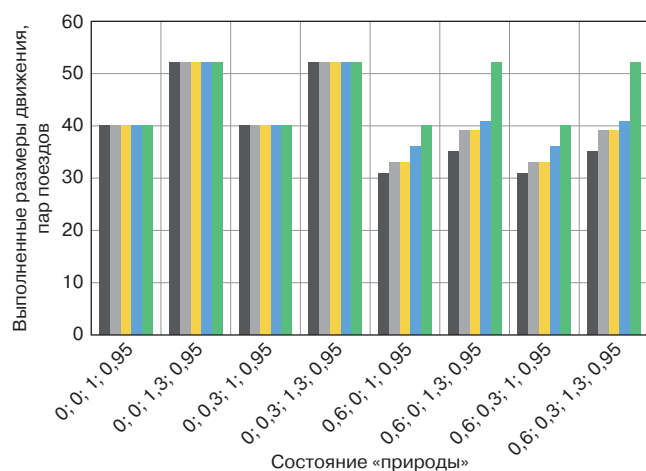


Рис. 5. Выполненные размеры движения грузовых поездов за сутки при различных сочетаниях стратегий «игрока» и состояний «природы»: ■ — АБТЦ (I; 40; 0,25); ■ — ВСЦ (I; 40; 0,25); ■ — АБТЦ-МШ (I; 40; 0,25); ■ — КСИР (I; 40; 0,25); ■ — АБТЦ (II; 40; 0,25); ВСЦ (I; 40; 0,25) — стратегия «игрока», предполагающая применение ВСЦ при однопутной (I) конфигурации направления, 40 парам грузовых поездов, 0,25 из которых являются контейнерными; 0,6; 0,3; 1,3; 0,95 — состояние «природы» при котором ограничения скорости охвачено 0,6 протяженности направления, доля поступивших с опозданием поездов составляет 0,3, коэффициент суточной неравномерности равен 1,3, масса брутто грузового поезда составляет 0,95 от нормы

Fig. 5. Executed dimensions of goods train movements per day under different combinations of Player strategies and states of Nature: ■ — FB (I; 40; 0,25); ■ — VC (I; 40; 0,25); ■ — MB (I; 40; 0,25); ■ — CSIR (I; 40; 0,25); ■ — FB (II; 40; 0,25); FB — automatic blocking with fixed blocks; VC — virtual coupling; MB — automatic blocking with moving blocks; CSIR — coordinate system of interval regulation; VC (I; 40; 0,25) — Players strategy assuming application of VC with single-track (I) configuration of the line, 40 pairs of goods trains, 0,25 of which are container trains; 0,6; 0,3; 1,3; 0,95 — state of Nature in which speed restrictions cover 0,6 of the line length, the share of trains arriving late is 0,3, the coefficient of daily irregularity is 1,3, the gross weight of goods train is 0,95 of the norm

оказался невозможен. При этом более совершенная СИРДП для однопутной конфигурации позволяет обеспечить пропуск поездопотоков при незначительном влиянии негативных факторов с большей скоростью (на 36 % относительно классической автоблокировки), в то же время уступая по данному показателю двухпутной конфигурации (скорость ниже на 54 %). Снижение скорости продвижения поездопотока вызывает рост потребного количества поездных локомотивов.

За счет сокращения простоев под скрещением на направлении при более совершенной СИРДП требуется меньшее количество приемоотправочных путей на промежуточных станциях (на 24 % меньше в сравнении с классической автоблокировкой). При этом имеет место снижение количества конфликтных ситуаций между транзитным поездопотоком и местными грузовыми и пассажирскими поездами. При двухпутной конфигурации вследствие движения грузовых поездов в безостановочных зонах для овладения повышенными размерами движения приемоотправочные пути необходимо добавлять только на технических станциях.

Среди рассмотренных дестабилизирующих факторов наиболее негативным влиянием обладают ограничения скорости. При двухпутной конфигурации направления данный фактор резко снижает маршрутную скорость, а при однопутной, помимо замедления поездопотока, является причиной недостаточности пропускной способности, ведущей к увеличению потребности в приемоотправочных путях для размещения «избыточных» поездов.

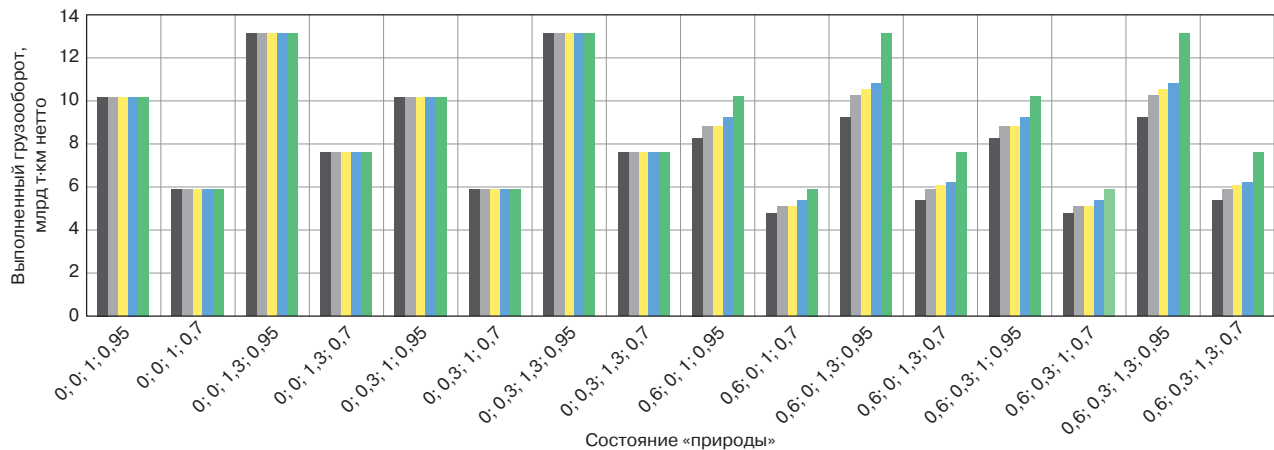


Рис. 6. Выполненный годовой грузооборот при различных сочетаниях стратегий «игрока» и состояний «природы»:

■ — АБТЦ (I; 40; 0,25); ■ — ВСЦ (I; 40; 0,25); ■ — АБТЦ-МШ (I; 40; 0,25); ■ — КСИР (I; 40; 0,25); ■ — АБТЦ (II; 40; 0,25)

Fig. 6. Performed annual cargo turnover under different combinations of Player strategies and states of Nature:

■ — FB (I; 40; 0.25); ■ — VC (I; 40; 0.25); ■ — MB (I; 40; 0.25); ■ — CSIR (I; 40; 0.25); ■ — FB (II; 40; 0.25)

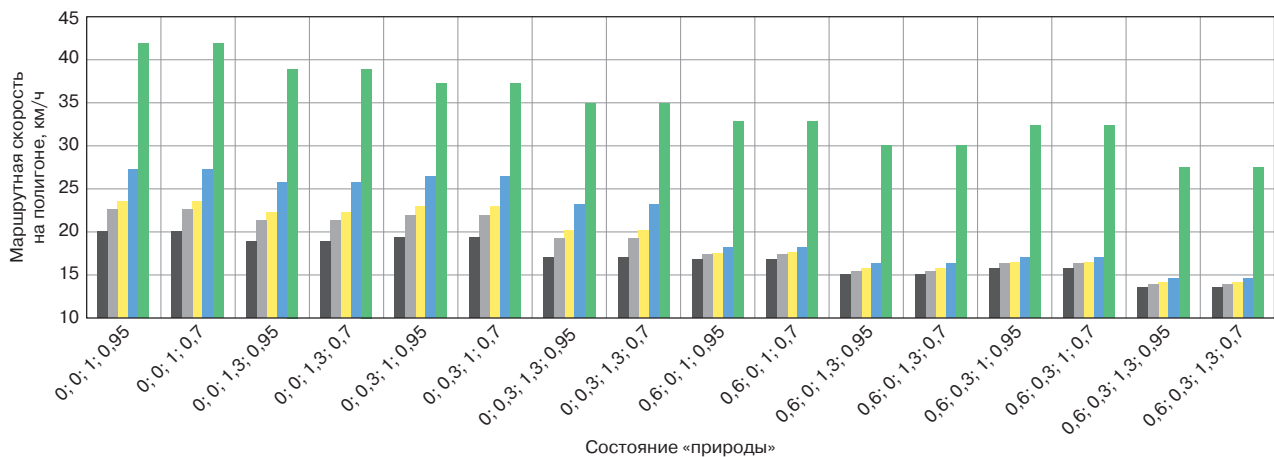


Рис. 7. Маршрутная скорость при различных сочетаниях стратегий «игрока» и состояний «природы»:

■ — АБТЦ (I; 40; 0,25); ■ — ВСЦ (I; 40; 0,25); ■ — АБТЦ-МШ (I; 40; 0,25); ■ — КСИР (I; 40; 0,25); ■ — АБТЦ (II; 40; 0,25)

Fig. 7. Routing speed under different combinations of Player strategies and states of Nature:

■ — FB (I; 40; 0.25); ■ — VC (I; 40; 0.25); ■ — MB (I; 40; 0.25); ■ — CSIR (I; 40; 0.25); ■ — FB (II; 40; 0.25)

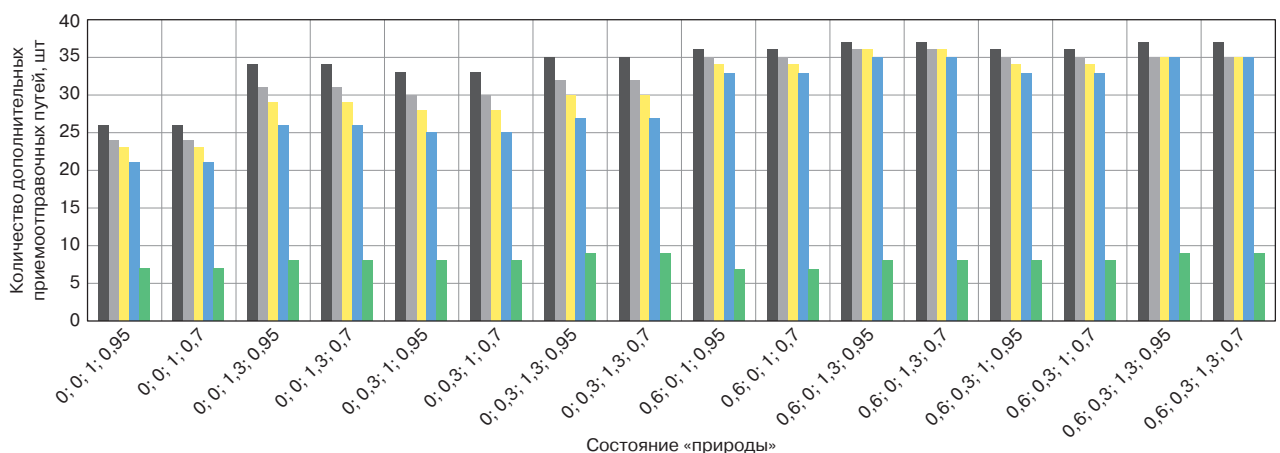


Рис. 8. Требуемое суммарное количество дополнительных приемоотправочных путей на всех станциях при различных сочетаниях стратегий «игрока» и состояний «природы»:

■ — АБТЦ (I; 40; 0,25); ■ — ВСЦ (I; 40; 0,25); ■ — АБТЦ-МШ (I; 40; 0,25); ■ — КСИР (I; 40; 0,25); ■ — АБТЦ (II; 40; 0,25)

Fig. 8. Required total number of additional arrival and departure tracks on all stations for different combinations of Player strategies and states of Nature:

■ — FB (I; 40; 0.25); ■ — VC (I; 40; 0.25); ■ — MB (I; 40; 0.25); ■ — CSIR (I; 40; 0.25); ■ — FB (II; 40; 0.25)

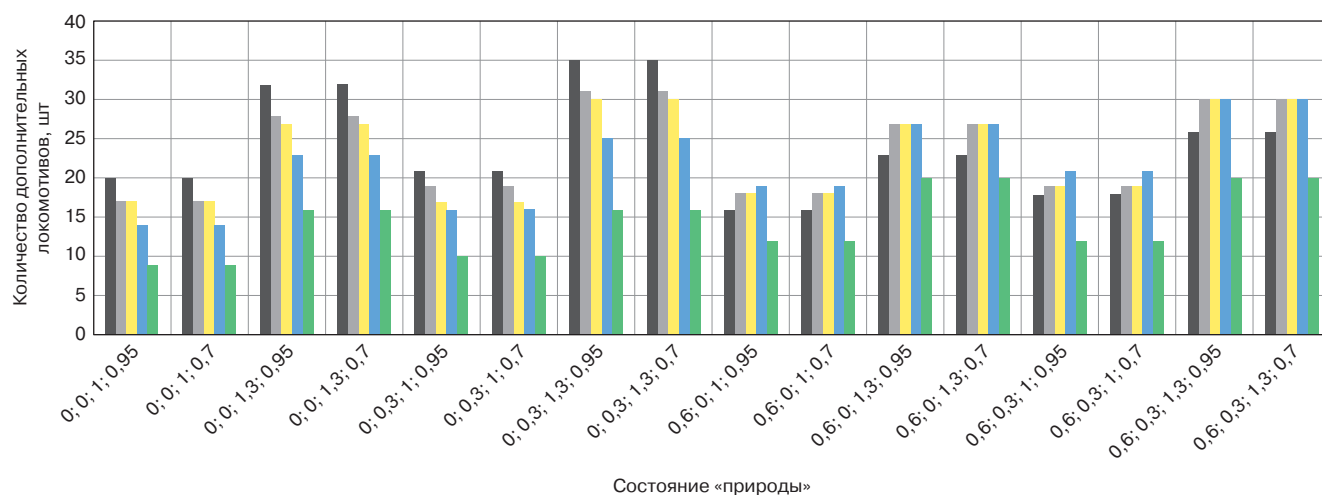


Рис. 9. Требуемое количество локомотивов при различных сочетаниях стратегий «игрока» и состояний «природы»:

■ — АБТЦ (I; 40; 0,25); ■ — ВСЦ (I; 40; 0,25); ■ — АБТЦ-МШ (I; 40; 0,25); ■ — КСИР (I; 40; 0,25); ■ — АБТЦ (II; 40; 0,25)

Fig. 9. Required number of locomotives for different combinations of Player strategies and states of Nature:

■ — FB (I; 40; 0.25); ■ — VC (I; 40; 0.25); ■ — MB (I; 40; 0.25); ■ — CSIR (I; 40; 0.25); ■ — FB (II; 40; 0.25)

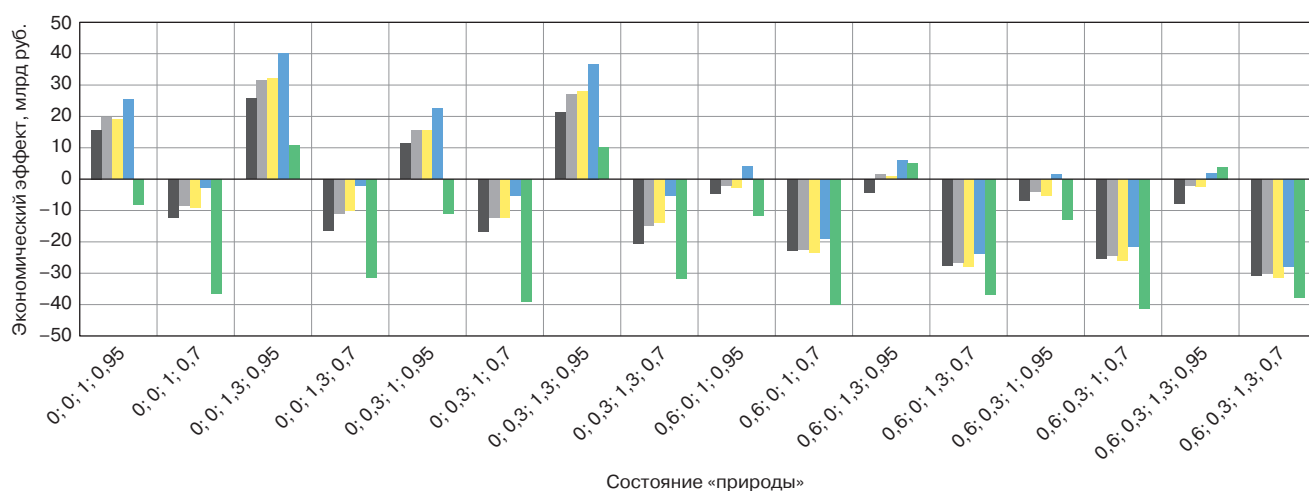


Рис. 10. Экономический эффект за 15 лет эксплуатации при различных сочетаниях стратегий «игрока» и состояний «природы»:

■ — АБТЦ (I; 40; 0,25); ■ — ВСЦ (I; 40; 0,25); ■ — АБТЦ-МШ (I; 40; 0,25); ■ — КСИР (I; 40; 0,25); ■ — АБТЦ (II; 40; 0,25)

Fig. 10. Economic effect over 15 years of operation under different combinations of Player strategies and states of Nature:

■ — FB (I; 40; 0.25); ■ — VC (I; 40; 0.25); ■ — MB (I; 40; 0.25); ■ — CSIR (I; 40; 0.25); ■ — FB (II; 40; 0.25)

Наибольший прирост технологической эффективности между сценариями обеспечивают переходы от АБТЦ к ВСЦ и от АБТЦ-МШ к КСИР. При размерах движения до 52 пар поездов наибольший экономический эффект демонстрирует КСИР, при благоприятных состояниях «природы» максимизируя прибыль (см. рис. 10), а при неблагоприятных — минимизируя потери, что подкреплено оценкой основных критериев игр с «природой» (табл. 3).

Рост потребного количества поездных локомотивов, коррелирующий со снижением маршрутной скорости поездопотока, вместе с потребностью возведения приемоотправочных путей на разъездах для скрещения

пакетов поездов и усиления системы тягового энергоснабжения (посредством увеличения сечения контактной сети на участке постоянного тока и строительства новой тяговой подстанции на участке переменного тока) являются основными источниками расходов при повышении размеров движения на однопутном направлении (рис. 11). При этом в расходах, отраженных на рис. 11, учтены инвестиции в инфраструктуру направления и годовые эксплуатационные расходы за 15 лет эксплуатации.

При размерах движения до 52 пар грузовых поездов на данном направлении оптимальной является однопутная конфигурация в сочетании с применением

Таблица 3

Выбор оптимальной стратегии «игрока» на основе различных критериев

Table 3

Selection of the optimal Player strategy based on various criteria

Критерий	Описание критерия	Оптимальная стратегия	Экономический эффект от применения стратегии, млрд руб.
Лапласа	Поиск максимума математического ожидания выигрыша	КСИР (I, 40; 0,75)	23,9
Вальда	Поиск максимума гарантированного выигрыша	КСИР (I, 28; 0,75)	–2,2
Гурвица	Поиск максимума выигрыша при различном уровне оптимизма	При уровне оптимизма до 0,1: КСИР (I, 28; 0,75)	От –2,2 до 1,3
		При уровне оптимизма от 0,1: КСИР (I, 40; 0,75)	От 5,8 до 66,3
Сэвиджа	Поиск минимума риска	КСИР (I, 40; 0,75)	7,4

Примечание. КСИР (I, 40; 0,75) — стратегия, предполагающая координатное регулирование при однопутной (I) конфигурации, 40 парам грузовых поездов, 0,75 из которых составляют контейнерные поезда.

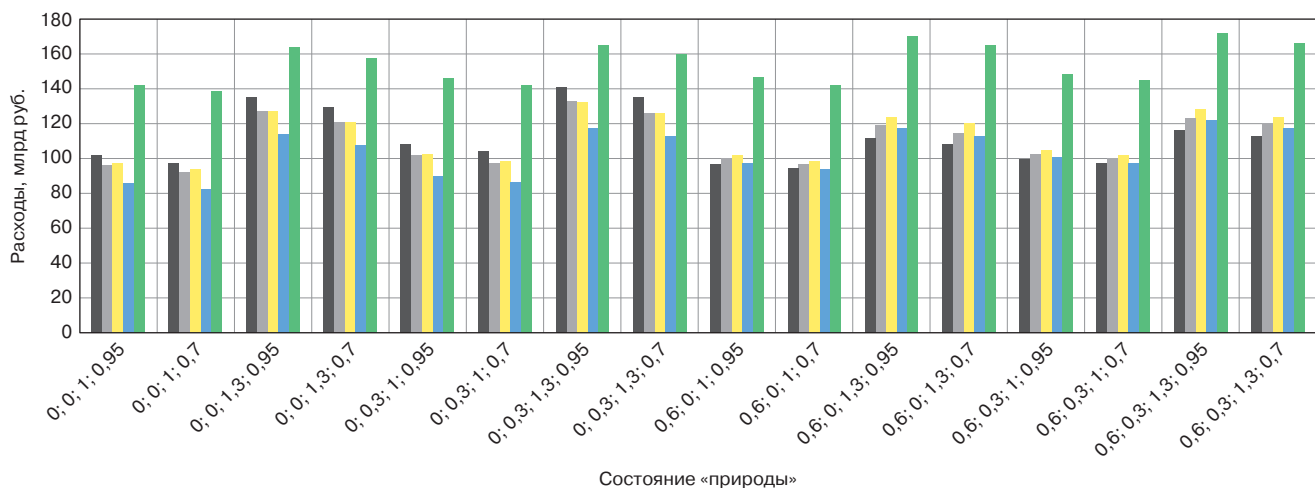


Рис. 11. Расходы за 15 лет эксплуатации при различных сочетаниях стратегий «игрока» и состояний «природы»: ■ — АБТЦ (I; 40; 0,25); ■ — ВСЦ (I; 40; 0,25); ■ — АБТЦ-МШ (I; 40; 0,25); ■ — КСИР (I; 40; 0,25); ■ — АБТЦ (II; 40; 0,25)

Fig. 11. Costs over 15 years of operation under different combinations of Player strategies and states of Nature: ■ — FB (I; 40; 0,25); ■ — VC (I; 40; 0,25); ■ — MB (I; 40; 0,25); ■ — CSIR (I; 40; 0,25); ■ — FB (II; 40; 0,25)

системы «Анаконда», способной в условиях отсутствия негативных факторов обеспечить снижение себестоимости в сравнении с традиционной СИРДП при однопутной конфигурации на 20 %, при двухпутной конфигурации на 55 % (рис. 12).

В соответствии с изменением себестоимости перевозок для однопутной и двухпутной конфигураций направления в условиях роста грузооборота (см. рис. 13) при размерах движения, равных 36 парам поездов, происходит пересечение значений себестоимости перевозок для двухпутной конфигурации в условиях лучшего состояния «природы» и однопутной конфигурации в условиях ее худшего состояния. При больших

размерах движения предельные паспортные значения результирующей пропускной способности направления в условиях однопутной конфигурации окажутся превышены, что повлечет резкий рост себестоимости перевозок как при лучшем, так и при худшем состоянии «природы». В то же время для двухпутной конфигурации при аналогичных размерах движения (вплоть до более значительного количества поездов) продолжится постепенное снижение себестоимости перевозок. При этом себестоимость, отраженная на рис. 12 и 13, учитывает инвестиции в инфраструктуру направления и годовые эксплуатационные расходы за 15 лет эксплуатации.

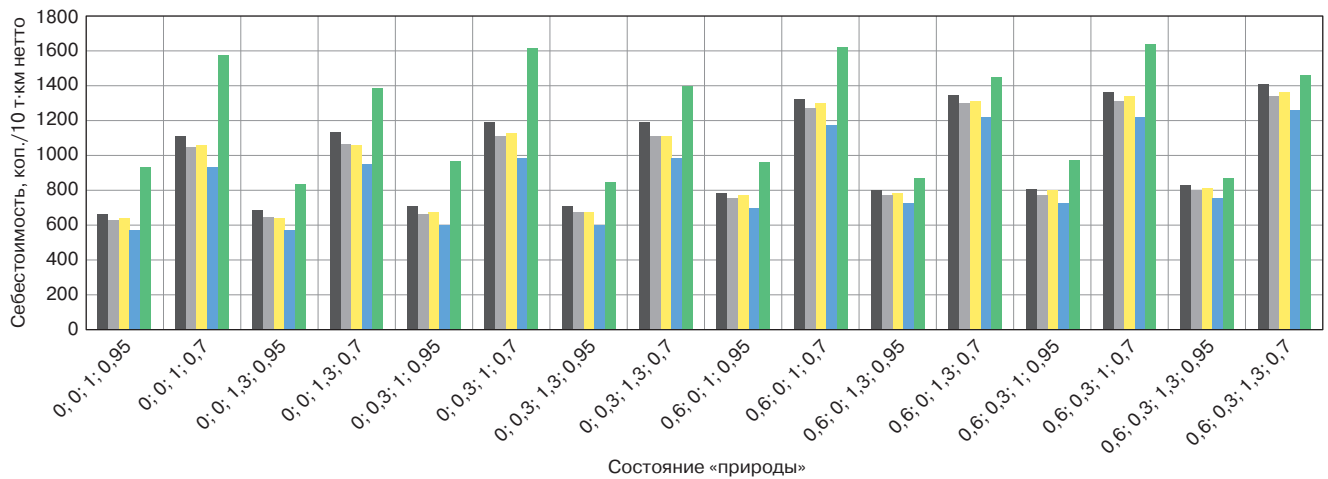


Рис. 12. Себестоимость эксплуатации (с учетом инвестиций) рассмотренного направления в течение 15 лет при различных сочетаниях стратегий «игрока» и состояний «природы»:

■ — АБТЦ (I; 40; 0,25); ■ — ВСЦ (I; 40; 0,25); ■ — АБТЦ-МШ (I; 40; 0,25); ■ — КСИР (I; 40; 0,25); ■ — АБТЦ (II; 40; 0,25)

Fig. 12. Cost of operation (including investment) of the considered line for 15 years under different combinations of Player strategies and states of Nature:

■ — FB (I; 40; 0,25); ■ — VC (I; 40; 0,25); ■ — MB (I; 40; 0,25); ■ — CSIR (I; 40; 0,25); ■ — FB (II; 40; 0,25)

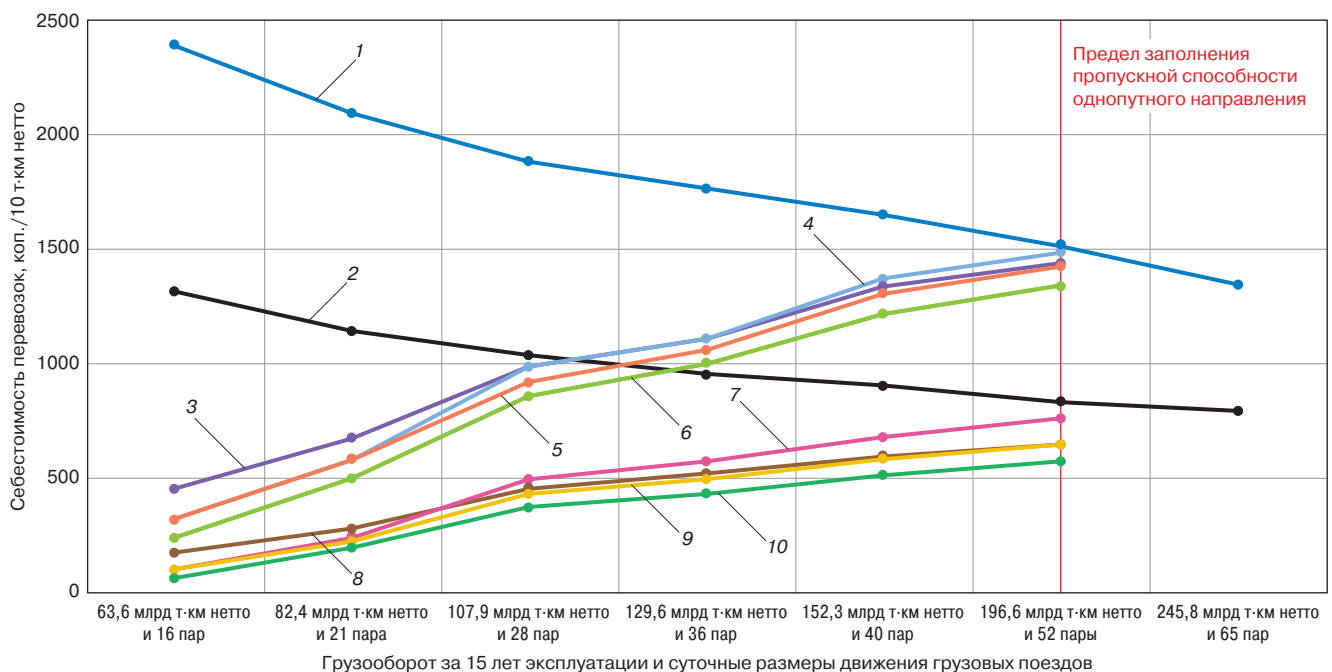


Рис. 13. Сравнение себестоимости перевозок для однопутной и двухпутной конфигураций направления в условиях увеличения размеров движения при лучшем состоянии «природы» (ЛСП) и худшем состоянии «природы» (ХСП):

1 — АБТЦ (II; ХСП); 2 — АБТЦ (II; ЛСП); 3 — АБТЦ-МШ (I; ХСП); 4 — АБТЦ (I; ХСП); 5 — ВСЦ (I; ХСП); 6 — КСИР (I; ХСП); 7 — АБТЦ (I; ЛСП); 8 — АБТЦ-МШ (I; ЛСП); 9 — ВСЦ (I; ЛСП); 10 — КСИР (I; ЛСП); ВСЦ (I; ХСП) — стратегия «игрока», предполагающая применение ВСЦ при однопутной (I) конфигурации направления и худшем состоянии «природы»

Fig. 13. Comparison of transport costs for single-track and double-track line configurations in conditions of increasing traffic sizes under the best state of Nature (BSN) and worst state of Nature (WSN):

1 — FB (II; WSN); 2 — FB (II; BSN); 3 — MB (I; WSN); 4 — FB (I; WSN); 5 — VC (I; WSN); 6 — CSIR (I; WSN); 7 — FB (I; BSN); 8 — MB (I; BSN); 9 — VC (I; BSN); 10 — CSIR (I; BSN); VC (I; WSN) — Player strategy assuming application of VC with single-track (I) configuration of the line and worst state of Nature

Обсуждение и заключение. Применение интервального регулирования на однопутных направлениях способно обеспечить повышение качества перевозочного

процесса, при этом важным условием наиболее полной реализации его потенциала является необходимость повышения технологической дисциплины. Ключевым

		Низкая интенсивность дестабилизирующих факторов		Высокая интенсивность дестабилизирующих факторов	
		Эффективность в качестве «уплотнителя» поездопотока	Эффективность в качестве «ускорителя» поездопотока	Влияние на пропускную способность в качестве «буфера»	Влияние на скорость потока поездов в качестве «буфера»
Низкие размеры движения	СИРДП, один путь	Минимальная эффективность	Минимальная эффективность	Наибольшая минимизация потерь	Частичная минимизация потерь
	Два пути	Минимальная эффективность	Минимальная эффективность	Наибольшая минимизация потерь	Наибольшая минимизация потерь
Высокие размеры движения	СИРДП, один путь	До избыточных размеров движения — значительная	Относительно значительная эффективность	Значительная минимизация потерь	Частичная минимизация потерь
	Два пути	Максимальная эффективность	Максимальная эффективность	Наибольшая минимизация потерь	Наибольшая минимизация потерь

Рис. 14. Матрица сравнительной эффективности однопутной конфигурации при действии перспективных систем интервального регулирования и двухпутной конфигурации

Fig. 14. Matrix of comparative efficiency of single-track configuration under the action of perspective systems of train interval control and double-track configuration

аспектом анализа целесообразности СИРДП при отклонениях в поездной работе является имитационное моделирование. Предлагаемый метод моделирования делает возможным достижение синергии процессного моделирования, агентной парадигмы и системной динамики. Объединение результатов моделирования в матрицы показателей и конфигурации обеспечивает наглядность сравнения различных поездных ситуаций.

При двухпутной конфигурации направления негативные факторы снижают маршрутную скорость, а при однопутной обуславливают и дефицит пропускной способности, ведущий к увеличению объема потребной инфраструктуры. Улучшение показателей и снижение потребностей в инфраструктуре обеспечивают переходы от АБТЦ к ВСЦ и от АБТЦ-МШ к КСИР. Благодаря возможности обеспечения минимального интервала между поездами в пакете и сопоставимым с другими СИРДП капитальным вложениям до достижения предельного коэффициента заполнения результирующей пропускной способности однопутного направления наибольшую технико-экономическую эффективность демонстрирует КСИР.

До определенных размеров движения СИРДП могут являться эффективным инструментом интенсификации эксплуатационной работы однопутного направления (рис. 14), позволяющим сократить увеличение его инфраструктуры. Проведенное исследование позволило обеспечить наглядное сравнение каждой из систем, его инструментарий может быть использован для других направлений в условиях более широкого спектра решений (полуавтоматической

блокировки при счетчиках осей и автоматических блок-постах, частичного внедрения двухпутных перегонов и вставок и др.).

В работе рассмотрено влияние дестабилизирующих факторов (как каждого в отдельности, так и их совокупности). Достоинство предлагаемой методики заключается в существенном сокращении неопределенности касательно оценки эффективности СИРДП. При этом формирование матриц является достаточно трудоемким процессом, в связи с чем требуется выделение приоритетных сочетаний, на основе которых будут формироваться границы эффективности различных стратегий эксплуатации однопутного направления.

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. Бушуев С. В., Ковалев И. А. Восстановление движения после отказов с применением виртуальной сцепки поездов // Автоматика на транспорте. 2024. Т. 10, № 1. С. 64–73. <https://doi.org/10.20295/2412-9186-2024-10-01-64-73>.
- Bushuev S. V., Kovalev I. A. Restoration of traffic after failures using a virtual train coupling. *Automation on transport*. 2024;10(1):64-73. (In Russ.). <https://doi.org/10.20295/2412-9186-2024-10-01-64-73>.
2. Сравнительная оценка параметров движения поездов для различных вариантов виртуальной сцепки / Е. Н. Розенберг [и др.] // Мир транспорта. 2023. Т. 21, № 4. С. 30–39. <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-4-4>.
- Rozenberg E. N., Ozerov A. V., Kusnetsov V. I., Tikhonov S. S. Comparison of Train Traffic Parameters for Various Virtual Coupling Use Cases. *World of Transport and Transportation*. 2023;21(4):30-39. (In Russ.). <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-4-4>.
3. Чепцов М. Н., Сорокин В. Е. Расчет максимального времени отсутствия радиосвязи в системах интервального регулирования движения поездов на базе цифрового радиоканала // Известия Транссиба. 2020. № 4(44). С. 127–134. EDN: <https://elibrary.ru/hovrhl>.
- Cheptsov M. N., Sorokin V. E. Calculation of the maximum admissible time of radio communication absence in the systems of interval regulation of train traffic on the basis of a digital radio channel. *Journal of Transsib Railway Studies*. 2020;(4):127-134. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/hovrhl>.
4. Бессоненко С. А., Климова Е. В., Осипов Н. И. Оценка эффективности интервального регулирования движения поездов // Транспорт Урала. 2023. № 3(78). С. 35–45. <https://doi.org/10.20291/1815-9400-2023-3-35-45>.
- Bessonenko S. A., Klimova E. V., Osipov N. I. Evaluating the efficiency of interval train control. *Transport of the Urals*. 2023;(3):35-45. (In Russ.). <https://doi.org/10.20291/1815-9400-2023-3-35-45>.
5. Бессоненко С. А., Осипов Н. И., Медведев В. И. Оценка эффективности интервального регулирования движения поездов как альтернативы сооружению вторых главных путей // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2023. № 4(67). С. 21–29. https://doi.org/10.52170/1815-9265_2023_67_21.
- Bessonenko S. A., Osipov N. I., Medvedev V. I. Evaluating the effectiveness of interval train control as an alternative to the constructing second main tracks. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2023;(4):21-29. (In Russ.). https://doi.org/10.52170/1815-9265_2023_67_21.
6. Diaz de Rivera A., Dick C. T., Evans L. E. Improving Railway Operational Efficiency with Moving Blocks, Train Fleeting, and Alternative Single-Track Configurations. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 2020;2674(2):146-157. <https://doi.org/10.1177/0361198120905842>.
7. Diaz de Rivera A., Dick C. T., Parkes M. M. Balancing the Service Benefits and Mainline Delay Disbenefits of Operating Shorter Freight Trains. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 2021;2675(10):303-316. <https://doi.org/10.1177/03611981211011484>.
8. Dick C. T., Mussanov D., Evans L. E., Roscoe G. S., Chan T. Y. Relative Capacity and Performance of Fixed and Moving Block Control Systems on North American Freight Railway Lines and Shared Passenger Corridors. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 2019;2673(5):250-261. <https://doi.org/10.1177/0361198119841852>.
9. Батулин А. П., Осипов А. П. Современные системы интервального регулирования движения поездов железных дорог мира // Мир транспорта. 2023. Т. 21, № 2(105). С. 18–26. <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-2-2>.
- Baturin A. P., Osipov A. P. Modern Systems of Train Traffic Interval Control on World Railways. *World of Transport and Transportation*. 2023;21(2):18-26. (In Russ.). <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-2-2>.
10. Черняк А. Р., Карасев С. В. Разработка структуры модели специализированной грузовой железнодорожной линии с группировкой функциональных задач // Транспорт: наука, техника, управление: научный информационный сборник. 2024. № 2. С. 24–34. <https://doi.org/10.36535/0236-1914-2024-02-4>.
- Chernyak A. R., Karasev S. V. Development the model structure of a specialized freight railway line with grouping of functional tasks. *Transport: science, equipment, management. Scientific Information Collection*. 2024;(2):24-34. (In Russ.). <https://doi.org/10.36535/0236-1914-2024-02-4>.
11. Методика увеличения пропускной способности линии при росте объема перевозок / Г. М. Грошев [и др.] // Транспорт Российской Федерации. 2019. № 5(84). С. 26–29. EDN: <https://elibrary.ru/hfiemx>.
- Groshev G. M., Sugorovskiy A. V., Grachev A. A., Al'-Shumari A. S., Abdullaev Z. Ya. A method for increasing line throughput capacity in the instance of traffic volume increase. *Transport of the Russian Federation*. 2019;(5):26-29. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/hfiemx>.
12. Корниенко Н. В., Мехедов М. И. Выбор системы интервального регулирования движения поездов в условиях возрастающих потребностей освоения прогнозируемых объемов перевозок // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2022. Т. 81, № 1. С. 63–70. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2022-81-1-63-70>.
- Kornienko N. V., Mekhedov M. I. Choice of the interval traffic control system in terms of increasing demands for the coverage of forecast traffic volumes. *Russian Railway Science Journal*. 2022;81(1):63-70. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2022-81-1-63-70>.
13. Левин Д. Ю. Расчет и оценка эффективности использования перевозочных возможностей железных дорог // Наука и технологии железных дорог. 2023. Т. 7, № 3(27). С. 8–17. EDN: <https://elibrary.ru/wxtmrc>.
- Levin D. Yu. Calculation and evaluation of the effectiveness of the use of transportation capabilities of railways. *Nauka i tekhnologii zheleznnykh dorog*. 2023;7(3):8-17. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/wxtmrc>.
14. Бушуев С. В., Голочалов Н. С. Моделирование движения поезда на основе применения статистических данных // Инновационный транспорт. 2024. № 1(51). С. 52–57. <https://doi.org/10.20291/2311-164X-2024-1-52-57>.
- Bushuev S. V., Golochalov N. S. Train movement simulation based on the application of statistical data. *Innotrans Journal*. 2024;(1):52-57. (In Russ.). <https://doi.org/10.20291/2311-164X-2024-1-52-57>.
15. Осипов Н. И. Теоретико-игровой подход при выборе оптимальной системы интервального регулирования движения поездов на однопутных железнодорожных линиях // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2024. № 2(69). С. 80–88. https://doi.org/10.52170/1815-9265_2024_69_80.
- Osipov N. I. Game-theoretic approach to selecting the optimal system of train traffic interval regulation on single-track railway lines. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2024;(2):80-88. (In Russ.). https://doi.org/10.52170/1815-9265_2024_69_80.
16. Об использовании теории игр при оптимизации процесса технической эксплуатации систем железнодорожной автоматики и телемеханики / А. В. Горелик [и др.] // Наука и техника транспорта. 2023. № 1. С. 19–28. EDN: <https://elibrary.ru/queekif>.
- Gorelik A. V., Istomin A. V., Kuzmina E. V., Malykh A. N. On game theory application in optimizing technical operation process of railway automation and telemechanics systems. *Nauka i tehnika transporta*. 2023;(1):19-28. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/queekif>.
17. Сотников Е. А., Шенфельд К. П. Неравномерность грузовых перевозок в современных условиях и ее влияние на требуемую пропускную способность участков // Вестник Научно-исследовательского

института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2011. № 5. С. 3–9. EDN: <https://elibrary.ru/ojiryh>.

Sotnikov E. A., Shenfeld K. P. Irregularity of freight transportation under contemporary conditions and its influence on required traffic capacity of line sections. *Russian Railway Science Journal*. 2011;(5):3-9. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/ojiryh>.

18. Белоголов Ю. И., Гозбенко В. Е. Моделирование поездо-потоков на участке Усть-Илимск — Хребтовая с целью увеличения пропускной способности // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2022. № 4 (63). С. 28–35. https://doi.org/10.52170/1815-9265_2022_63_28.

Belogolov Yu. I., Gozbenko V. E. Simulation of train flows on the section Ust-Ilimsk — Khrebtovaya to increase throughput. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2022;(4):28-35. (In Russ.). https://doi.org/10.52170/1815-9265_2022_63_28.

19. Розенберг Е. Н., Коровин А. С. Глобальные тренды развития интеллектуальных транспортных систем // Автоматика, связь, информатика. 2018. № 12. С. 14–19. EDN: <https://elibrary.ru/vtdxbv>.

Rosenberg E. N., Korovin A. S. Global development trends of intellectual transport systems. *Automation, Communications, Informatics*. 2018;(12):14-19. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/vtdxbv>.

20. Негрей В. Я., Масловская М. А. Сфера равноэкономических решений целесообразного использования тепловозной и электрической тяги на Белорусской железной дороге // Вестник Белорусского государственного университета транспорта: наука и транспорт. 2018. № 2 (37). С. 82–84. EDN: <https://elibrary.ru/ywiilr>.

Negrey V. Ya., Maslovskaya M. A. Sphere of equal economic solutions of the appropriate use of diesel and electric traction on the Belarusian railway. *Vestnik Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta transporta: nauka i transport*. 2018;(2):82-84. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/ywiilr>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Сергей Анатольевич БЕССОНЕНКО, д-р техн. наук, профессор кафедры «Управление эксплуатационной работой», Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС, 630049, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, д. 191), Author ID: 719058, <https://orcid.org/0000-0001-5782-1596>

Екатерина Викторовна КЛИМОВА, канд. экон. наук, доцент кафедры «Управление эксплуатационной работой», Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС, 630049, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, д. 191), kate-kitton@yandex.ru, Author ID: 727665, <https://orcid.org/0000-0003-2336-1549>

Николай Игоревич ОСИПОВ, преподаватель, кафедра «Управление эксплуатационной работой», Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС, 630049, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, д. 191), N-I-Osipov@yandex.ru, Author ID: 1158066, <https://orcid.org/0000-0002-3278-6330>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sergey A. BESSONENKO, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Operations Management Department, Siberian Transport University (630049, Novosibirsk, 191, Dusi Kovalchuk St.), Author ID: 719058, <https://orcid.org/0000-0001-5782-1596>

Ekaterina V. KLIMOVA, Cand. Sci. (Econ.), Associate Professor of the Operations Management Department, Siberian Transport University (630049,

Novosibirsk, 191, Dusi Kovalchuk St.), kate-kitton@yandex.ru, Author ID: 727665, <https://orcid.org/0000-0003-2336-1549>

Nikolay I. OSIPOV, Lecturer, Operations Management Department, Siberian Transport University (630049, Novosibirsk, 191, Dusi Kovalchuk St.), N-I-Osipov@yandex.ru, Author ID: 1158066, <https://orcid.org/0000-0002-3278-6330>

ВКЛАД АВТОРОВ

Сергей Анатольевич БЕССОНЕНКО. Формирование направления исследования, формулировка цели и задач, обозначение алгоритма исследования, формулирование выводов (38%).

Екатерина Викторовна КЛИМОВА. Адаптация методики определения экономической эффективности развития железнодорожной инфраструктуры для оценки целесообразности внедрения систем интервального регулирования движения поездов на однопутном направлении (25%).

Николай Игоревич ОСИПОВ. Обзор существующих исследований по оценке эффективности интервального регулирования на однопутных направлениях, подготовка исходных данных для выполнения имитационного моделирования, разработка имитационной модели однопутного направления, выполнение прогонов разработанной модели, сбор и обработка статистических данных, построение сферы равноэкономических решений целесообразного использования интервального регулирования и строительства вторых главных путей (37%).

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Sergey A. BESSONENKO. Formulation of research focus, formulation of the goal and objectives, designation of the research algorithm, conclusions (38%).

Ekaterina V. KLIMOVA. Adaptation of the methodology of economic assessment of railway infrastructure development to assess the feasibility of introducing train interval control systems on a single-track line (25 %).

Nikolay I. OSIPOV. Review of existing research on the evaluation of interval control performance on single-track lines, preparation of raw data for simulation, development of a simulation model of a single-track line, runs of the developed model, collection and processing of statistical data, drafting the equal economic solution sphere of feasible use of interval control and construction of second main tracks (37%).

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The authors have read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию 11.09.2024, рецензия от первого рецензента получена 30.09.2024, рецензия от второго рецензента получена 01.10.2024, рецензия от третьего рецензента получена 09.10.2024, рецензия от четвертого рецензента получена 11.10.2024, принята к публикации 24.10.2024.

The article was submitted 11.09.2024, first review received 30.09.2024, second review received 01.10.2024, third review received 09.10.2024, fourth review received 11.10.2024, accepted for publication 24.10.2024.



УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССАМИ ПЕРЕВОЗОК

Оригинальная статья
УДК 625.173:656.22
EDN: <https://elibrary.ru/bcsmvn>



Определение рациональной схемы предоставления «окон» для работ по капитальному ремонту пути

В. Г. Федулин¹✉, М. И. Мехедов¹, В. А. Антонец², В. А. Устинов¹

¹ Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта («ВНИИЖТ»),
Москва, Российская Федерация

² Забайкальская железная дорога,
Чита, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Введение. Работы по капитальному ремонту пути и текущему содержанию устройств инфраструктуры оказывают серьезное влияние на перевозочный процесс и в то же время являются неотъемлемой его частью. Подход к предоставлению перерывов в движении основан на приоритетности пропуска поездов, что часто создает трудности выполнения заданных объемов ремонта.

Материалы и методы. Исследования базируются на известных теориях оперативного управления перевозочным процессом, применяемых технологиях ремонта инфраструктуры, статистических данных о пропуске поездов и объемах ремонта, вариантных графиках движения поездов. В работе использованы методы расчета пропускной способности ремонтируемых перегонов, теоретического обоснования аналитических формул для расчета показателей пропуска поездов.

Результаты. Выделены календарные периоды и сформулированы новые определения величин пропускной способности железнодорожных линий и способы их расчета для возможности определения годовой среднесуточной пропускной способности. Построены варианты календарных планов-графиков капитального ремонта пути с различной продолжительностью и различными схемами предоставления перерывов (так называемых «окон»). Представлены зависимости суммарной продолжительности «оконного» времени и суммарного пропуска поездов в течение календарного года при различных схемах ремонта, позволяющие выбрать вариант, удовлетворяющий заданным условиям.

Обсуждение и заключение. Полученные зависимости позволяют определить рациональные варианты схем ремонтной программы с учетом заданных условий по объемам ремонта и пропуска поездов на стадии формирования календарного плана-графика. Автоматизация процесса обеспечит оптимизацию трудозатрат на разработку календарного плана-графика ремонтных работ.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: железнодорожная инфраструктура, ремонтные работы, календарный план-график, закрытие перегона, «окно», вариантный график движения, пропускная способность

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Федулин В. Г., Мехедов М. И., Антонец В. А., Устинов В. А. Определение рациональной схемы предоставления «окон» для работ по капитальному ремонту пути // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2024. Т. 83, № 4. С. 302–310.

✉ fedulin.vyacheslav@vniizht.ru (В. Г. Федулин)

© Федулин В. Г., Мехедов М. И., Антонец В. А.,
Устинов В. А., 2024

Original article

UDK 625.173:656.22

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



Streamlined break scheduling for major track repairs

Vyacheslav G. Fedulin¹✉, Mikhail I. Mehedov¹, Vladimir A. Antonets²,
Vladimir A. Ustinov¹

¹ Railway Research Institute,
Moscow, Russian Federation

² TransBaikal Railway,
Chita, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Overhaul of railway track and routine maintenance of infrastructure requires interruptions in train traffic. This has a major impact on transport and at the same time is an integral part of it. Allocation of interruptions in traffic is based on the prioritisation of clearance for trains, which often complicates repairs of a given scope. The article considers ways to streamline break scheduling for railway repairs on heavy-traffic routes.

Materials and methods. The research is based on the known theories of operational management of transportation, applied technologies of infrastructure repair, statistics of clearance for trains, repair scopes and variable train schedules. The paper uses methods for calculating the capacity of space intervals under repair, and theoretical justification of analytical formulas for calculating clearance for trains.

Results. The paper highlights calendar periods and redefines traffic capacity indicators and their calculation methods for determining the annual average daily throughput capacity. The article plots possible track overhaul schedules with different durations and different interruption patterns (breaks). The work shows the dependencies of the total duration of breaks and total clearance for trains during a calendar year under different repair patterns for selecting a variant under given conditions.

Discussion and conclusion. These dependencies help streamline the repair programmes considering repair volumes and clearance for trains at the scheduling stage. Automation of the process optimises labour costs for scheduling repairs.

KEYWORDS: railway infrastructure, repair, scheduling, span closure, variable traffic schedule, throughput capacity

FOR CITATION: Fedulin V. G., Mekhedov M. I., Antonets V. A., Ustinov V. A. Streamlined break scheduling for major track repairs. *Russian Railway Science Journal*. 2024;83(4):302-310. (In Russ.).

Введение. Для проведения работ по капитальному ремонту железнодорожного пути и текущему содержанию устройств инфраструктуры существует необходимость перерывов в движении поездов, что, с одной стороны, оказывает серьезное влияние на перевозочный процесс, с другой — является неотъемлемой его частью.

При проведении ремонтных работ наибольшие ограничения движения возникают на грузонапряженных участках железных дорог, где нет рокадных ходов и отсутствует возможность перераспределения поездопотоков. Именно на таких участках выбор рациональной продолжительности «оконного» времени, удовлетворяющей необходимым размерам движения и заданным объемам ремонта, является наиболее сложным при разработке календарного плана-графика ремонтных работ.

Проблемы пропуска поездов в период ремонтных работ являются предметом изучения представителями отраслевой науки с середины 1950-х гг. Одними из основоположников теории организации перевозочного процесса в период ремонтных работ были В. Г. Альбрехт [1], А. А. Абрамов, М. Ф. Климов. Вопросы оптимальной продолжительности «окон» исследовали А. П. Мельник, Ю. В. Дьяков, Ю. А. Антонов [2]. Большое внимание вопросам организации движения поездов уделено в трудах ученых Е. А. Сотникова [3], Д. Ю. Левина [4], А. Т. Осьминина [5], М. И. Мехедова [6]. Наиболее полно вопросы организации движения поездов в условиях выполнения ремонтно-путевых работ отразил в своих трудах А. И. Богачев [7–9]. В связи с модернизацией железнодорожной инфраструктуры, переходом от звеньевого пути к бесстыковому с укладкой железобетонных шпал и рельсовых плетей используемые ранее схемы проведения ремонтных работ стали не актуальны. Повысилась трудоемкость ремонтных работ и количество применяемой путевой техники, что потребовало увеличения «оконного» времени. В современных научно-исследовательских работах выбор рациональной продолжительности «окна» основывается на расчетах потерь поездо-часов, допущенных по причине простоя поездов на технических станциях в ожидании отправления [10–14]. На практике одним из основных критериев продолжительности «окна» является количество пропущенных поездов по ремонтируемому перегону. При таком подходе не рассматриваются максимально возможные размеры движения в течение

всего календарного года и не учитывается упущенная экономическая выгода от неперегруженных грузов из-за снятых с графика движения ниток грузовых поездов.

Оптимальные схемы предоставления «окон» и их продолжительности рассмотрены Методикой¹, а порядок планирования предоставления, использования и учета «окон» определен Инструкцией². Однако вопрос повышения пропускной и провозной способности не теряет своей актуальности. Существующие подходы не всегда позволяют обеспечивать выполнение необходимых объемов ремонта, особенно на грузонапряженных железнодорожных линиях, что приводит к снижению уровня надежности железнодорожной инфраструктуры. В связи с этим требуется дальнейшее изучение вопросов организации движения поездов в период ремонтно-путевой кампании, в том числе исследование соотношения продолжительности «оконного» времени и размеров движения в течение всего календарного года.

Следовательно, актуальной на сегодняшний день научной задачей является разработка метода по определению рациональной схемы предоставления «окон» с учетом выполнения заданных объемов капитального ремонта пути и пропуска поездов в период проведения ремонтных работ на железнодорожной инфраструктуре.

Определение пропускной способности с учетом выполнения «окон» и формирование схем ремонтной программы. Анализ статистических данных предоставленных «окон» и выполненной участковой скорости на полигоне Забайкальской железной дороги показал, что между указанными параметрами существует тесная связь: с увеличением суммарного «оконного» времени скоростные характеристики поездопотоков снижались и наоборот (рис. 1). При суммарной продолжительности «окон» ($T_{ок}$) свыше 1000 ч в месяц участковая скорость ($V_{уч}$) находилась в пределах 29–35 км/ч.

Формирование ремонтной программы является важной составляющей в процессе организации перевозок. Основным документом, регламентирующим порядок предоставления «окон», является директивный план-график, утвержденный на основе разработанных на железных дорогах календарных планов-графиков ремонтно-строительных работ (далее — календарных планов-графиков). Календарные планы-графики должны обеспечивать выполнение всех планируемых объемов ремонта и строительства на объектах путевого хозяйства, устройствах энергообеспечения, устройств СЦБ, связи и др. при пропуске необходимого поездопотока.

¹ Методика определения оптимальных схем предоставления времени для ремонта и содержания инфраструктуры на основных направлениях с учетом обеспечения заданного объема перевозок [Электронный ресурс]: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 15 декабря 2023 г. № 3189/р. Доступ из АСПИЖТ.

² Инструкция о порядке планирования, предоставления, использования и учета «окон» для работ на инфраструктуре ОАО «РЖД» [Электронный ресурс]: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 28 декабря 2023 г. № 3403/р. Доступ из АСПИЖТ.

Сложность при планировании ремонта заключается в обеспечении баланса пропуска заданного количества поездов и предоставлении необходимого по времени и количеству «окон». Сокращение продолжительности «оконного» времени указывает на смещение приоритета в сторону снижения объемов ремонта для увеличения объемов перевозок. В краткосрочной перспективе уменьшение объемов ремонтной программы позволит пропустить дополнительное количество поездов в ремонтный период. В этом случае применим термин «пропуск поездов в долг», так как увеличение нагрузки на инфраструктуру происходит без надлежащего ремонта. Однако впоследствии потребуется дополнительное время для ее восстановления.

На грузонапряженных участках применяются различные технологические схемы выполнения капитальных видов ремонта, имеющие отличия в продолжительности и периодичности предоставления «окон». Лимитирующим для движения является не количество одновременно представляемых фронтов работы, а отдельный ремонтируемый перегон с наименьшим значением показателя пропуска поездов [5, 15]. Все эти схемы рассматриваются на подготовительной стадии формирования календарного плана-графика ремонта пути.

Для решения задач по формированию рационального варианта календарного плана-графика проведен анализ ремонтной программы за последнее десятилетие на участках Забайкальской железной дороги. В течение этого периода использовались различные технологии ремонта, в том числе с предоставлением длительных закрытий продолжительностью от 3 до 7 сут. С 2022 г. работы по капитальному ремонту пути ведутся в основном в 24-часовые закрытия и в «окна» меньшей продолжительности.

Как правило, при определении эффективности проекта календарного плана-графика основными критериями являются параметры пропуска поездов по вариантному графику в период «окна». Это является недостаточным, так как для объективной оценки должны приниматься во внимание годовые среднесуточные размеры движения.

Для определения годовой среднесуточной пропускной способности (с учетом проведения ремонтных работ на инфраструктуре) целесообразно разделение календарного года на временные периоды. Выделим основные календарные периоды и дадим определения соответствующим величинам, характеризующим пропускную способность:

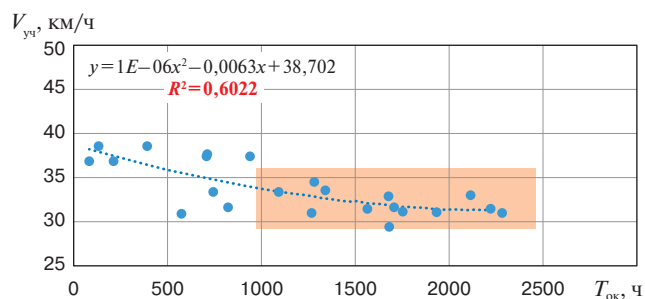


Рис. 1. Зависимость участковой скорости $V_{уч}$ от суммарной продолжительности «окон» $T_{ок}$ (продолжительностью более 4 ч) в 2021–2022 гг. на примере Забайкальской железной дороги

Fig. 1. Dependence of service speed $V_{уч}$ and total duration of breaks $T_{ок}$ (longer than 4 h) in 2021–2022 on the example of the Transbaikalian Railway

- пропускная способность железнодорожной линии в период предоставления «окон» и длительных закрытий;
- пропускная способность железнодорожной линии в календарный период проведения ремонтов;
- годовая среднесуточная пропускная способность железнодорожной линии.

Рассмотрим введенные характеристики.

Пропускная способность железнодорожной линии в период предоставления «окна» или длительного закрытия — это величина, соответствующая максимальному количеству пар поездов, пропускаемых в сутки организации движения по оставшемуся пути ремонтируемого перегона. В этот период движение по оставшемуся пути перегона может осуществляться как в течение полных суток (при длительном закрытии перегона), так и в течение части суток (при предоставлении «окна»), при этом значение принимается за полные сутки вне зависимости от продолжительности «оконного» времени. Обозначим данную величину как $N_{ок}$.

Величина $N_{ок}$ рассчитывается как пропускная способность однопутных железнодорожных участков (или однопутных перегонов, расположенных на двухпутных участках) при частично-пакетном графике по формуле (2.2.3) Инструкции³.

На рис. 2 представлено графическое изображение области определения указанной пропускной способности, где цифры красного цвета обозначают среднесуточную пропускную способность в период «окон» и длительного закрытия перегона, цифры зеленого цвета — нормативные размеры движения в разъездные дни. Разъездные дни — это дни отсутствия «окон»,

³ Инструкция по расчету пропускной и провозной способностей железных дорог ОАО «РЖД» [Электронный ресурс]: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 4 марта 2022 г. № 545/п. URL: <https://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=EXP&n=798693#B0Jx7VUfvg0SstI6> (дата обращения: 29.09.2024).

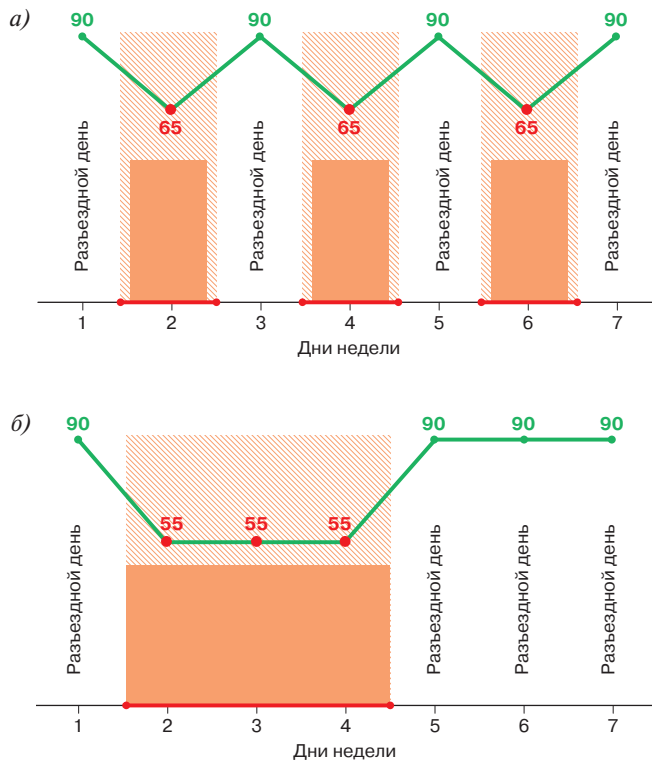


Рис. 2. Область определения пропускной способности: а — в период предоставления «окна»; б — в период длительного закрытия перегона (72 ч): — «окно» или длительное закрытие; — область определения пропускной способности; 55, 65, 90 — размеры движения, пар поездов/сут

Fig. 2. Scope of throughput capacity definition: а — during the break; б — during prolonged closure of space interval (72 h): — break or long closure; — scope of throughput capacity definition; 55, 65, 90 — traffic amount, pair of trains/day

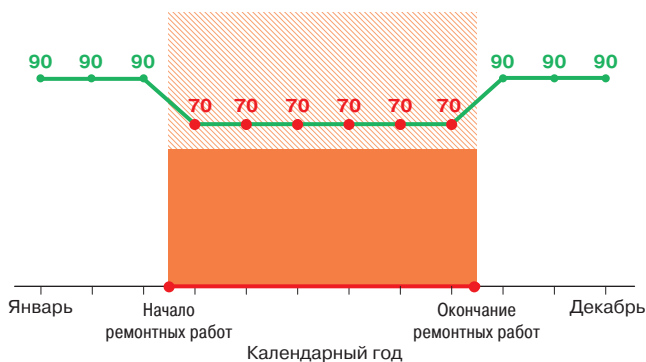


Рис. 3. Область определения пропускной способности в календарный период проведения ремонта: — период ремонтных работ; — область определения пропускной способности; 70, 90 — среднесуточные размеры движения в период проведения ремонтных работ, доремонтный и послеремонтный периоды, пар поездов/сут

Fig. 3. Scope of throughput capacity definition in the calendar period of the repair: — repair period; — scope of throughput capacity definition; 70, 90 — average daily traffic amounts during the repair period, pre-repair and post-repair periods, pair of trains/day

используемые для максимального пропуска поездов. Шкала значений по оси абсцисс представляет дни календарного месяца.

Пропускная способность железнодорожной линии в календарный период проведения ремонта представляет собой величину, соответствующую среднесуточному количеству пар поездов, пропускаемых в период ремонтных работ (период ограничения движения), включая «оконные» и разъездные дни (рис. 3). Обозначим данную величину как $N_{\text{рем}}$.

Расчет производится суммированием величины пропуска поездов в период предоставления «окон» и длительных закрытий (в «оконные» дни) и величины пропуска в разъездные дни и представляет среднесуточное значение:

$$N_{\text{рем}} = \frac{D_{\text{ок}} N_{\text{ок}} + D_{\text{раз}} (N_{\text{раз}} - \frac{t_{\text{тех рем}}}{I_{\text{гр}}})}{D_{\text{рем}}}, \quad (1)$$

где $D_{\text{ок}}$ — количество дней предоставления «окон», сут; $D_{\text{раз}}$ — количество разъездных дней, сут; $N_{\text{раз}}$ — нормативные размеры движения в разъездные дни, пар поездов/сут; $t_{\text{тех рем}}$ — продолжительность среднесуточного бюджета времени, выделяемого для производства работ по содержанию технических устройств в ремонтный период, мин; $I_{\text{гр}}$ — интервал между попутными поездами, мин; $D_{\text{рем}}$ — продолжительность ремонтного периода, сут.

В этом случае под годовой среднесуточной пропускной способностью железнодорожной линии можно понимать величину, соответствующую среднесуточному количеству пар поездов, пропускаемых в течение календарного года, включая период ремонтных работ, а также доремонтный и послеремонтный периоды (рис. 4). Обозначим данную величину как $N_{\text{год}}$.

Расчет производится суммированием величин пропуска поездов за все существующие периоды в течение календарного года с определением среднесуточного значения по формуле

$$N_{\text{год}} = \frac{N_{\text{рем}} D_{\text{рем}} + N_{\text{без рем}} D_{\text{без рем}}}{D_{\text{год}}}, \quad (2)$$

где $N_{\text{без рем}}$ — размеры движения в безремонтный период, пар поездов/сут; $D_{\text{без рем}}$ — продолжительность безремонтного периода, сут; $D_{\text{год}}$ — количество дней в году, сут.

Безремонтный период включает два периода: доремонтный и послеремонтный. Доремонтный начинается с первого числа календарного года, т. е. с 1 января, и заканчивается днем, являющимся последним перед началом ремонтных работ. Послеремонтный период

начинается с первого дня после проведения последнего «окна» по ремонтной программе и заканчивается последним днем календарного года. Пропускная способность в безремонтный период определяется по формуле

$$N_{\text{без рем}} = \left(N_{\text{д рем}} - \frac{t_{\text{тех д рем}}}{I_{\text{гр}}} \right) \frac{D_{\text{д рем}}}{D_{\text{без рем}}} + \left(N_{\text{п рем}} - \frac{t_{\text{тех п рем}}}{I_{\text{гр}}} \right) \frac{D_{\text{п рем}}}{D_{\text{без рем}}}, \quad (3)$$

где $N_{\text{д рем}}$ — нормативные размеры движения в доремонтный период, пар поездов/сут; $t_{\text{тех д рем}}$ — продолжительность среднесуточного бюджета времени, выделяемого для производства работ по содержанию технических устройств, в доремонтный период, мин; $D_{\text{д рем}}$ — продолжительность доремонтного периода, сут; $N_{\text{п рем}}$ — нормативные размеры движения в послеремонтный период, пар поездов/сут; $t_{\text{тех п рем}}$ — продолжительность среднесуточного бюджета времени, выделяемого для производства работ по содержанию технических устройств, в послеремонтный период, мин; $D_{\text{п рем}}$ — продолжительность послеремонтного периода, сут.

Технологический процесс капитального ремонта пути состоит из последовательности технологических операций, имеющих установленный норматив времени. На основании информации о выработке путевых машин и пропускной способности ремонтируемых перегонов разрабатываются различные варианты календарного плана-графика в зависимости от продолжительности «оконного» времени и периодичности предоставления «окон» или длительных закрытий. Для примера разработаны календарные планы-графики капитального ремонта пути продолжительностью работ 12, 18, 24, 36, 72 и 120 ч.

Результаты. После построения вариантов календарных планов-графиков определены зависимости объема ремонта и календарного времени ремонта, а также пропуска поездов и календарного времени ремонта. Это позволило рассчитать параметры выполнения максимальных объемов ремонта и максимального пропуска поездов при различных схемах предоставления «окон».

На основании полученных расчетов построена номограмма, где по оси абсцисс расположены годовые размеры движения, по оси ординат — годовые объемы ремонта (рис. 5).

Начальной точкой построения является значение, соответствующее максимальным размерам движения при отсутствии ремонта, конечной точкой — максимальные размеры движения при максимальных объемах ремонта за идентичный для всех схем ремонтный период (32 850 поездов в год). Каждая линия связывает эти

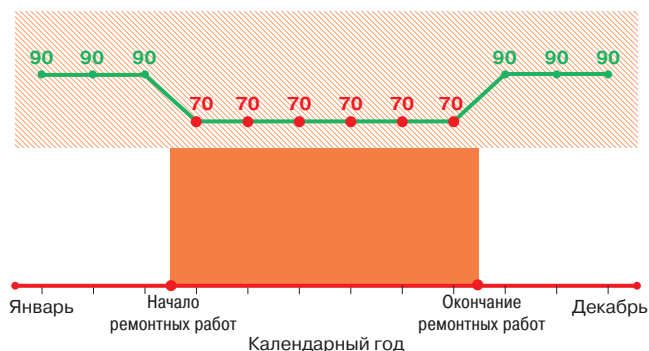


Рис. 4. Область определения годовой среднесуточной пропускной способности:

— период ремонтных работ; — область определения пропускной способности; 70, 90 — среднесуточные размеры движения в период проведения ремонтных работ, доремонтный и послеремонтный периоды, пар поездов/сут

Fig. 4. Scope of annual definition average daily throughput capacity:

— repair period; — scope of throughput capacity definition; 70, 90 — average daily traffic amounts during the repair period, pre-repair and post-repair periods, pair of trains/day

параметры и соответствует определенной схеме ремонта. Точки, лежащие на линии на всем ее протяжении, соответствуют объемам ремонта и размерам движения. При проектировании из любой точки линии на оси построения определяется результат объема ремонта (км/год) и размеры движения (поездов/год). Конечные точки каждой построенной линии говорят о максимальных возможностях выполнения ремонта по выбранной технологии и максимальных годовых размерах пропуска поездов. Например, линия, представляющая схему ремонта в 120-часовые закрытия, имеет наибольшее годовое значение объема ремонта, но в то же время — наименьшие размеры пропуска поездов за этот период. Линии, соответствующие 12- и 24-часовым «окнам», показывают наименьшие возможности для ремонта. Линия, соответствующая 72-часовым «окнам», показывает возможности выполнения сопоставимого с другими технологиями ремонта объема работ и в то же время — наибольшего пропуска поездов за календарный год.

Область, образованная при задании количества поездов (нижний и верхний пределы) по оси абсцисс и объемов ремонта (нижний и верхний пределы) по оси ординат, выделена цветом. Внутри области располагаются значения показателей, из которых следует выбрать наиболее отвечающие заданным условиям — размерам движения и объемам ремонта. Условия задаются исходя из производственной необходимости. Область, удовлетворяющая заданным условиям, принимает на графике соответствующее им расположение. В случае если ни одна из технологий

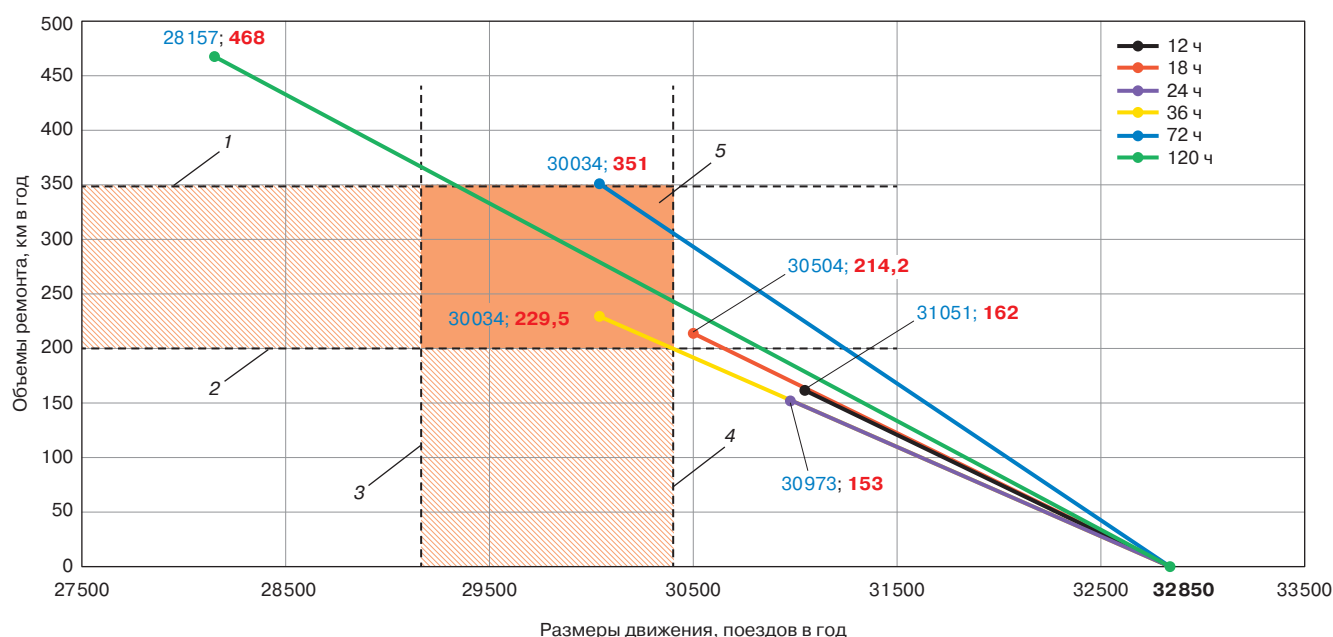


Рис. 5. Сопоставление годовых объемов ремонта и размеров движения в зависимости от выбранной технологии ремонта:
 1 — верхний предел объема ремонта; 2 — нижний предел объема ремонта; 3 — нижний предел пропуска поездов; 4 — верхний предел пропуска поездов; 5 — поле, удовлетворяющее заданным условиям ремонтной программы. Цифры красным цветом — годовые объемы ремонта (км), голубым — годовые размеры движения (поездов)

Fig. 5. Comparison of annual repair volumes and traffic amounts depending on the selected repair technology:
 1 — upper limit of repair volume; 2 — lower limit of repair volume; 3 — lower limit of clearance for trains; 4 — upper limit of clearance for trains; 5 — field that satisfies the specified conditions of the repair programme. Figures in red are annual repair volumes (km), in blue are annual traffic amounts (trains)

не обеспечивает вхождение внутрь ограничений, например завышены размеры движения или объемы ремонта, то выполнение задачи с заданными условиями невозможно и требуется их корректировка.

Обсуждение и заключение. Таким образом, существует возможность выбора необходимой технологии ремонта в зависимости от условий пропуска поездов и объемов ремонта на стадии планирования ремонтных работ. Обозначив по заданным параметрам вертикальные и горизонтальные границы области, можно определить, при каких объемах ремонта возможен пропуск заданного количества поездов.

Формирование календарного плана-графика является трудоемким процессом с большим объемом ручного труда и ограниченным количеством вариантов, что не позволяет находить оптимальный баланс между потребными объемами ремонта и перевозок. На сегодняшний день сформированы основные алгоритмы для автоматизированного расчета пропускной способности ремонтируемых перегонов и автоматизированного построения календарных планов-графиков. При вводе данных об объемах ремонта, условиях пропуска поездов, выработке путей машин, продолжительности и периодичности «окон» и др. возможно построение календарного

плана-графика ремонтных работ в автоматизированном режиме с формированием выходных данных о календарном периоде ремонтных работ, потребном количестве «окон», продолжительности «оконного» времени, комплексной выработке, среднесуточных размерах движения и др.

Представленные подходы расчета пропускной способности по периодам календарного года позволяют определить влияние схем ремонтной программы на пропускные способности железнодорожных линий и рассчитать годовые объемы перевозок при выполнении необходимых объемов ремонта.

Полученные зависимости позволяют определить рациональные варианты схем ремонтной программы с учетом заданных условий по объемам ремонта и пропуска поездов на стадии формирования календарного плана-графика.

Для оптимизации работы по формированию календарного плана-графика необходима автоматизация данного процесса. В настоящее время проводятся работы в данном направлении.

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

- Альбрехт В. Г. Методика выбора оптимального «окна» и сравнение вариантов организации работ при реконструкции и капитальном ремонте пути: рукопись. М.: МИИТ, 1955. 145 с.
- Albrecht V. G. *Methodology of optimum slot selection and comparison of arrangements during track reconstruction and overhaul: manuscript*. Moscow: MIIT; 1955. 145 p. (In Russ.).
- Антонов Ю. А., Печугин Д. А. Пути сокращения эксплуатационных потерь при предоставлении «окон» на грузонапряженных линиях // Труды ВНИИЖТ. М., 1965. Вып. 48. С. 13–27.
- Antonov Yu. A., Pechugin D. A. Ways to reduce operational losses when providing slots on heavy-traffic routes. In: *Proceedings of the Railway Research Institute*. Moscow; 1965. Issue 48. p. 13–27. (In Russ.).
- Шенфельд К. П., Сотников Е. А. Развитие методов управления перевозочным процессом на железнодорожном транспорте в современных условиях. М.: Научный мир, 2015. 202 с. (Труды АО «ВНИИЖТ»). EDN: <https://elibrary.ru/vkanpp>.
- Shenfeld K. P., Sotnikov E. A. *Development of railway transportation management methods in modern conditions*. Moscow: Nauchnyy mir Publ.; 2015. 202 p. (Proceedings of the Railway Research Institute). (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/vkanpp>.
- Левин Д. Ю. Теория оперативного управления перевозочным процессом: монография. М.: Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2008. 624 с.
- Levin D. Yu. *Theory of operational transport management: monograph*. Moscow: Uchebno-metodicheskiy tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte; 2008. 624 p. (In Russ.).
- Осьминин А. Т., Сотников Е. А., Осьминин М. А. Методические основы организации ремонтно-путевых работ при длительных закрытиях перегонов с их предоставлением по технологии «в створе» // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2017. Т. 76, № 1. С. 25–30. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2017-76-1-25-30>.
- Os'minin A. T., Sotnikov E. A., Os'minin M. A. Methodical basis for organization of repair-track works on sections at long-term closures with providing them by "in transit" technology. *Russian Railway Science Journal*. 2017;76(1):25-30. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2017-76-1-25-30>.
- Мехедов М. И. Проблематика ремонта инфраструктуры на грузонапряженных направлениях // Актуальные вопросы развития железнодорожного транспорта: материалы Всерос. науч.-практ. конф. к 75-летию аспирантуры Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. М.: РАС, 2019. Т. 2. С. 17–25. EDN: <https://elibrary.ru/wqvtfq>.
- Mehedov M. I. Challenges of infrastructure repair on heavy-traffic routes. In: Kosarev A. B., Gogrichiani G. V. (eds.) *Major issues of rail transport development: Proceedings of the All-Russian scientific and practical conference dedicated to the 75th anniversary of the postgraduate of the Railway Research Institute*. Moscow: RAS Publ.; 2019. Vol. 2. p. 17–25. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/wqvtfq>.
- Богачев А. И. Организация движения в условиях выполнения путевых работ. М.: Трансжелдориздат, 1955. 116 с.
- Bogachev A. I. *Organisation of traffic in conditions of track work*. Moscow: Transzheldorizdat Publ.; 1955. 116 p. (In Russ.).
- Богачев А. И. Определение оптимальных размеров «окон» в графике движения поездов для электрификации двухпутных участков и среднего ремонта пути // Вестник Всесоюзного научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ), 1961. № 1. С. 46–50.
- Bogachev A. I. Determination of optimum slot durations in the train schedule for the electrification of the double-track sections and the intermediate track repair. *Russian Railway Science Journal*. 1961;(1):46-50. (In Russ.).
- Богачев А. И. Техничко-экономическое обоснование «окон» в графике движения, используемых для выполнения ремонта пути на двухпутных участках. Ростов н/Д.: РИИЖТ, 1979. 16 с.
- Bogachev A. I. *Feasibility study of slots in the traffic schedule used for track repair on double-track sections*. Rostov-on-Don: RIIZhT; 1979. 16 p. (In Russ.).
- Светлакова Е. Н., Зерняев Д. В. Новые технологии в организации пропуска поездов в период летней путевой кампании // Транссиб: на острие реформ: материалы междунар. науч.-практ. конф., Чита, 06–07 октября 2016 г. / Забайкальский ин-т ж.-д. транспорта — филиал Иркутского ун-та путей сообщения. Чита, 2016. Т. 1. С. 60–64. EDN: <https://elibrary.ru/wwbfpt>.
- Svetlakova E. N., Zernyaev D. V. New technologies for the management of clearance for trains during the summer track campaign. In: *Transsib: ahead of the curve: Proceedings of the international scientific and practical conference, 6–7 October 2016, Chita*. Chita; 2016. Vol. 1. p. 60–64. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/wwbfpt>.
- Толмачев В. Н. Анализ вариантов схем участков ремонтно-путевых работ // Транспорт, наука, техника, управление. 2003. № 5. С. 36.
- Tolmachev V. N. Analysis of possible patterns of repair and track work sections. *Transport: science, equipment, management*. 2003;(5):36. (In Russ.).
- Яхимович В. В., Никулин Н. А., Дмитренко А. В. Эффективность «окон» большой продолжительности // Железнодорожный транспорт. 2000. № 3. С. 22–24.
- Yakhimovich V. V., Nikulin N. A., Dmitrenko A. V. Efficiency of long-term slots. *Zheleznodorozhnyy transport*. 2000;(3):22-24. (In Russ.).
- Парамонова Н. В. Оптимум для времени «окна» // Мир транспорта. 2007. № 1. С. 114–116. EDN: <https://elibrary.ru/kltpjf>.
- Paramonova N. V. Optimum for slot time. *World of Transport and Transportation*. 2007;(1):114-116. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/kltpjf>.
- Кокурин И. М., Катцын Д. В., Тимченко В. С. Определение параметров «окон» при оценке перевозочных перспектив // Мир транспорта. 2015. Т. 13, № 2(57). С. 142–153. EDN: <https://elibrary.ru/sgurpc>.
- Kokurin I. M., Katsyn D. V., Timchenko V. S. Determination of slot parameters when estimating transport prospects. *World of Transport and Transportation*. 2015;13(2):142-153. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/sgurpc>.
- Особенности организации ремонта железнодорожной инфраструктуры на грузонапряженных направлениях / В. А. Анто-нец [и др.] // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. 2022. № 3 (32). С. 24–28. EDN: <https://www.elibrary.ru/igtoty>.
- Antonets V. A., Mekhedov M. I., Fedulin V. G., Ustinov V. A. Special aspects of railroad infrastructure maintenance on heavy traffic directions. *Pacific Rim countries transportation system*. 2022;(3):24-28. (In Russ.). EDN: <https://www.elibrary.ru/igtoty>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Вячеслав Геннадьевич ФЕДУЛИН,

аспирант, технический эксперт, 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: 1141172, <https://orcid.org/0000-0002-2827-1991>

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>

Владимир Александрович АНТОНЕЦ,
аспирант, начальник Забайкальской железной дороги —
филиала ОАО «РЖД» (672000, г. Чита, ул. Ленинградская, д. 34),
<https://orcid.org/0009-0000-8288-9322>

Владимир Александрович УСТИНОВ,
аспирант, технический эксперт НЦ «ЦМПЭ», Научно-
исследовательский институт железнодорожного транспорта
(ВНИИЖТ, 129626, г. Москва, ул. 3-я Мытищинская, д.10),
Author ID: 1141173, <https://orcid.org/0009-0008-3897-0113>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vyacheslav G. FEDULIN,
Postgraduate, Technical Expert, Digital Models of Transportation
and Energy Saving Technologies Research Centre, Railway
Research Institute (129626, Moscow, 10, 3rd Mytishchinskaya St.),
Author ID: 1141172, <https://orcid.org/0000-0002-2827-1991>

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>

Vladimir A. ANTONETS,
Postgraduate, Head of the TransBaikal Railway — branch
of JSC "Russian Railways" (672000, Chita, 34, Leningradskaya St.),
<https://orcid.org/0009-0000-8288-9322>

Vladimir A. USTINOV,
Postgraduate, Technical Expert, Digital Models of Transportation
and Energy Saving Technologies Research Centre, Railway
Research Institute (129626, Moscow, 10, 3rd Mytishchinskaya St.),
Author ID: 1141173, <https://orcid.org/0009-0008-3897-0113>

ВКЛАД АВТОРОВ

Вячеслав Геннадьевич ФЕДУЛИН. Разработка вопросов
предоставления «окон» для капитального ремонта пути на гру-
зонапряженных железнодорожных линиях. Формирование ал-
горитмов расчета рациональных схем предоставления «окон».
Написание статьи (50%).

Михаил Иванович МЕХЕДОВ. Обоснование необходимости
разработки методики определения рациональных схем пре-
доставления «окон», обеспечивающих выполнение заданий
ОАО «РЖД» по ремонту железнодорожной инфраструктуры и
пропуску поездов, определение задач, требующих первооче-
редного решения (20%).

Владимир Александрович АНТОНЕЦ. Предоставление ста-
тистических данных о выполнении бюджетных показателей и
информации о предоставлении «окон» (10%).

Владимир Александрович УСТИНОВ. Проведение анализа
графиков производства работ по капитальному ремонту пути.
Предоставление данных о выполнении ремонтной программы
(20%).

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Vyacheslav G. FEDULIN. Development of track overhaul schedu-
ling issues on heavy-traffic railways. Creating algorithms to calcu-
late streamlined scheduling schemes. Article writing (50%).

Mikhail I. MEHEDOV. Justification of the need to develop a metho-
dology for determining sustainable scheduling patterns to ensure
the fulfilment of Russian Railways assignments in railway repair and
clearance for trains, identification of priority tasks (20%).

Vladimir A. ANTONETS. Provision of budget performance statis-
tics and break information (10%).

Vladimir A. USTINOV. Analysing track overhaul schedules. Pro-
vision of data on the implementation of the repair programme
(20%).

*Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант
рукописи.*

The authors have read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию 08.10.2024, рецензия от первого ре-
цензента получена 21.10.2024, рецензия от второго рецензента
получена 11.11.2024, рецензия от третьего рецензента получена
15.11.2024, принята к публикации 04.12.2024.

The article was submitted 08.10.2024, first review received 21.10.2024,
second review received 11.11.2024, third review received 15.11.2024,
accepted for publication 04.12.2024.

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».

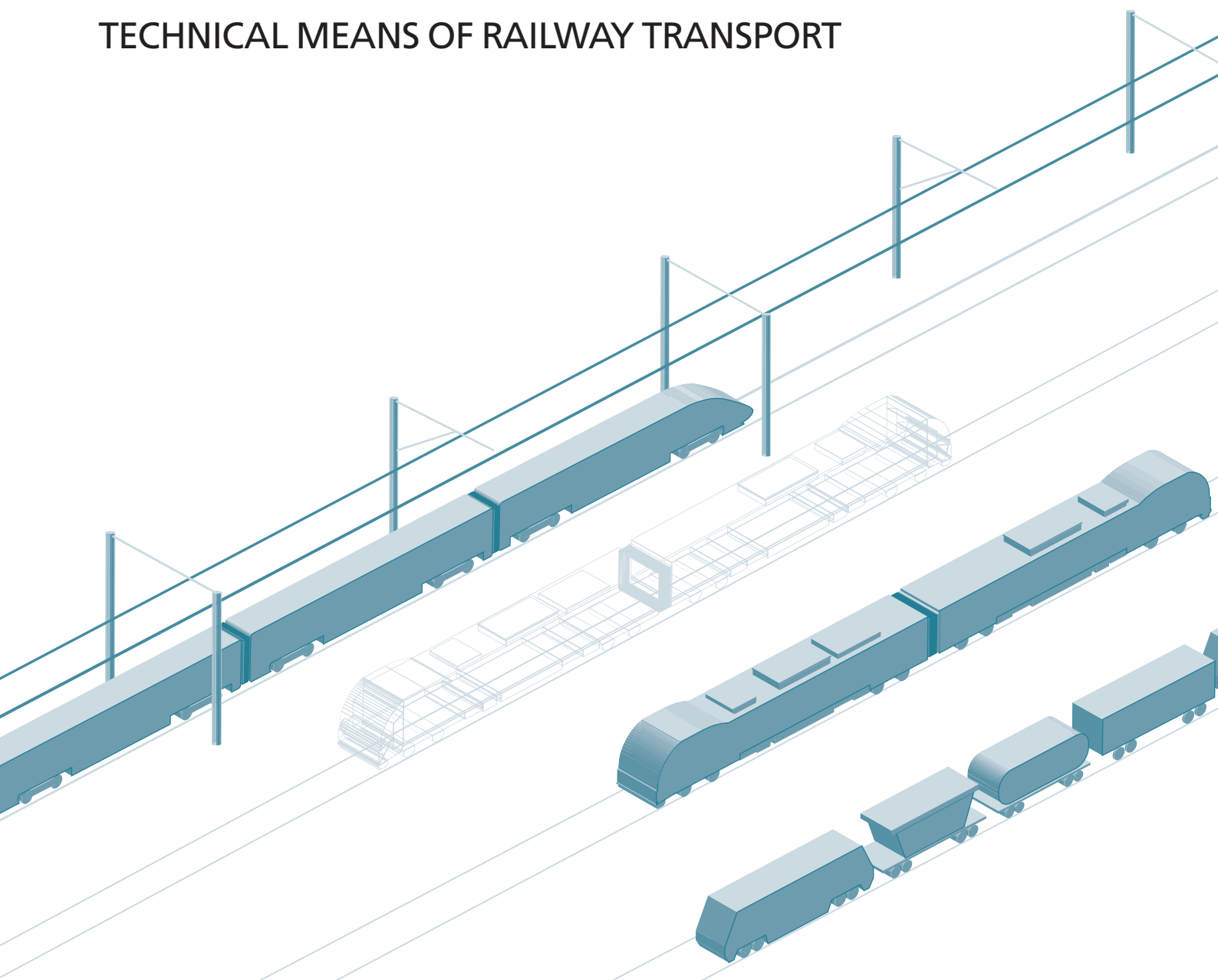
Для работы с фондами библиотеки пользователю необходимо самостоятельно зарегистрироваться, заполнив регистрационную форму на главной странице eLibrary.ru. Доступ возможен по Вашему логину и паролю с любого компьютера, имеющего выход в интернет.

Материалы журнала, размещенные на сайте Научной электронной библиотеки для свободного использования, допускается использо-
вать, копировать, цитировать исключительно в некоммерческих целях с соблюдением соответствующих положений действующего ав-
торского 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.

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

TECHNICAL MEANS OF RAILWAY TRANSPORT



ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Оригинальная статья

УДК 624.21.09

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

Оценка возможности использования окологабаритного пространства для железнодорожных мостов

А. А. Локтев, И. В. Шишкина✉

Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ)),
Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Введение. Наиболее популярные конструктивные решения мостовых переходов на железных дорогах представляют собой или балочные конструкции с достаточно большой высотой поперечного сечения, которое расположено ниже уровня приложения поезда нагрузки, или фермы, высота которых зависит от длины пролетного строения и чаще всего существенно превышает высоту железнодорожного габарита. Поэтому перспективным и актуальным является разработка конструктивных решений, которые позволили бы использовать пространство непосредственно вокруг транспортного габарита и не увеличивать высоту поперечного сечения снизу или сверху от плоскости приложения динамической нагрузки. Поскольку подвижная нагрузка от экипажа является знакопеременной и высокоциклической, то потребуются контролировать сжимающие и растягивающие напряжения сверху и снизу поперечного сечения пролетного строения. Цель работы — обоснование возможности использования геометрического пространства, непосредственно примыкающего к габариту транспортных средств, при разработке поперечного профиля пролетного строения искусственного сооружения.

Материалы и методы. Напряженно-деформированное состояние балочного пролетного строения определялось путем анализа изгибающих моментов и экстремальных нормальных напряжений, зная которые можно выбрать армирование железобетона или геометрические характеристики стальной балки. В качестве критериев оценки предлагается использовать нормальное напряжение, которое может быть как сжимающим, так и растягивающим, в зависимости от местоположения колесных пар на линиях влияния.

Результаты. Проведен анализ существующих подходов к оценке включения элементов поперечного сечения балочной конструкции, расположенных выше плоскости приложения нагрузки от колесных пар (например, бортов балластного корыта). Получены графические зависимости для момента инерции поперечного сечения с различными геометрическими параметрами, который фактически представляет собой целевую функцию, позволяющую увязать геометрические размеры балочного пролета вдоль и поперек движения экипажа с главными напряжениями и определить оптимальное положение поверхности приложения нагрузки относительно верха и низа поперечного сечения.

Обсуждение и заключение. Предлагаемый подход может быть использован как для открытых двутавровых сечений, так и для коробчатых с бортами, которые в настоящее время активно применяются при проектировании мостовых переходов для высокоскоростных железнодорожных магистралей. Существенный эффект может быть достигнут за счет увеличения бортов пролетного строения и расположения нижней полки коробчатой части поперечного сечения. В условиях многоуровневых развязок при одинаковых размерах пролета предлагаемые конструктивные решения позволят уменьшить расстояние между уровнями приложения подвижной нагрузки.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: железные дороги, мосты, окологабаритное пространство, оценка использования, борт несущих балок

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Локтев А. А., Шишкина И. В. Оценка возможности использования окологабаритного пространства для железнодорожных мостов // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2024. Т. 83, № 4. С. 312–318.

✉ shishkinaira@inbox.ru (И. В. Шишкина)

© Локтев А. А., Шишкина И. В., 2024

Original article

UDK 624.21.09

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

Feasibility of using circumferential space for railway bridges

Alexey A. Loktev, Irina V. Shishkina✉

Russian University of Transport,
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The most popular design solutions for bridge crossings on railways are either girder structures with a sufficiently high cross-sections located below the train load application level, or trusses whose height depends on the span length and more often than not far exceeds the height of the railway clearance. This motivates to consider design solutions that utilise the space immediately around the transport dimension without increasing the cross-sectional height from below or above the plane of application of the dynamic load. Since the cab exerts a variable and highly cyclic load, control of compressive and tensile stresses will be required at the top and bottom of the spanwise cross-section. The work attempts to justify the use of the geometric space immediately adjacent to the contour of the vehicles in the design of the transverse profile of the span structure.

Materials and methods. Authors determined the stress deformation of the beam span by analysing the bending moments and extreme normal stresses to select concrete reinforcement or steel beam geometry. The evaluation criteria are normal stresses, which could be compressive or tensile depending on the location of the wheel pairs on the impact lines.

Results. The paper analyses the existing approaches to evaluate the inclusion of cross-sectional elements of a girder structure located above the plane of wheel load application (e.g. ballast bed sides). The analysis provides graphical relationships for the moment of inertia of a cross-section with different geometries, which is actually a target function that relates the geometric dimensions of the girder span along and across the cab movement to the principal stresses and determines the optimum position of the load application surface relative to the top and bottom of the cross-section.

Discussion and conclusion. This approach is suitable for both open H-beam sections and box sections with sides currently widely used in the design of bridge crossings for high-speed railway lines. A significant effect could be achieved due to higher span sides and the location of the lower shelf of the cross-section box. Multi-level interchanges at the same span dimensions allow the proposed design solutions to reduce the distance between the levels of mobile load application.

KEYWORDS: railways, bridges, circumferential space, feasibility assessment, bearing beam edge

FOR CITATION: Loktev A. A., Shishkina I. V. Feasibility of using circumferential space for railway bridges. *Russian Railway Science Journal*. 2024;83(4):312-318. (In Russ.).

Введение. Развитие современных наземных транспортных систем во многом связано с развитием городских агломераций и транспортных магистралей между ними. При этом в самих агломерациях плотность дорог высока, а отношение площади в плане объектов транспортной инфраструктуры к общей площади населенного пункта может достигать 30 %. В этих условиях одним из самых востребованных инженерных решений является создание транспортных развязок, расположенных на различных уровнях. При многоуровневой компоновке развязок между пересекающимися в плане транспортными магистралями важным является соблюдение автомобильного или железнодорожного габарита как над мостовым переходом, так и под ним. Поэтому реализация традиционных балочных, арочных, ферменных расчетных схем пролетного строения с ездой поверху или с ездой понизу трудновыполнима из-за дефицита пространства при вертикальной компоновке транспортных развязок¹ [1]. На рис. 1 представлен железнодорожный путепровод на пересечении Северо-Восточной хорды и железнодорожной линии около станции Московского центрального кольца, вблизи которой будет развиваться транспортная инфраструктура в связи с реализацией проектов Московских центральных диаметров. Конструкция путепровода включает два типа продольных балок, объединенных в общую балочную систему: тонкостенные металлические балки со сплошной стенкой, расположенные под рельсошпальной решеткой, и металлические балки замкнутого поперечного сечения, ширина и высота которого имеют значения одного порядка и расположены слева и справа от габаритного пространства путепровода (рис. 2) [2, 3].



Рис. 1. Железнодорожный путепровод с расположением рельсошпальной решетки (1) в средней зоне балочного пролетного строения (2)

Fig. 1. Railway overpass with a rail-sleeper grid (1) located in the middle zone of the beam span (2)

Конструктивные решения, совмещающие балочное пролетное строение непосредственно под проезжей частью (для автомобильной дороги) или под верхним строением пути (для железной дороги) и стержневой системы, расположенной выше плоскости приложения подвижной нагрузки, встречаются достаточно часто при реализации мостовых переходов на железных дорогах [4, 5], второстепенных автомобильных дорогах и пешеходных маршрутах. При этом чаще всего подобные конструкции имеют ряд ограничений, связанных с небольшой расчетной нагрузкой, например при пропуске только легковых автомобилей и количества находящихся на сооружении людей, с небольшой высотой пешеходной зоны, небольшим пролетом мостового перехода (рис. 1).

Целью работы является обоснование возможности использования геометрического пространства, непосредственно примыкающего к габариту транспортных средств, при разработке поперечного профиля пролетного строения искусственного сооружения с учетом проектирования многоуровневых транспортных развязок в условиях современных городских агломераций. Объектом исследования при этом выступает само поперечное сечение, жесткость и размеры которого предлагается регулировать с помощью изменения расстояния между горизонтальными полками и вертикальным размером боковых бортов, возвышающихся над плоскостью приложения подвижной нагрузки от транспортных средств.

Материалы и методы. В настоящей работе рассматривается пролетное строение под один железнодорожный путь, поскольку большинство мостовых переходов на отечественных железных дорогах имеют именно такую поперечную расчетную схему [6, 7]. Это позволяет рассматривать балочное строение, работающее в основном на изгиб, без кручения, поскольку соосность пролетного строения и рельсошпальной решетки строго регламентируется нормативными документами, а наличие эксцентриситета, приводящего к изменению напряженно-деформированного состояния, отслеживается при проведении мониторинга и может быть исправлено при выполнении ремонтных работ. Если же устранить несоосность не представляется возможным, то требуется в расчетах учитывать кручение пролетного строения и проводить проверку его грузоподъемности и устойчивости боковому опрокидыванию [8, 9].

Включение в работу пролетного строения элементов поперечного сечения, расположенных выше проезжей части, рассматривалось рядом отечественных и зарубежных исследователей [9–12], но чаще всего это были элементы конструкции, выполнявшие

¹ Динамический расчет зданий и сооружений (справочник проектировщика) / под ред. Б. Г. Коренева, И. М. Рабиновича. М.: Стройиздат, 1984. 303 с.

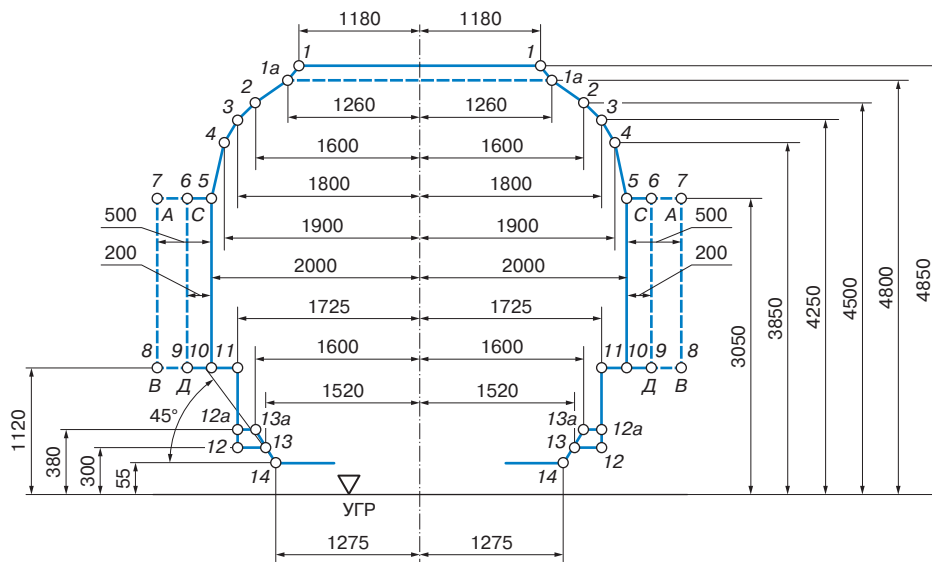


Рис. 2. Верхнее очертание габарита приближения строений 1-СМ:

— основной контур габарита; — контур необходимых свободных боковых пространств; УГР — уровень верха головок рельсов; отрезки $A-B$ используются для всех устройств на перегонах, за исключением искусственных сооружений; отрезки $C-D$ используются для всех устройств на станциях и инженерных сооружениях на перегонах

Fig. 2. Upper outline of the structural clearance 1-CM:

— main dimension outline; — outline of required free lateral spaces; УГР — top of the rail heads; segments $A-B$ are used for all devices on space intervals, except for engineering structures; segments $C-D$ are used for all devices at stations and engineering structures at space intervals

дополнительные функции: борта — для удержания щебня в железобетонном корыте пролетного строения моста, ограничители — для препятствия сходу подвижного состава с мостового перехода и т. д.

Известные методики учета временной вертикальной нагрузки от транспортных средств определяют интенсивность такого рода воздействия согласно формуле

$$v = \left(9,807 + \frac{10,787}{\exp(0,04\lambda)} + \frac{43,149}{\lambda^2} \right) \left(1 - \frac{\alpha}{4} \right) K, \quad (1)$$

где λ — длина участка загрузки; α — промежуточные положения вершин линий влияния; K — класс устанавливаемой нагрузки.

Также учитывается нагрузка на ось экипажа, динамический коэффициент, коэффициент надежности по временной нагрузке, приведенная длина сегмента пролетного строения, на который передается нагрузка от одной колесной пары, длина подрельсового основания в направлении, перпендикулярном оси мостового перехода.

Соотношение (1) предполагает, что вертикальная нагрузка равномерно распределена по длине подрельсового основания. Если мостовой переход расположен в кривой, то требуется учитывать горизонтальную

компоненту нагрузки [13, 14], передаваемой от подвижного состава верхнему строению железнодорожного пути и вычисляемой по приведенной ниже формуле (2), при этом считается, что распределение нагрузки по длине подрельсового основания имеет равномерный характер:

$$v_h = \frac{180v}{R} \leq 0,15v \text{ или } v_h = \frac{60v}{R} \leq 0,15v, \quad (2)$$

где R — радиус кривизны в области приложения подвижной нагрузки.

Выбор первой или второй формулы зависит от принятой в расчете нормативной нагрузки С14 или С11 соответственно².

Выражения (1) и (2) позволяют определить нагрузку, действующую на верхнюю часть Н-образного поперечного сечения с внутренней стороны балочного строения (координаты рассматриваемой точки (Y , Z) показаны на рис. 3), для случая, когда элементы, расположенные выше плоскости приложения поезда нагрузки, полноценно работают в составе поперечного сечения пролетного строения, а не только для удержания балласта.

При определении напряжений в точке на внутренней поверхности борта используют положения теории механики грунта, основанные на перераспределении

² СП 35.13330.2011. Мосты и трубы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.03-84* (с изменением № 1): дата введения 2011-05-20. М.: ОАО «ЦПП», 2011. 321 с.

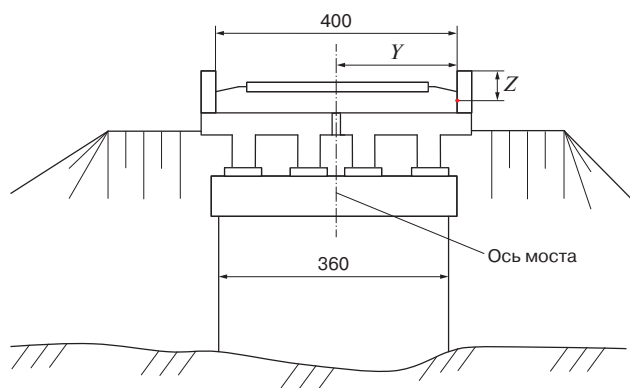


Рис. 3. Поперечный разрез однопутного мостового перехода с бортами для удержания балласта

Fig. 3. Cross-section of a single-track bridge crossing with ballast retaining walls

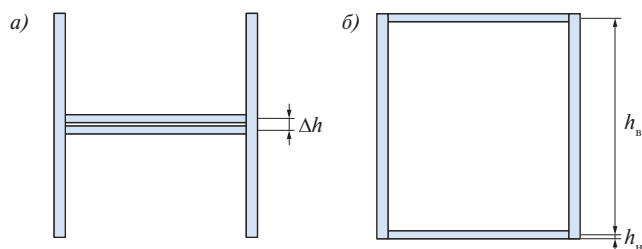


Рис. 4. Поперечное сечение мостового перехода с исследуемым размером:

а — Н-образное; б — прямоугольное, близкое по очертанию к транспортному габариту

Fig. 4. Cross-section of a bridge crossing with the examined dimension: а — H-shaped; б — rectangular, close in outline to the transport dimensions

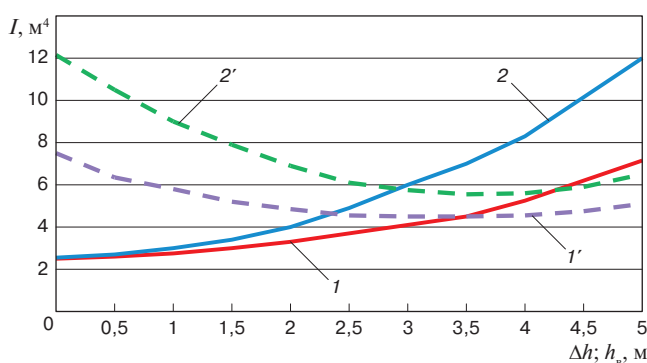


Рис. 5. Зависимость момента инерции поперечного сечения пролетного строения моста относительно горизонтальной оси от параметров сечения: сплошная линия от Δh , пунктирная линия от h_b , отсчитываемого сверху. Цифрами «1» и «2» показаны зависимости для поперечного сечения, рассчитанного для пропуска одного или двух транспортных средств соответственно (одинарный или двойной габарит)

Fig. 5. Dependence of the moment of inertia of the cross-section of the bridge span with respect to the horizontal axis on the parameters of the cross-section: solid line from Δh , dotted line from h_b , counted from above. The numbers “1” and “2” show the dependencies for the cross-section designed for the passage of one or two vehicles respectively (single or double dimension)

вертикальной нагрузки, действующей на верхнюю поверхность призмы, на крайнюю точку основания с учетом угла внутреннего трения и естественного откоса.

Напряжение от вертикальной компоненты нагрузки от подвижного состава в рассматриваемой точке при таком подходе [15, 16] может быть определено следующим выражением:

$$\sigma_q = \frac{q}{\pi} \left[\varphi_1 - \varphi_2 - \frac{1}{2} (\sin 2\varphi_1 - \sin 2\varphi_2) \right], \quad (3)$$

а напряжение от горизонтальной компоненты нагрузки от подвижного состава определяется следующим образом:

$$\sigma_\tau = \frac{\tau}{\pi} \left[\ln \left(\frac{(0,5l_s + Y)^2 + Z^2}{(0,5l_s - Y)^2 + Z^2} \right) - \frac{2l_s Y Z^2}{(0,25l_s^2 + Y^2 + Z^2)^2 - l_s^2 Z^2} \right], \quad (4)$$

где φ_1, φ_2 — углы между нормалью к подошве, проведенной через дальний и ближний торец подрельсового основания соответственно, и линией, связывающей искомую точку определения напряжений и нижнюю точку торца; l_s — длина полушпалы, м.

Таким образом, получаем, что верхняя часть поперечного сечения пролетного строения (борт) работает в основном на изгиб, и в произвольном сечении борта изгибающий момент определяется по формуле

$$M_{q+\tau} = \int_0^{h_b} (\sigma_q + \sigma_\tau) b (h_b - Z) dz, \quad (5)$$

где b — приведенная длина рассматриваемого участка борта вдоль продольной оси мостового перехода, м; h_b — расстояние по вертикали от центра тяжести поперечного сечения до плоскости приложения поездной нагрузки, м.

Максимальное напряжение в нижней точке верхней части поперечного сечения от собственного веса верхнего строения пути определяется по формуле

$$\sigma_{b \max} = \gamma h_b \tan^2 \left(45 - \frac{\varphi}{2} \right), \quad (6)$$

где γ — усредненный удельный вес верхнего строения пути, тс; φ — угол внутреннего трения, град. (для щебеночного балласта $\varphi = 40^\circ$).

Величина, определяемая по формуле (6), необходима при проверке прочности на раскрытие (опрокидывание) бортовой части поперечного сечения от передаваемого давления со стороны балласта [8, 17, 18].

Рассмотрим в качестве основных два типа поперечных сечений пролетного строения мостового перехода: открытого (рис. 4, а) и закрытого профиля (рис. 4, б). Фактически можно представить оба сечения в виде одного, у которого величины Δh (расстояние между нижней и верхней полками поперечного коробчатого

сечения, м) и h_b переменны. На рис. 5 показано влияние на величину момента инерции относительно горизонтальной оси параметров сечения Δh (сплошная линия) для сечения типа, показанного на рис. 4, а и h_b (пунктирная линия) для сечения типа, изображенного на рис. 4, б. Полки сечения рис. 4, а симметрично раздвигаются от текущего состояния в сторону замкнутого прямоугольного поперечного сечения. В сечении типа 4, б верхняя полка перемещается вниз, а нижняя остается на месте. Удаление от плоскости приложения нагрузки крайних точек поперечного сечения приводит к увеличению нормальных напряжений в них. В сжатой зоне это может привести к потере устойчивости, поэтому в верхней части поперечного сечения также нужно предусматривать поперечно-вертикальные ребра жесткости или использование коробчатых элементов сечения — например, для бортов пролетного строения (рис. 1).

Кривые на рис. 5 показывают, каким образом изменяется момент инерции поперечного сечения пролетного строения и, следовательно, изгибная жесткость при различном положении поперечного элемента конструкции, к которому непосредственно прикладывается нагрузка от подвижного состава [18, 19]. Значения $\Delta h = h_b = 0$ соответствуют форме сечения, непосредственно изображенного на рис. 4, а, б соответственно. Уменьшение расстояния между горизонтальными полками на рис. 4, б приводит к нарушению габаритного вертикального размера, поэтому при такой компоновке предполагается, что нагрузка будет прикладываться не к нижней, а к верхней горизонтальной полке. Изгибная жесткость является функцией, через которую учитываются геометрические характеристики поперечного сечения и используемый материал при определении динамического поведения конструкции пролетного строения [15, 19].

Результаты. Полученные результаты позволяют более полно использовать окологабаритное пространство пролетных строений при проектировании, строительстве и реконструкции мостовых переходов за счет увеличения бортов несущих балок, экономя при этом пространство под и над самим пролетом.

Обсуждение и заключение. Предложенный инженерный подход позволит при проектировании новых и реконструкции существующих мостов и путепроводов более экономно использовать пространство над и под верхним строением железнодорожного пути, расположенным на пролетном строении. Расчеты показывают, что целесообразно увеличение высоты бортов поперечного сечения пролетного строения, создание пояса жесткости сверху этого борта и расположение нижней полки коробчатой части его поперечного сечения на наибольшем возможном расстоянии от плоскости приложения поездной нагрузки. При одинаковых размерах пролета такие

конструктивные решения позволят уменьшить расстояние между уровнями приложения подвижной нагрузки на 1–3 м.

Проводя несколько критериальное сравнение по геометрическим характеристикам поперечного сечения, изгибной жесткости, динамическому прогибу с одновременным учетом расположения несущих элементов конструкций относительно транспортных габаритов, можно прийти к наиболее компактной схеме компоновки поперечного сечения балочного пролета.

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. Влияние высокочастотного нагружения на структуру малоуглеродистой стали / Е.А. Гридасова [и др.] // Наука и техника транспорта. 2017. № 2. С. 82–91. EDN: <https://www.elibrary.ru/ysphyv>.
2. Gridasova E. A., Nikiforov P. A., Loktev A. A., Grishin A. V., Sukhorada A. E. The effect of high-frequency loading on the structure of low-carbon steel. *Science and Technology in transport*. 2017;(2):82-91. (In Russ.). EDN: <https://www.elibrary.ru/ysphyv>.
3. Loktev A., Korolev V., Shishkina I., Illarionova L., Loktev D., Gridasova E. Perspective Constructions of Bridge Crossings on Transport Lines. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2020;1116:209-218. https://doi.org/10.1007/978-3-030-37919-3_20.
4. Ланис А.Л., Разуваев Д.А., Ломов П.О. Сопряжение подходов насыпей с мостами и путепроводами // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. 2016. № 2 (48). С. 110–120. EDN: <https://www.elibrary.ru/vtnxnz>.
5. Lanis A. L., Razuvaev D. A., Lomov P. O. Coupling of approach embankments with bridges and overpasses. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2016;(2):110-120. (In Russ.). EDN: <https://www.elibrary.ru/vtnxnz>.
6. Поляков В. Ю. Синтез оптимальных пролетных строений для высокоскоростной магистрали // Строительная механика и расчет сооружений. 2016. № 3 (266). С. 35–42. EDN: <https://www.elibrary.ru/vzycph>.
7. Polyakov V. Yu. Synthesis of optimal superstructures for a high-speed highway. *Structural mechanics and analysis of constructions*. 2016;(3):35-42. (In Russ.). EDN: <https://www.elibrary.ru/vzycph>.
8. Baragetti S. Notch Corrosion Fatigue Behavior of Ti-6Al-4V. *Materials*. 2014;7(6):4349-4366. <https://doi.org/10.3390/ma7064349>.
9. Ivanchenko I. I. Method of calculating plates subjected to an inertial load moving at a variable speed. *Mechanics of Solids*. 2022;57(8):2111-2122. <https://doi.org/10.3103/s0025654422080167>.
10. Иванченко И. И. Динамика транспортных сооружений. Высокоскоростные подвижные, сейсмические и ударные нагрузки. М., 2011. 574 с. EDN: <https://www.elibrary.ru/qnxtxp>.
11. Ivanchenko I. I. *Dynamics of transport structures. High-speed mobile, seismic and shock loads*. Moscow; 2011. 574 p. (In Russ.). EDN: <https://www.elibrary.ru/qnxtxp>.

8. Matsumoto N., Asanuma K. Some experiences on track-bridge interaction in Japan. In: Calcada R., Delgado R., Campos A. et al. (eds) *Track-Bridge Interaction on High-Speed Railways*. London: CRC Press; 2008. p. 80–97. <https://doi.org/10.1201/9780203895399>.

9. Fryba L. Dynamic of railway bridges. Praha: Academia; 1996. 330 p.

10. Chen Y.H., Li C.Y. Dynamic response of elevated high-speed railway. *Journal of Bridge Engineering (ASCE)*. 2000;5(2):124–130. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0702\(2000\)5:2\(124\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0702(2000)5:2(124)).

11. Иванченко И. И. Метод расчета стержневых систем на взаимодействие с инерционной нагрузкой при переменной скорости движения // Строительная механика и расчет сооружений. 2023. № 4 (309). С. 2–14. <https://doi.org/10.37538/0039-2383.2023.4.2.14>.

Ivanchenko I. I. Method for calculating rod systems for interaction with inertial load at variable speed of movement. *Structural mechanics and analysis of constructions*. 2023;(4):2–14. (In Russ.). <https://doi.org/10.37538/0039-2383.2023.4.2.14>.

12. Loktev A. A. Dynamic contact of a spherical indenter and a prestressed orthotropic Uflyand-Mindlin plate. *Acta Mechanica*. 2011;222(1-2):17–25. <https://doi.org/10.1007/s00707-011-0517-8>.

13. Иванченко И. И. Метод расчета пластин на взаимодействие с инерционной нагрузкой при переменной скорости движения // Прикладная математика и механика. 2022. Т. 86, № 5. С. 695–709. <https://doi.org/10.31857/S0032823522050101>.

Ivanchenko I. I. Method for calculating plates for interaction with inertial load at variable speed of movement. *Applied Mathematics and Mechanics*. 2022;86(5):695–709. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0032823522050101>.

14. Egorov S. B., Kapitanov A. V., Loktev D. A. Modern methods and technological solutions for effective processing of gear wheels. *Materials Science Forum*. 2016;870:397–403. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.870.397>.

15. Перспективные конструкции мостовых переходов на транспортных магистралях / А. А. Локтев [и др.] // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2018. Т. 77, № 6. С. 331–336. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2018-77-6-331-336>.

Loktev A. A., Korolev V. V., Loktev D. A., Shukuyurov D. R., Ge-lyukh P. A., Shishkina I. V. Perspective constructions of bridge overpasses on transport main lines. *Russian Railway Science Journal*. 2018;77(6):331–336. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2018-77-6-331-336>.

16. Egorov S., Kapitanov A., Loktev D. Turbine Blades Profile and Surface Roughness Measurement. In: Radionov A., ed. *International Conference on Industrial Engineering, ICIE, 16–19 May 2017, St. Petersburg*. St. Petersburg; 2017. p. 1476–1481. (Procedia Engineering; Vol. 206). <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.664>.

17. Локтев А. А., Королёв В. В., Шишкина И. В. Особенности оценки состояния и поведения низководных мостов // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. 2021. Т. 80, № 6. С. 334–342. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-6-334-342>.

Loktev A. A., Korolev V. V., Shishkina I. V. Features of assessing the condition and behavior of low-water bridges. *Russian Railway Science Journal*. 2021;80(6):334–342. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-6-334-342>.

18. Особенности работы пролетного строения мостового перехода при смещении оси рельсоопальной решетки / В. В. Королёв [и др.] // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. 2020. Т. 79, № 3. С. 127–138. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2020-79-3-127-138>.

Korolev V. V., Loktev A. A., Shishkina I. V., Gridasova E. A. Features of the bridge span performance when shifting the axis of the rail-sleeper grid. *Russian Railway Science Journal*. 2020;79(3):127–138. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2020-79-3-127-138>.

19. Инновационные средства обеспечения управляемости технологических процессов / Д. А. Локтев [и др.] // Инновации. 2016. № 8 (214). С. 113–119. EDN: <https://www.elibrary.ru/ypowqq>.

Loktev D. A., Egorov S. B., Kapitanov A. V., Mitrofanov V. G., Egorova T. P. Innovative means of ensuring controllability of technological processes. *Innovations*. 2016;(8):113–119. (In Russ.). EDN: <https://www.elibrary.ru/ypowqq>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Алексей Алексеевич ЛОКТЕВ,

д-р физ.-мат. наук, профессор, заведующий кафедрой «Транспортное строительство», Российский университет транспорта (ПУТ (МИИТ)), 127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9), Author ID: 16528, <https://orcid.org/0000-0002-8375-9914>

Ирина Викторовна ШИШКИНА,

канд. техн. наук, доцент, кафедра «Транспортное строительство», Российский университет транспорта (ПУТ (МИИТ)), 127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9), Author ID: 1040652, <https://orcid.org/0000-0002-6530-8116>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Alexey A. LOKTEV,

Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Head of Transport Construction Department, Russian University of Transport (127994, Moscow, 9, bldg. 9, Obraztsova St.), Author ID: 16528, <https://orcid.org/0000-0002-8375-9914>

Irina V. SHISHKINA,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Transport Construction Department, Russian University of Transport (127994, Moscow, 9, bldg. 9, Obraztsova St.), Author ID: 1040652, <https://orcid.org/0000-0002-6530-8116>

ВКЛАД АВТОРОВ

Алексей Алексеевич ЛОКТЕВ. Постановка целей и задач исследования, общее руководство исследованием, написание текста статьи (50%).

Ирина Викторовна ШИШКИНА. Выполнение расчетов и редактирование текста статьи (50%).

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Alexey A. LOKTEV. Setting the aims and objectives of the study, overall management of the study, article writing (50%).

Irina V. SHISHKINA. Calculations and article editing (50%).

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The authors have read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию 02.10.2024, рецензия от первого рецензента получена 04.11.2024, рецензия от второго рецензента получена 11.11.2024, рецензия от третьего рецензента получена 18.11.2024, принята к публикации 20.11.2024.

The article was submitted 02.10.2024, first review received 04.11.2024, second review received 11.11.2024, third review received 18.11.2024, accepted for publication 20.11.2024.

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Оригинальная статья

УДК 629.423.14

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

Анализ энергетических затрат на выполняемую электровозами маневровую работу

К. М. Попов✉

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Задачу повышения энергетической эффективности маневровой работы на электрифицированных станциях с научной точки зрения целесообразно решать путем постепенной замены маневровых тепловозов на перспективные контактно-аккумуляторные маневровые электровозы. При обсуждении вопроса об использовании таких локомотивов важно учесть достигнутые в эксплуатации показатели энергозатрат при выполнении маневровой работы магистральными электровозами существующих серий.

Материалы и методы. Использованы статистические методы для анализа данных о расходе электроэнергии из маршрутов машиниста за 2023 г. Выполнена обработка данных от бортовых комплексов регистрации у электровозов, задействованных в маневровой работе, по отдельным рабочим сменам машиниста. Исследовалась связь энергозатрат на выполнение маневровой работы с температурой атмосферного воздуха.

Результаты. Определены особенности расхода электроэнергии при выполнении электровозами маневровой работы, показаны результаты эксплуатации различных серий электровозов в части энергопотребления. Учен фактор температуры воздуха при нормировании электроэнергии на маневры, предложен порядок расчета нормативного расхода электроэнергии с использованием данных бортовых комплексов регистрации.

Обсуждение и заключение. Полученные в исследовании результаты позволили определить диапазон значений расхода электроэнергии на маневровую работу, выполняемую электровозами в текущих условиях эксплуатации. Отмеченный широкий диапазон нагрузок на маневровой работе должен учитываться при разработке перспективных маневровых электровозов. Актуальность их создания связана в том числе с неполным соответствием характеристик используемых магистральных электровозов особенностям маневровой работы. В части последних важным является обоснованный выбор наиболее подходящей для маневровой работы серии.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: маневровая работа, электровоз, часовой расход электроэнергии, маршрут машиниста, коэффициент влияния температуры, нормирование, бортовые комплексы регистрации

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Попов К. М. Анализ энергетических затрат на выполняемую электровозами маневровую работу // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2024. Т. 83, № 4. С. 319–335.

✉ popov.kirill@vniizht.ru (К. М. Попов)

© Попов К. М., 2024



TECHNICAL MEANS OF RAILWAY TRANSPORT

Original article

UDK 629.423.14

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



Analysis of energy costs for shunting operations performed by electric locomotives

Kirill M. Popov✉

Railway Research Institute,
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Scientifically, energy efficiency of shunting operations at electrified stations should be improved by gradual replacement of diesel shunters with advanced contact-accumulator electric shunters. The discussion of the use of such locomotives should take into account the power consumption figures achieved by mainline electric locomotives of the existing series in shunting operations.

Materials and methods. The paper uses statistical methods to analyse power consumption on driver's routes for 2023 and processes registered on-board data of electric locomotives involved in shunting operations for individual driver's shifts. The work investigates the relationship between power consumption for shunting operations and atmospheric air temperature.

Results. The paper determines the peculiarities of power consumption in shunting operations of electric locomotives, and provided power consumption figures in operation of different series of electric locomotives. The work considers the air temperature factor when rationing electricity for shunting, and proposes an on-board data based procedure for power consumption rationing.

Discussion and conclusion. The study indicates the range of power consumed by electric locomotives for shunting operations under current operating conditions. This wide range of shunting loads should be taken into account in the design of advanced electric shunters. The need for their creation is also caused by the incomplete correspondence between the characteristics of the mainline electric locomotives used and the shunting conditions. The latter also calls for a reasonable choice of the most suitable series for shunting work.

KEYWORDS: shunting operation, electric locomotive, hourly power consumption, driver schedule, temperature coefficient, rationing, on-board registration complexes

FOR CITATION: Popov K. M. Analysis of energy costs for shunting operations performed by electric locomotives. *Russian Railway Science Journal*. 2024;83(4):319-335. (In Russ.).

✉ popov.kirill@vniizht.ru (K. M. Popov)

© Popov K. M., 2024

Введение. Для выполнения маневровой работы на станциях в большинстве случаев используются автономные локомотивы. Это связано с отсутствием контактного провода над всеми путями станций, на которых может потребоваться выполнение маневровых операций. Однако немало крупных станций электрифицировано практически полностью, что позволяет выполнять основную долю маневровой работы с использованием энергетически и экономически более выгодной электрической тяги [1]. В последние годы ведущие ученые отрасли предлагают возобновить производство контактно-аккумуляторных маневровых электровозов [2–5], первый опыт использования которых в 60-е гг. [6] показал их значительные преимущества. К сожалению, существовавший на тот момент уровень развития техники не позволил перейти к массовому использованию таких локомотивов. При этом существует практикуемый вплоть до настоящего времени опыт использования магистральных электровозов для маневровой работы, результаты которого изучены недостаточно. В настоящем исследовании предпринята попытка восполнить данный пробел.

При планировании и анализе выполнения маневровой работы существенную роль играет контроль связанных с этим энергозатрат. И если для автономной тяги данный вопрос в методическом плане в значительной мере проработан [7–10], то в плане электрической тяги существуют только усредненные часовые нормативы расхода электроэнергии по сериям¹, которые не учитывают возможной неравномерности заданий по переработке вагонов на станциях (как суточной, так и в течение более длительных периодов времени). Анализ данных в маршрутах машиниста из автоматизированной системы централизованной обработки маршрутов машиниста (АС ЦОММ) за период с января по декабрь 2023 г., выполненный в рамках исследования, показал, что в настоящее время часовой расход электроэнергии на маневровую работу для разных станций может отличаться более чем в 6,5 раза. В современных условиях, когда требования к энергоэффективности перевозочного процесса ужесточаются, необходимы более точные оценки текущих энергозатрат. Последние могут быть получены с использованием данных от бортового комплекса регистрации параметров работы электровоза.

В настоящей статье рассматриваются результаты анализа существующих затрат электроэнергии на маневровую работу и подходы к оценке и нормированию расхода электроэнергии при ее выполнении.

Теоретические предпосылки. Расчетный расход электроэнергии при маневровой работе. Расчетный расход электроэнергии на маневровую работу принципиально может быть получен двумя способами. Первый связан с выполнением специализированных тяговых расчетов^{2, 3} [7, 11], второй основан на предварительно полученных аналитических выражениях, используемых при известной касательной мощности, реализуемой локомотивом, или известной массе маневрового состава [6]. В части первого способа стоит отметить сферу действия существующих методик, ограниченную исключительно дизельной тягой, а также значительную трудоемкость выполнения расчетов, даже при наличии специализированного комплекса программ. Актуальность адаптации методики тяговых расчетов для электрической тяги не очевидна. Например, опыт внедрения обоснованных норм расхода топлива для маневровых тепловозов в депо Свердловск-Сортировочный на основе расчетов по Методике⁴ описан в [12].

Следует обратить особое внимание на приведенный в данной статье перечень основных подготовительных этапов, необходимых до начала расчетов, а именно:

- определение параметров работы маневрового района и разработка нескольких типовых моделей операций, определяющих загрузку тепловоза по массе составов, количеству вагонов, числу маневровых полурейсов и их длине, распределению частоты этих операций;
- описание профиля, плана и стрелочных путей маневрового района, создание справочников путей маневровых операций, частоты передвижения по путям и определения частоты типовых операций по каждому пути.

Как видно, объем подготовительной работы, особенно в части создания нормативно-справочной информации (НСИ) по плану и профилю станционных путей, до начала выполнения расчетов довольно значительный и требует соответствующих немалых трудовых и финансовых затрат. То есть данный способ применим там, где подготовительные работы уже выполнены, например на станциях, где внедрена система маневровой автоматической локомотивной сигнализации (МАЛС).

¹ Инструкция по техническому нормированию расхода электрической энергии и топлива тепловозами на тягу поездов: № ЦТ-2564 / Главное управление локомотивного хозяйства МПС. М.: Транспорт, 1968. 48 с.

² Методика тяговых расчетов для маневровой работы: № ЦДЛ-21: утв. начальником главного управления движением МПС СССР 15.12.1987. М., 1988.

³ Методика тяговых расчетов для маневровой работы [Электронный ресурс]: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 30.01.2017 № 181р. Доступ из АСПИЖТ.

⁴ Методика тяговых расчетов для маневровой работы: № ЦДЛ-21.

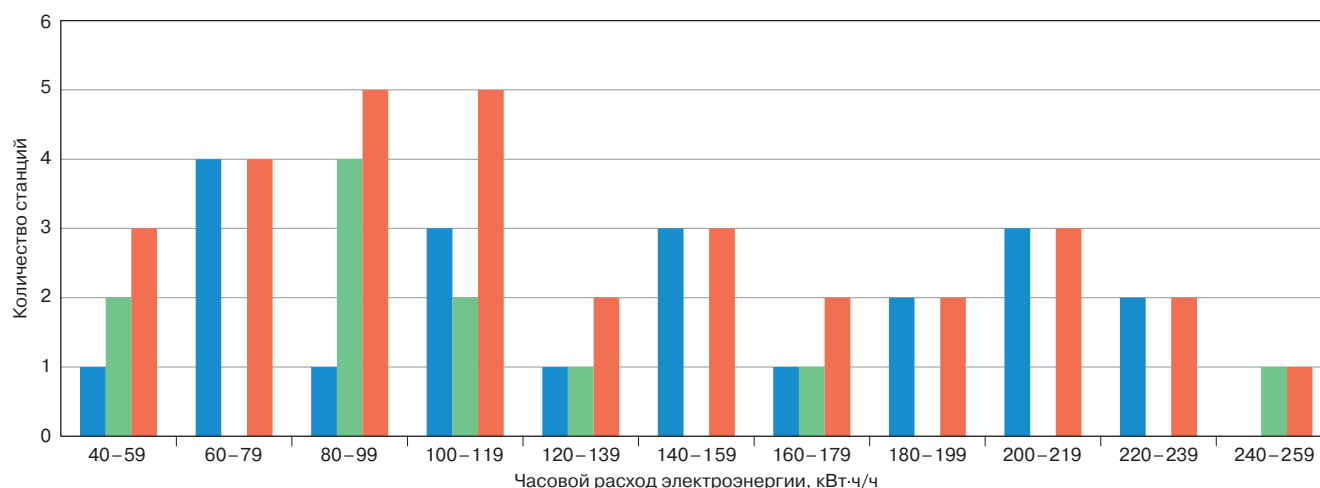


Рис. 1. Распределение количества станций по расходу электроэнергии при выполнении маневровой работы, ед.
 — электровозы постоянного тока; — электровозы переменного тока; — суммарно

Fig. 1. Distribution of stations by power consumption for shunting operations, pcs.
 — DC locomotives; — AC locomotives; — total

В Инструкции⁵ приведены нормы часового расхода электроэнергии в функции от часовой переработки вагонов без разбивки по сериям электровозов. При диапазоне изменения последней от 10 до 300 вагонов/ч норма составляет от 54 до 105 кВт·ч/ч.

Несмотря на то что суточная переработка вагонов является важным показателем работы сортировочной горки, данные об этой переработке отсутствуют в отчетности локомотивного комплекса и требуют использования формы внутренней статистической отчетности по хозяйству перевозок ДО-24ВЦ. Для этого необходима дополнительная интеграция информационных систем хозяйства перевозок и локомотивного комплекса. Отсутствие использования данного показателя при анализе расхода электроэнергии при маневровой работе объясняется как указанными выше организационными затруднениями, так и наличием факта повторной переработки вагонов [13], которая по данным⁶ может достигать 30%. Кроме того, определенная доля маневровой работы производится электровозами также и вне сортировочных горок.

Другим документом, оговаривающим затраты электроэнергии на маневровую работу, являются Правила тяговых расчетов⁷ (ПТР). В пункте 2.4.5 приведены усредненные затраты электроэнергии на 1 ч маневровой работы на станциях для электровозов постоянного тока — 100 кВт·ч и для электровозов переменного тока — 200 кВт·ч. При этом указано, что нормативы должны устанавливаться с учетом местных условий.

На рис. 1 представлено распределение количества станций, на которых маневровая работа выполняется электровозами, по часовому расходу электроэнергии, в т. ч. с разбивкой по роду тока.

Данные получены на основе обработки маршрутов машиниста за период с января по декабрь 2023 г., общий объем выборки — более 10 000 маршрутов. Отметим, что в выборку не включены данные по маневрам, выполняемым электровозами на ветвях необщего пользования и при депо. Из рисунка видно, что разброс часового расхода электроэнергии составляет от 40 до 260 кВт·ч, причем для электровозов постоянного тока распределение достаточно равномерное, а для электровозов переменного тока большее количество случаев соответствует часовому расходу до 120 кВт·ч. Полученные данные подтверждают необходимость разработки более актуальных и детализированных нормативов, нежели существующие.

Краткий анализ особенностей работы электровозов разных серий, используемых при маневровой работе на станциях. Важным моментом, определяющим энергоэффективность выполнения маневровой работы, является выбор используемой серии локомотива. Информация по задействованным на маневровой работе электровозам, полученная на основе обработки упомянутой выше выборки по маршрутам машиниста, приведена в табл. 1. Данные в этой таблице отсортированы по убыванию среднего по станции расхода электроэнергии за смену работы машиниста.

⁵ Инструкция по техническому нормированию расхода электрической энергии и топлива тепловозами на тягу поездов: № ЦТ-2564.

⁶ Швец Н. Г. Способы сокращения повторно перерабатываемых и угловых вагонопотоков на сортировочных станциях: дис. ... канд. техн. наук / БелИИЖТ. [Б. м.], 1984. 203 с.

⁷ Правила тяговых расчетов для поездной работы: утв. распоряжением от 12.05.2016 № 867р (в ред. распоряжения от 09.02.2018 № 182/р) [Электронный ресурс]. М., 2016. 516 с. Доступ из АСПИЖТ.

Таблица 1

Данные по задействованным для маневровой работы электровозам

Table 1

Electric locomotive shunting data

Станция	Парк*	Серия электровоза	Бортовой номер**	Календарные месяцы работы в 2023 г.	Средний за рабочую смену расход электроэнергии, кВт·ч	
					по парку	по станции
Ачинск-1	1	ВЛ80 ^P	Разные	1–12	2695	2695
Пермь-Сортировочная	6	ВЛ11	Разные	1–12	2383	2383
Березники	2	ВЛ11	Разные	1–12	2486	2315
	2	ВЛ11 ^M	Разные	1, 3–8, 10–12	2549	
	4	ВЛ11	Разные	4–12	2415	
	4	ВЛ11 ^M	Разные	4–7, 11–12	2378	
	1	ВЛ11	Разные	1–12	2050	
	1	ВЛ11 ^M	Разные	1–12	2013	
Челябинск-Главный	3	ВЛ10 ^K	Разные	1–12	1970	1970
Муром-1	1	ВЛ80 ^C	Разные	2–12	1848	1848
Бердяуш	1	ВЛ10 ^{УК}	238	1–10	1500	1559
	1	2ЭС6	Разные	7, 9–12	1618	
Рузаевка	7	ВЛ10 ^K	1095	1–8	1696	1459
	7	ВЛ10 ^У	23, 121, 187	6, 9–12	1222	
Дёма	1	ВЛ10 ^У	Разные	1–12	1747	1303
	2	ВЛ10 ^У	Разные	1–12	1165	
	3	ВЛ10 ^У	Разные	1–12	997	
Куйбас	1	ВЛ80 ^{ТК}	Разные	1–12	1283	1283
Тайшет	3	ВЛ65	Разные	1–12	1418	1196
	2	ВЛ65	Разные	1–12	974	
Лоста	2	ВЛ80 ^C	665	1–12	1109	1109
Магнитогорск-Грузовой	1	ВЛ80 ^C	Разные	1–12	980	1010
	1	ВЛ80 ^{СК}	Разные	1–7, 9–12	993	
	1	ВЛ80 ^{ТК}	Разные	1–12	1058	
Екатеринбург-Сортировочный	6	2ЭС6	3, 10, 92	1–5, 11–12	1191	774
	6	2ЭС10	Разные	4–12	449	
	7	ВЛ11 ^K	77	1–7	681	
Кропачёво	1	2ЭС6	Разные	1–12	728	728
Смычка	2	ВЛ11 ^K	17	1–12	691	691
Вихоревка	1	ВЛ65	Разные	4, 9–11	780	687
	2	ВЛ65	Разные	6, 9–11	594	
Металлургическая	1	2ЭС6	Разные	1, 3–12	752	658
	1	ВЛ10 ^K	1543	1–5	565	
Карталы-2	11	ВЛ80 ^{ТК}	Разные	1–12	532	532
Златоуст	1	2ЭС6	1311 в январе — марте и мае — сентябре. В остальные месяцы — разные	1–12	490	490

* Здесь и далее номер парка соответствует НСИ системы АС ЦОММ.

** Конкретные бортовые номера указаны при их количестве 3 и менее.

Из табл. 1 видно, что перечень серий электровозов, задействованных в маневровой работе, достаточно разнообразный. Представлены электровозы обоих родов тока и разных поколений. В основном используются серии электровозов ВЛ10, ВЛ11 и ВЛ80, эпизодически встречаются серии 2ЭС6, ВЛ65 и 2ЭС10.

Имеются случаи использования для маневровой работы электровоза конкретного бортового номера — ВЛ80^С-665 (станция Лоста, весь 2023 г.), ВЛ10^К-1543 (станция Металлургическая, январь—май 2023 г.) и ВЛ10^К-1095 (станция Рузаевка, январь — август 2023 г.), ВЛ11^К-17 (станция Смычка, весь 2023 г.) и ВЛ11^К-77 (станция Екатеринбург-Сортировочный, январь — июль 2023 г.), ВЛ10^{УК}-238 (станция Бердяуш, январь — октябрь 2023 г.), 2ЭС6-1311 (станция Златоуст, январь — март и май — сентябрь 2023 г.). Особенностью маневровой работы (в данном случае горочной) на станции Лоста является использование секций электровоза ВЛ80^С-665, работающих по отдельности. Отметим при этом сопоставимость значений силы тяги при трогании с места секции ВЛ80^С (339 кН) и наиболее распространенных маневровых тепловозов: ЧМЭЗ — 362 кН, ТЭМ18ДМ — 319 кН.

На станции Вихоревка использование электровозов при маневровой работе практикуется не круглодично, а в определенные временные отрезки. Этому сопутствует небольшой средний расход электроэнергии за рабочую смену — около 700 кВт·ч.

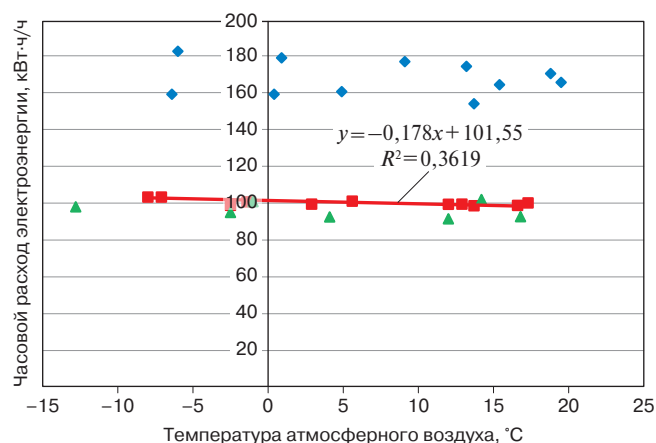


Рис. 2. Данные по часовому расходу электроэнергии для электровоза ВЛ80^С:

- ◆ — Муром-1, парк 1; ■ — Лоста, парк 2;
- ▲ — Магнитогорск-Грузовой, парк 1

Fig. 2. Hourly power consumption for electric locomotive VL80^S:

- ◆ — Murom-1, Fleet 1; ■ — Losta, Fleet 2;
- ▲ — Magnitogorsk-Freight, Fleet 1

Отметим, что в большинстве случаев электровозы используются при горочной работе для надвига и выпуска составов и без возможности использования в подгорочном парке из-за отсутствия контактной сети на спускной части сортировочных горок. Однако имеются случаи использования электровозов и для перестановочных маневров, а также технологических маневровых передвижений при депо.

Для ряда станций в 2023 г. произошла смена серий задействованных электровозов. Например, на станции Металлургическая серию ВЛ10^К заменили на 2ЭС6. При этом сравнение среднего расхода по сериям некорректно как по причине разных периодов времени работы, так и из-за использования конкретного бортового номера ВЛ10^К, погрешность счетчика электроэнергии которого неизвестна. Также замена серии электровоза произведена на станции Рузаевка — ВЛ10^К на ВЛ10^У, на станции Бердяуш — ВЛ10^{УК} на 2ЭС6. На станции Екатеринбург-Сортировочный в 2023 г. в разных парках на маневрах были задействованы серии 2ЭС6, 2ЭС10, ВЛ11^К. При замене электровоза 2ЭС6 на 2ЭС10 средний расход электроэнергии снизился более чем в 2,6 раза. Однако очевидно, что использование достаточно современных электровозов серии 2ЭС10 на маневровой работе оправдано только при отсутствии их востребованности для магистральной работы, связанной, например, с их локальным избыточным наличием в рабочем парке.

Результаты обработки статистических данных по расходу электроэнергии при маневровой работе. Статистическая обработка данных по расходу электроэнергии на маневрах заключалась в получении средних за период (месяц и год) значений данного расхода с исключением значений расхода по маршруту машиниста, выходящих за диапазон $\pm 3\sigma$, а также в определении средних за период значений коэффициента вариации V . В последующем для однородных совокупностей, т. е. в случаях, когда значения V не превышают 0,33, были построены зависимости часового расхода электроэнергии при маневрах от температуры атмосферного воздуха (рис. 2–8). Значения температуры были получены из общедоступного архива погоды⁸.

Как видно из рис. 2–8, корреляция между этими двумя параметрами присутствует не во всех случаях. Там, где она присутствует, на графиках приведены уравнения регрессионных зависимостей. Полученные коэффициенты влияния температуры (табл. 2) находятся в диапазоне от $-0,178$ до $-1,312$ (кВт·ч/ч)/°C, т. е. крайние значения отличаются более чем в 7 раз.

⁸ Расписание погоды rp5.ru [Электронный ресурс]. URL: <https://rp5.ru/> (дата обращения: 29.08.2024).

Анализируя результаты на рис. 2–8 и в табл. 2, нужно учитывать, что зависимости расхода электроэнергии от температуры во многом определяются соотношением среднего часового расхода электроэнергии, характеризующего среднее значение используемой мощности электровоза и мощности его собственных нужд, а также характеристиками приборов учета расхода электроэнергии. Из табл. 2 видно, что практически все значения коэффициента влияния температуры получены для значений часового расхода электроэнергии менее 100 кВт·ч/ч, кроме случая работы ВЛ80^Р (станция Ачинск-1). В последнем

случае отметим несколько большую мощность собственных нужд у ВЛ80^Р по сравнению с ВЛ80^С и ВЛ80^Т (согласно ПТР). Однако в данном случае не стоит исключать и тот факт, что управление режимом работы наиболее энергоемких потребителей собственных нужд электровозов ВЛ80 — мотор-вентиляторов — осуществляется машинистами в ручном режиме. Очевидно, что если потребители собственных нужд при работе электровоза включены постоянно, то их мощность практически неизменна в разные периоды года, отличающиеся значениями температуры атмосферного воздуха.

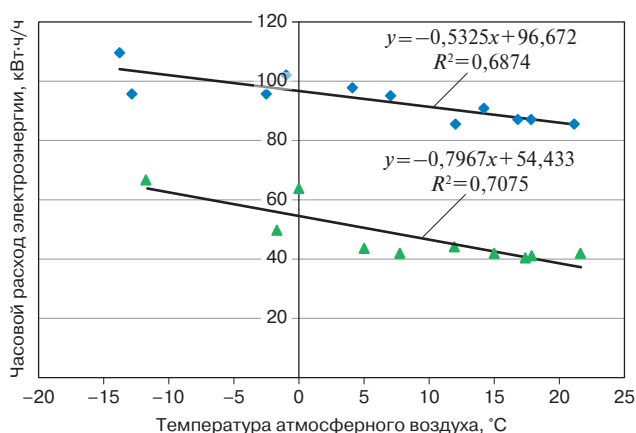


Рис. 3. Данные по часовому расходу электроэнергии для электровоза ВЛ80^{ТК}:
♦ — Магнитогорск-Грузовой, парк 1; ▲ — Карталы-2, парк 11

Fig. 3. Hourly power consumption for electric locomotive VL80^{TK}:

♦ — Magnitogorsk-Freight, Fleet 1; ▲ — Kartaly-2, Fleet 11

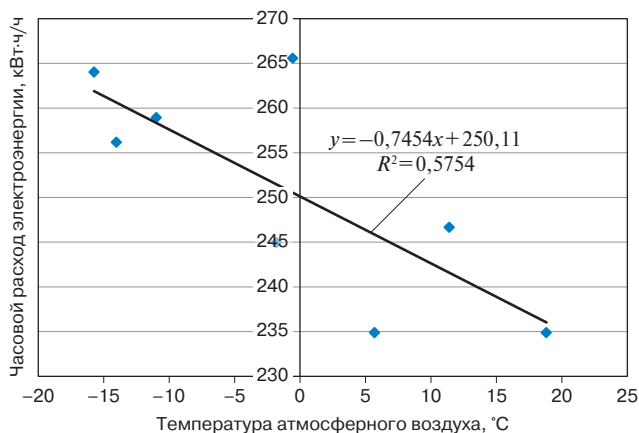


Рис. 4. Данные по часовому расходу электроэнергии для электровоза ВЛ80^Р:
♦ — Ачинск-1, парк 1

Fig. 4. Hourly power consumption for electric locomotive VL80^R:

♦ — Achinsk-1, Fleet 1

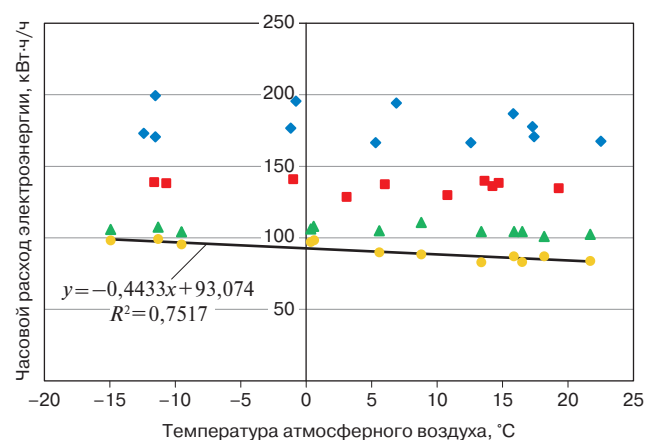


Рис. 5. Данные по часовому расходу электроэнергии для электровоза ВЛ10:
♦ — Челябинск-Главный, парк 3; ■ — Бердяуш, парк 1; ▲ — Дёма, парк 2; ● — Дёма, парк 3

Fig. 5. Hourly power consumption for electric locomotive VL10:

♦ — Chelyabinsk-Main, Fleet 3; ■ — Berdyush, Fleet 1; ▲ — Dyoma, Fleet 2; ● — Dyoma, Fleet 3

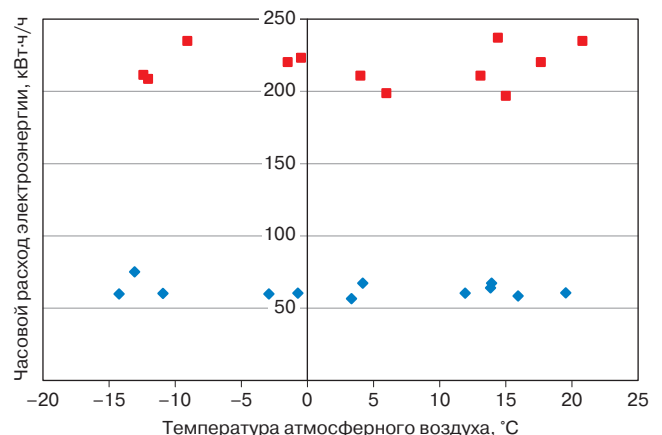


Рис. 6. Данные по часовому расходу электроэнергии для электровоза ВЛ11:
♦ — Смышка, парк 2; ■ — Пермь-Сортировочная, парк 6

Fig. 6. Hourly power consumption for electric locomotive VL11:

♦ — Smychka, Fleet 2; ■ — Perm-Marshalling, Fleet 6

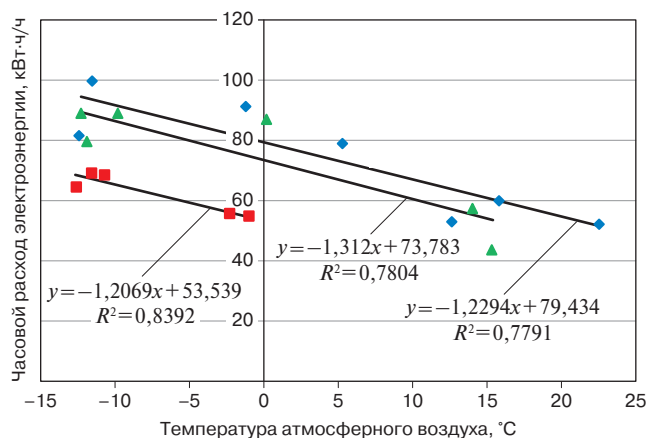


Рис. 7. Данные по часовому расходу электроэнергии для электровоза 2ЭС6:
 ◆ — Metallurgicheskaya, парк 1; ■ — Златоуст, парк 1;
 ▲ — Кропачёво, парк 1

Fig. 7. Hourly power consumption for electric locomotive 2ES6:
 ◆ — Metallurgicheskaya, Fleet 1; ■ — Zlatoust, Fleet 1;
 ▲ — Kropachyovo, Fleet 1

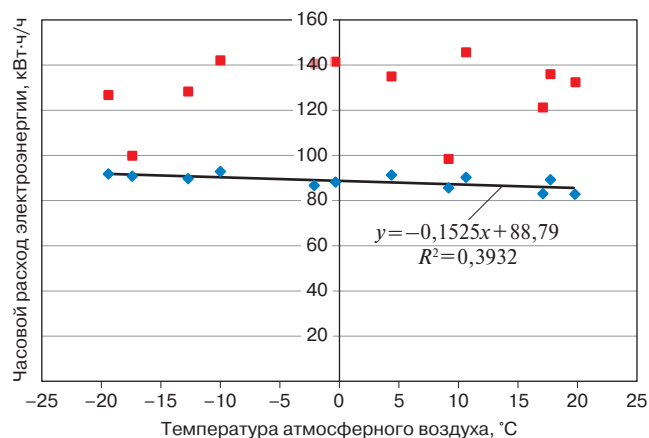


Рис. 8. Данные по часовому расходу электроэнергии для электровоза ВЛ65:
 ◆ — Тайшет, парк 2; ■ — Тайшет, парк 3

Fig. 8. Hourly power consumption for electric locomotive VL65:
 ◆ — Tayshet, Fleet 2; ■ — Tayshet, Fleet 3

Таблица 2

Результаты статистической обработки данных о расходе электроэнергии при маневрах

Table 2

Results of statistical processing of data on power consumption in shunting

Серия электровоза	Станция	Парк	Часовой расход электроэнергии, кВт·ч		Коэффициент вариации V		Коэффициент влияния температуры на расход электроэнергии, (кВт·ч/ч)/°C
			Среднее за год значение	Разброс по месяцам	Среднее значение*	Менее 0,33	
ВЛ10 ^к	Челябинск-Главный	3	179	167–199	0,12	Да	—
ВЛ10 ^у	Дёма	1	138	118–207	0,28	Не все точки	—
		2	106	101–110	0,23	Да	—
		3	85,9	81,5–99,8	0,28	Да	–0,443
ВЛ10 ^{ук}	Бердяуш	1	136	129–141	0,07	Да	—
ВЛ11	Березники	1	—	124–229	0,4	Нет	—
		2	—	145–281	0,39	Нет	—
	Пермь-Сортировочная	6	221	194–237	0,19	Да	—
ВЛ11 ^к	Смычка	2	62,8	57,3–75,6	0,18	Да	—
ВЛ11 ^м	Березники	2	—	143–312	0,37	Нет	—
2ЭС6	Кропачёво	1	—	44,4–89,6	0,34	Не все точки	–1,312
	Златоуст	1	—	17,5–69,9	0,44	Не все точки	–1,21
	Металлургическая	1	55,4	45,9–99,6	0,29	Не все точки	–1,229
ВЛ80 ^р	Ачинск-1	1	239	227–266	0,23	Не все точки	–0,745
ВЛ80 ^с	Муром-1	1	168	154–183	0,17	Да	—
	Лоста	2	99,3	97–105	0,08	Да	–0,178
ВЛ80 ^{ск}	Магнитогорск-Грузовой	1	95	73,2–103	0,22	Не все точки	—
ВЛ80 ^{тк}	Магнитогорск-Грузовой	1	87,1	85,4–124	0,28	Не все точки	–0,532
	Куйбас	1	—	105–137	0,45	Нет	—
	Карталы-2	11	42,4	40,5–67,5	0,26	Не все точки	–0,797
ВЛ65	Тайшет	2	87,3	82,8–92,4	0,22	Да	–0,152
	Тайшет	3	129	97,4–146	0,26	Да	—

* По индивидуальной в каждом случае совокупности месяцев, для которых значение коэффициента вариации не превышает 0,33 при наличии таких месяцев. При их отсутствии — простое среднее.

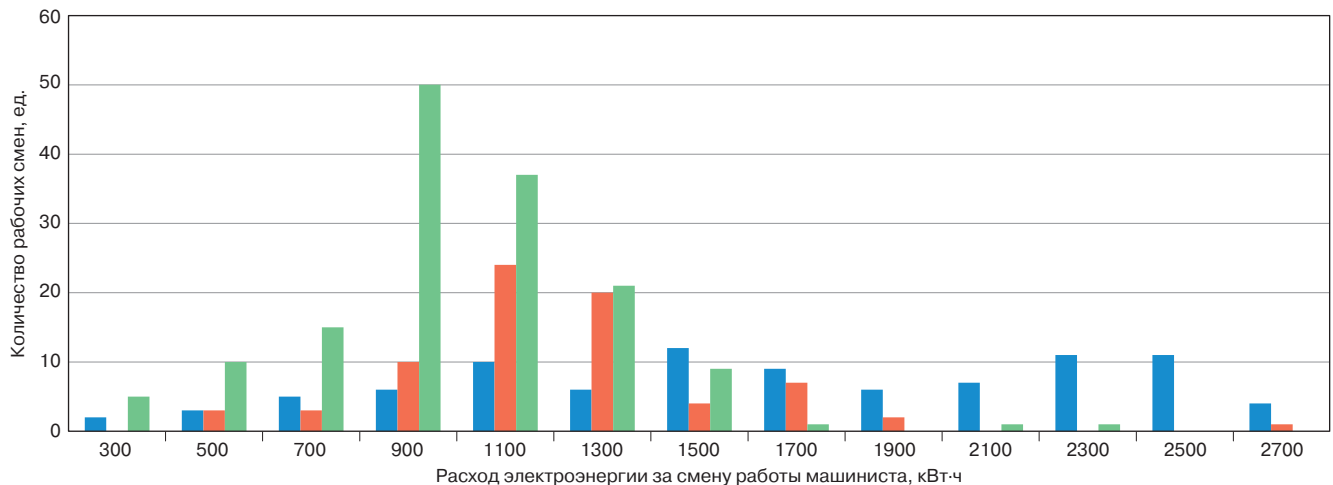


Рис. 9. Распределение количества рабочих смен по расходу электроэнергии на маневры для станции Дёма в июле 2023 г.:
■ — парк 1; ■ — парк 2; ■ — парк 3

Fig. 9. Distribution of work shifts by power consumption for shunting operations for Dyoma Station in July 2023:
■ — Fleet 1; ■ — Fleet 2; ■ — Fleet 3

Что касается электровозов постоянного тока, то показательным является наличие наибольших значений коэффициента влияния температуры у электровозов серии 2ЭС6, на которых установлены высокоточные приборы учета расхода электроэнергии, тогда как для электровозов ВЛ10 и ВЛ11 влияние температуры на расход электроэнергии отмечено только в третьем парке станции Дёма, с умеренным часовым расходом — 85,9 кВт·ч/ч. При этом известно, что на электровозах ВЛ10 и ВЛ11, не модернизированных установкой систем РПДА (система, предназначенная для автоматизированного сбора, регистрации и обработки информации о движении и работе локомотива с целью контроля, учета работы и расхода электроэнергии, технического состояния оборудования и энергетической эффективности в эксплуатации), штатные счетчики из-за имеющейся погрешности не позволяют полноценно учитывать расход электроэнергии на собственные нужды при отсутствии тягового режима.

Не вызывает сомнения, что коэффициент вариации расхода электроэнергии V в определенной степени характеризует неравномерность загрузки маневрового электровоза. В июле 2023 г. для станции Дёма в первом парке среднее значение V составило 0,402, во втором парке — 0,257 и в третьем парке — 0,306. На рис. 9 приведено распределение рабочих смен по расходу электроэнергии для указанных случаев. Видно, что распределение в первом парке, с наибольшим значением V , многомодальное, а значит, среднее за месяц значение расхода электроэнергии плохо отражает совокупность данных по маршрутам машиниста и не может считаться типичной характеристикой.

По этой причине в табл. 2 средние за год значения часового расхода электроэнергии приведены только для случаев, где V менее 0,33; для остальных случаев возможно использование только диапазона изменения этой величины по месяцам.

Обобщая вышесказанное, отметим, что учет влияния температуры при нормировании расхода электроэнергии на маневры должен быть не безусловным и единым для всех случаев, а дифференцированным, предпочтительно на основе коэффициентов влияния, полученных индивидуально, путем обработки статистических данных, что в части пригородного движения подтверждают и другие исследователи [14].

Особенности энергопотребления при выполнении маневровой работы электровозами. Как было отмечено ранее, аналитический способ расчета расхода электроэнергии подразумевает определение суточного расхода электроэнергии, кВт·ч, на основе предварительно полученных зависимостей для расчетных маневровых режимов. Например, для перестановочных маневров со сменой направления движения суточный расход электроэнергии в [6] предлагается определять на основе зависимости

$$A_{MC} = 150 + 1,9Q, \quad (1)$$

где Q — масса маневрового состава при подаче, т.

Выражение (1) в качестве единственной переменной содержит массу состава вагонов, фактические значения которой в эксплуатации не фиксируются. Данное выражение было предложено для электровозов переменного тока. Для электровозов постоянного тока с реостатным пуском дополнительно должны быть учтены пусковые потери. Ниже приведено

выражение для определения расхода электроэнергии, связанного с потерей напряжения в пусковых реостатах, кВт·ч/пуск, полученное преобразованием выражения из [6] путем подстановки вместо касательной мощности (л. с.) потребляемой мощности (кВт):

$$A_n = \frac{1,126 N_n^2 K_n}{1000 P \psi_k \left(\frac{1000 P \psi_k}{P + Q} - w \right)}, \quad (2)$$

где N_n — потребляемая мощность электровоза, кВт; K_n — коэффициент пуска, равный отношению потерь в реостатах электроэнергии к полезной работе; P — сцепная масса электровоза, т; ψ_k — коэффициент сцепления (для маневров рекомендован на уровне 0,28 при трогании с места и на уровне 0,25 при движении [6]); w — основное удельное сопротивление движению, кгс/тс (среднее значение с учетом кривых участков пути и на стрелках при скоростях до 30 км/ч оценено [6] величиной порядка 3 кгс/тс, или 29,4 Н/т).

Таблица 3

Потери электроэнергии для электровозов постоянного тока на один пуск при маневровых передвижениях, кВт·ч

Table 3

DC locomotive power loss for one start in shunting operations, kW·h

Q, т	N _n , кВт		
	1000 (ВЛ10)	1000 (ВЛ10 ^у , 2ЭС6)	1500 (2ЭС6)
1000	0,7	0,6	1,3
3000	2,1	1,8	4
4500	3,6	2,9	6,6
6000	5,5	4,4	10

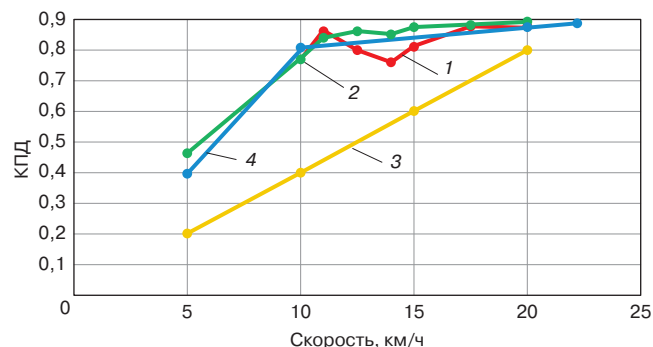


Рис. 10. Зависимость КПД от скорости для электровозов постоянного тока:
1 — ВЛ10; 2 — ВЛ10^у; 3 — ВЛ11; 4 — 2ЭС6

Fig. 10. Efficiency dependence on speed for DC locomotives:
1 — VL10; 2 — VL10^u; 3 — VL11; 4 — 2ES6

Пуск электровозов постоянного тока с реостатным регулированием, используемых на маневровой работе, при наиболее характерных скоростях до 20 км/ч будет одноступенчатым, соответственно $K_n = 1$. Потребляемую мощность с учетом тяговых характеристик на С-соединении для упомянутых серий электровозов примем на уровне 1000–1500 кВт.

В табл. 3 приведены результаты расчета потери электроэнергии на один пуск для используемых в настоящее время на маневрах серий электровозов.

Данные табл. 3 показывают порядок абсолютных значений потерь и позволяют при наличии информации о количестве маневровых передвижений определить долю пусковых потерь в общем расходе электроэнергии на маневры электровозами постоянного тока с реостатным пуском.

Из (2) видно, что снижение пусковых потерь возможно при увеличении сцепной массы и коэффициента сцепления, преимущественном использовании электровозов с многоступенчатым пуском и снижении касательной мощности. Соответственно, при наличии в эксплуатируемом парке разных серий электровозов предпочтительно, например, использование электровозов ВЛ10^у вместо ВЛ10 и ВЛ11. Использование электровозов новых серий, без реостатного регулирования, как ранее указывалось, требует наличия их избытка в рабочем парке.

Отметим, что потери электроэнергии наглядно позволяет оценить характеристика изменения КПД от скорости движения локомотива, полученная по данным ПТР. На рис. 10 приведены упомянутые зависимости в зоне наиболее часто встречающихся при маневровой работе скоростей движения для используемых на маневрах электровозов постоянного тока. Из рисунка видно, что использование при маневровой работе электровозов ВЛ11 менее предпочтительно, что обусловлено особенностями их силовой электрической схемы.

На рис. 11 приведены зависимости, аналогичные рис. 10, для электровозов переменного тока. Как можно заметить, с точки зрения энергоэффективности предпочтительно использование на маневровых работах электровозов ВЛ180^р и 2ЭС5К.

В целом рис. 10 и 11 подтверждают достаточно подробно рассмотренные в [6] недостатки при использовании в маневровой работе магистральных электровозов, созданных для преимущественного движения в длительных режимах и с большими, чем при маневровой работе, значениями скорости.

Поскольку в повседневной практике расчеты по выражениям, аналогичным (1), осложнены отсутствием текущего значения массы маневрового состава, которая при надвиге состава на горку является еще и переменной величиной, возникает вопрос

о возможности получения нормативных характеристик энергозатрат косвенным путем (например, с использованием информации о средней массе поезда на участках, непосредственно прилегающих к станции выполнения маневровой работы). Такой анализ был выполнен на основе обработки маршрутов машиниста грузового движения депо Лоста, Ачинск-1 и Пермь за 2023 г. Для участков работы локомотивных бригад, граничащих (согласно их наименованию) со станциями маневровой работы Лоста, Ачинск-1 и Пермь, были определены средние по месяцам 2023 г. значения массы поезда по соответствующим совокупностям поездов. Далее в функции от этого параметра были построены зависимости часового расхода электроэнергии на маневры. Полученные результаты показали отсутствие приемлемой корреляции указанных параметров: во всех рассмотренных случаях значения коэффициента корреляции оказались менее 0,5. Данный факт говорит о том, что средняя масса поездов, прибывающих на станцию и отправляемых с нее, не в полной мере характеризует объем перерабатываемых на станции вагонов. Кроме того, на расход электроэнергии на маневры, помимо объема перерабатываемых вагонов, также влияют организация и технология маневровой работы. Стоит отметить и тот факт, что на отдельных сортировочных станциях до 40 % составов, приходящих в расформирование, имеют вагоны для перевозки опасных грузов 2 класса⁹. Для этих вагонов требуется выполнение дополнительной маневровой работы, что затрудняет использование характеристик составов, приходящих в расформирование, для нормирования расхода электроэнергии на маневровую работу.

Перспективы использования данных от бортовых комплексов регистрации для оценки расхода электроэнергии при маневрах. В существующей отчетности локомотивного комплекса по маршрутам машиниста маневровая работа характеризуется указанием станции ее выполнения, а для многопарковых станций дополнительно с указанием парка, временем работы и полученным на основе этого времени условным пробегом (один час маневров считают эквивалентным 5 км пробега). Очевидно, что эта информация носит довольно общий характер, не отражая объем выполненной работы, нормирование расхода электроэнергии при этом осуществляется от достигнутого и является в большей части формальностью. В дополнение к данным из маршрутов машиниста используемые на многих электровозах бортовые комплексы

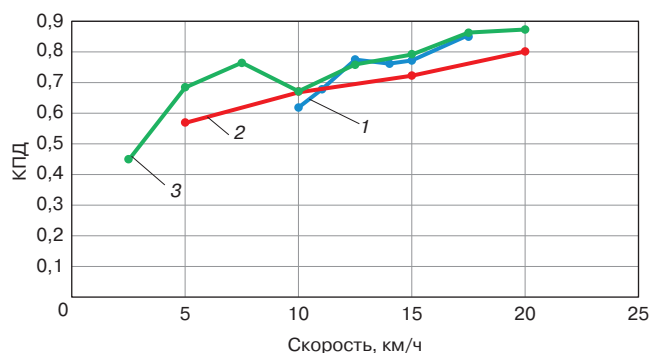


Рис. 11. Зависимость КПД от скорости для электровозов переменного тока:
1 — 2ЭС5К; 2 — ВЛ80^{СТ}; 3 — ВЛ80^Р

Fig. 11. Efficiency dependence on speed for AC locomotives:
1 — 2ES5K; 2 — VL80ST; 3 — VL80^R

регистрации параметров (БКРП) позволяют получить данные об изменении во времени скорости движения, географических координат, фактического пробега (нарастающим итогом), показаний счетчиков расхода электроэнергии с разбивкой по секциям.

Данные по координатам позволяют четко определить границы маневрового района, что при задействовании маневрового локомотива в разных парках станции и отличиях в них параметров потребления электроэнергии позволит дифференцировать соответствующие нормативы. Образец указания на карте перемещений электровоза 2ЭС6-326 при выполнении маневров 10.04.2024, зафиксированных в маршруте машиниста для станции Металлургическая, приведен на рис. 12. Расшифровка позволяет определить, что основная работа выполнялась на станции Новометаллургическая, с заездом на станцию Металлургическая и на ветвь по направлению к станции Межозёрная. Суммарный фактический пробег составил 32,4 км. При этом условный пробег, соответствующий времени маневров из маршрута машиниста (11 ч 19 мин), составляет 56,6 км, что подтверждает условность данной величины.

Образцы расшифровок зарегистрированных параметров для маневровой работы на станциях Ачинск-1 и Лоста приведены на рис. 13–16. На рис. 13 представлено изменение регистрируемых параметров за полную рабочую смену машиниста при выполнении маневров электровозом ВЛ80^Р-1554 на станции Ачинск-1 13.04.2024. Рисунок позволяет увидеть такие характеристики, как скоростной диапазон, соотношение времени передвижений и стоянок, использованная

⁹ Методика аттестации железнодорожных станций с автоматизированными горками с позиции обеспечения безопасности при выпуске вагонов-цистерн для перевозки опасных грузов 2 класса с классификационным шифром 2112 и номерами ООН 1011, 1965, 1969, 1978 опасности (пропанобутановые смеси) [Электронный ресурс]: утв. ОАО «РЖД» от 15.12.2017 № 1339 (ред. от 20.02.2018). Доступ из АСПИЖТ.



Рис. 12. Образец указания маневровых передвижений электровоза 2ЭС6-326 на карте

Fig. 12. Sample indication of shunting movements of electric locomotive 2ES6-326 on the map

машинистом возможность асинхронного нагружения секций. На рис. 14 для этого же электровоза и станции отображены регистрируемые параметры за период с 20:06 по 21:47 15.04.2024. В данном случае более подробно видны конкретные циклы нагружения, соответствующие маневровым операциям, а также зафиксирован факт ручного управления работой мотор-вентиляторов при стоянке электровоза. Отметим, что период регистрации мощности определяется интенсивностью потребления электроэнергии и варьируется от 30 с до 3 мин в циклах нагружения и до 20 мин при стоянках. На рис. 15 показано изменение регистрируемых параметров за период с 16:52 по 17:03 15.04.2024. Здесь видно изменение скорости (в имеющихся данных отметки расположены через каждые 30 с) и средней за период регистрации мощности

при отдельном цикле передвижений с вагонами. Заметен момент перехода на выбег, а также разница на грузки по секциям электровоза.

На рис. 16 приведено изменение регистрируемых параметров за полную рабочую смену машиниста при выполнении горочных маневров электровозом ВЛ80^С-665/1 на станции Лоста 11.04.2024. По уровню зафиксированной средней за период регистрации мощности видно, что мотор-вентиляторы используемой на маневрах секции электровоза при стоянках практически постоянно выключены.

Результаты расчета интегральных показателей за рабочие смены маневровой работы, полученные при обработке данных регистрации БКРП, размещенных на исследуемых электровозах, представлены в табл. 4.

Расчетный нормативный расход электроэнергии за смену работы машиниста при маневрах (кВт·ч) предлагается определять из выражения

$$E_{P_M} = P_{дв} T_{дв} + P_{ст} T_{ст} k_t (10 - \tau), \quad (3)$$

где $P_{дв}$ — средняя потребляемая электровозом мощность при движении, кВт; $T_{дв}$ — суммарное (общее) время передвижений, ч; $P_{ст}$ — средняя потребляемая электровозом мощность при стоянке, кВт; $T_{ст}$ — суммарное (общее) время стоянок, ч; k_t — коэффициент влияния температуры атмосферного воздуха, (кВт·ч/ч)/°C; τ — температура атмосферного воздуха, °C.

Для электровозов, оборудованных исправными БКРП, используются значения $P_{дв}$ и $P_{ст}$, определенные в каждой рабочей смене; значения k_t и τ не учитываются. Для электровозов с отсутствием или неисправностью БКРП используются значения $P_{дв}$ и $P_{ст}$, усредненные по совокупности рабочих смен базового периода всех электровозов, задействованных для работы в данном маневровом районе. Также определяются значения среднего квадратического отклонения мощности. Данные базового периода, продолжительность которого должна быть выбрана опытным путем, ежесуточно обновляются. Значения $T_{дв}$ и $T_{ст}$ определяются в каждой рабочей смене по данным БКРП, а при их отсутствии — по данным приборов безопасности.

В процессе эксплуатации определяется расчетный расход электроэнергии по (3), который сравнивается с вписанным в маршруте машиниста значением расхода, с фиксацией экономии или перерасхода. Для электровозов, оборудованных исправными БКРП, также контролируется отклонение значений $P_{дв}$ и $P_{ст}$ в данной рабочей смене от усредненных по базовому периоду. Если данное отклонение превышает среднее квадратическое, необходимо проверить исправность БКРП.

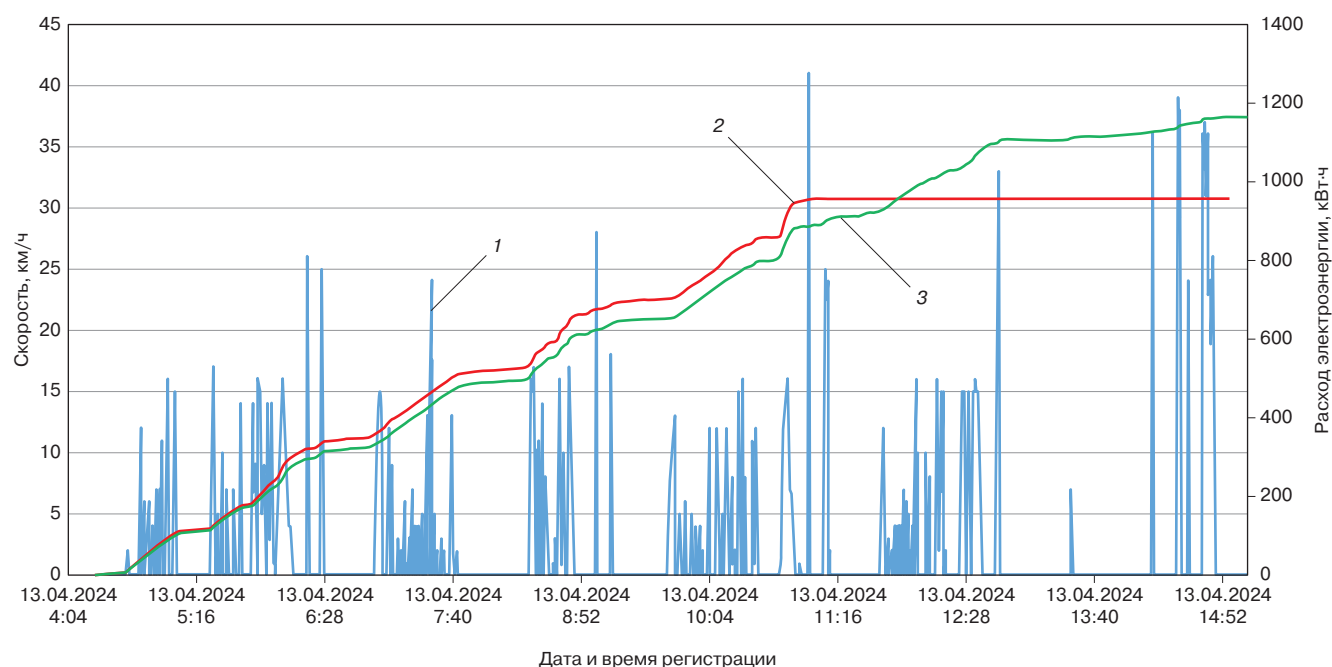


Рис. 13. Образец расшифровки данных регистрации при маневровой работе электровоза ВЛ80^Р-1554 на станции Ачинск-1 13.04.2024, с 4:04 по 14:52:

1 — скорость; 2 — расход электроэнергии секции 1; 3 — расход электроэнергии секции 2

Fig. 13. Sample transcript of registered data of shunting operation of electric locomotive VL80^R-1554 at Achinsk-1 Station 13.04.2024, from 4:04 to 14:52:

1 — speed; 2 — Section 1 power consumption; 3 — Section 2 power consumption

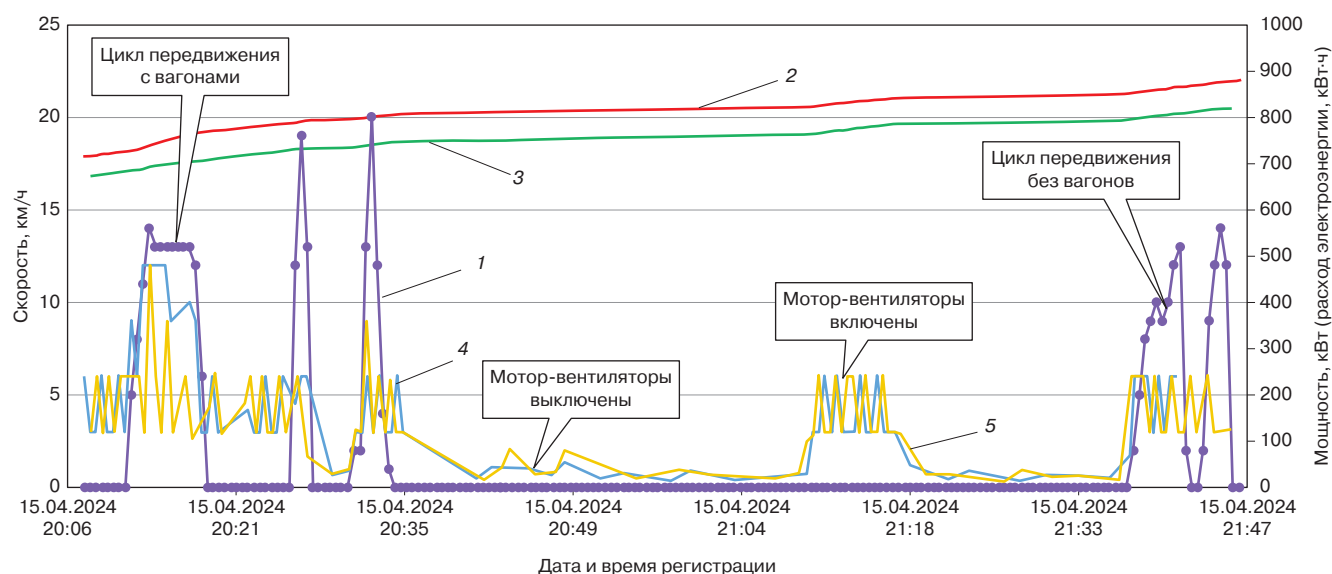


Рис. 14. Образец расшифровки данных регистрации при маневровой работе электровоза ВЛ80^Р-1554 на станции Ачинск-1 15.04.2024, с 20:06 по 21:47:

1 — скорость; 2 — расход электроэнергии секции 1; 3 — расход электроэнергии секции 2; 4 — средняя за период регистрации мощность секции 1; 5 — средняя за период регистрации мощность секции 2

Fig. 14. Sample transcript of registered data of shunting operation of electric locomotive VL80^R-1554 at Achinsk-1 Station 15.04.2024, from 20:06 to 21:47:

1 — speed; 2 — Section 1 power consumption; 3 — Section 2 power consumption; 4 — Section 1 average registered power for the period; 5 — Section 2 average registered power for the period

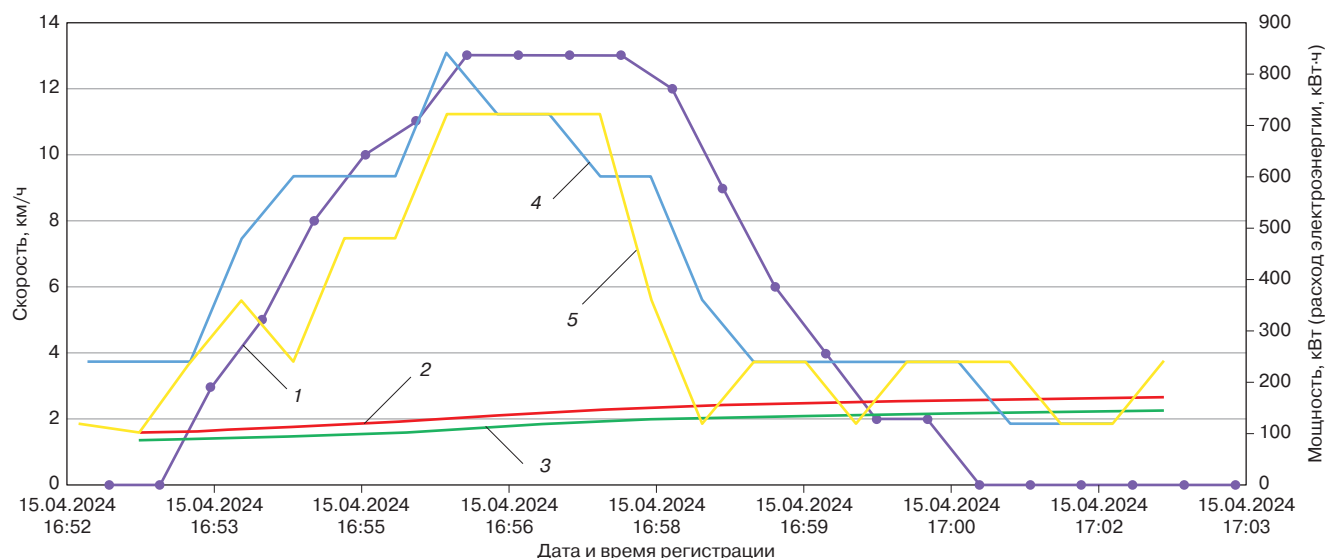


Рис. 15. Образец расшифровки данных регистрации при маневровой работе электровоза ВЛ80^Р-1554 на станции Ачинск-1 15.04.2024, с 16:52 по 17:03:

1 — скорость; 2 — расход электроэнергии секции 1; 3 — расход электроэнергии секции 2; 4 — средняя за период регистрации мощность секции 1; 5 — средняя за период регистрации мощность секции 2

Fig. 15. Sample transcript of registered data of shunting operation of electric locomotive VL80^R-1554 at Achinsk-1 Station 15.04.2024, from 16:52 to 17:03:

1 — speed; 2 — Section 1 power consumption; 3 — Section 2 power consumption; 4 — Section 1 average registered power for the period; 5 — Section 2 average registered power for the period

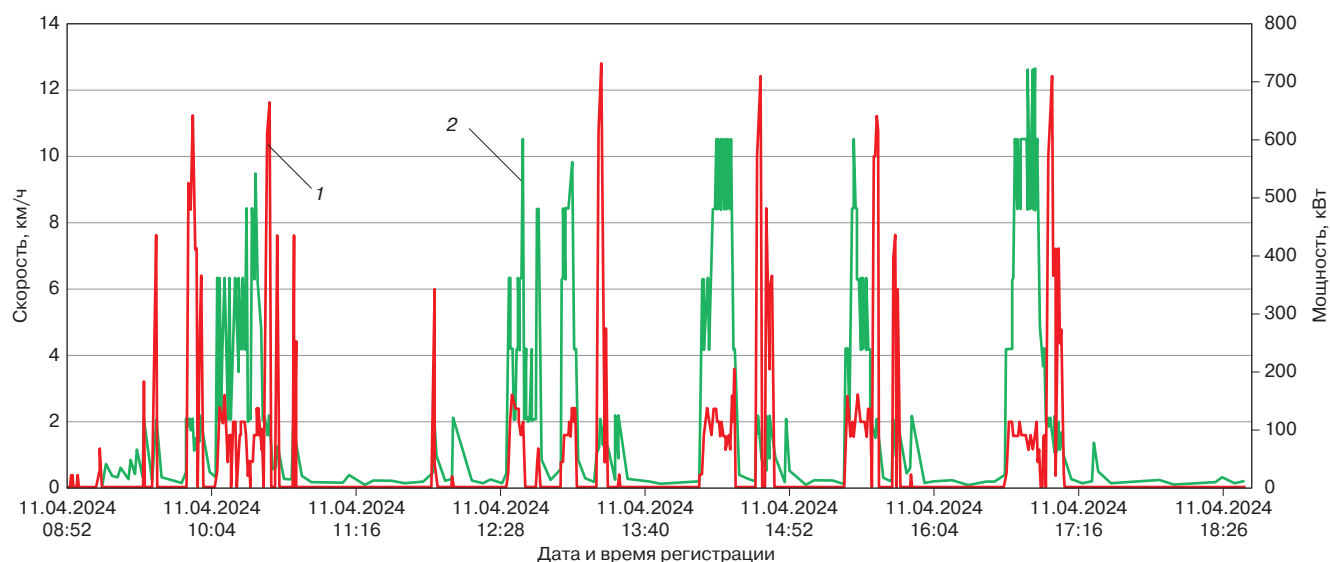


Рис. 16. Образец расшифровки данных регистрации при маневровой работе электровоза ВЛ80^С-665, секция 1, на станции Лоста 11.04.2024, с 8:52 по 18:26:

1 — скорость; 2 — средняя за период регистрации мощность

Fig. 16. Sample transcript of registered data of shunting operation of electric locomotive VL80^S-665, Section 1, at Losta Station 11.04.2024, from 8:52 to 18:26:

1 — speed; 2 — average registered power for the period

Результаты проверки расчетов по выражению (3) в сравнении с фактическим расходом электроэнергии по данным БКРП — $E_{ФБ}$ для вариантов расчета из табл. 4 приведены в табл. 5. В данной таблице также содержатся данные о фактическом $E_{ФЦ}$ и

нормативном $E_{НЦ}$ расходах электроэнергии за рабочую смену из АС ЦОММ.

С учетом данных табл. 5 и продолжительности рабочих смен машиниста можно определить, что норма часового расхода в АС ЦОММ для маневров

на станции Ачинск-1 составляет 251 кВт·ч/ч, на станции Лоста — 112 кВт·ч/ч. Как видно, при расчетах по усредненным нормативам отклонение $E_{H_{Ц}}$ от $E_{Ф_{Ц}}$ в рассмотренных рабочих сменах достигает 60 %, а от значений $E_{Ф_{Б}}$ — 42 %. Максимальное отклонение нормативного расхода $E_{P_{M}}$ от $E_{Ф_{Б}}$ при этом составило 16 %. Также отметим, что отклонение суммы по 9 рабочим сменам значений $E_{H_{Ц}}$ от аналогичной суммы $E_{Ф_{Б}}$ составило 6,1 %, а отклонение суммы $E_{P_{M}}$ от $E_{Ф_{Б}}$ — 3,3 %. Полученные результаты свидетельствуют о большей объективности

расчетных значений $E_{P_{M}}$ по сравнению с $E_{H_{Ц}}$ за счет учета в нормативе $E_{P_{M}}$ параметров выполненной работы.

Важно отметить, что повышение объективности нормирования при использовании данных БКРП позволит фиксировать неисправности приборов учета электроэнергии или некорректность записи о расходе электроэнергии в АС ЦОММ. В части оценки работы машинистов использование данных БКРП обеспечит контроль за соблюдением инструкций по управлению мотор-вентиляторами электровозов.

Таблица 4

Параметры маневровой работы электровозов по данным регистрации БКРП

Table 4

Electric locomotive shunting parameters based on registered on-board data

Дата работы	Станция	Электровоз/секция	Расход электроэнергии секции 1/секции 2, кВт·ч	Пробег, км	Потребляемая мощность секции 1/секции 2, кВт				Продолжительность, ч	
					при движении		на стоянке		пере-движе-ний	стоянок
					макси-мальная*	средняя**	макси-мальная*	средняя		
11.04.2024	Ачинск-1	ВЛ80 ^Р -1554	1838/1881	21,2	960/960	208/210	240/240	115/115	3,4	8,3
13.04.2024	Ачинск-1	ВЛ80 ^Р -1554	956/1177	33,0	1080/960	233/204	120/120	44/44	2,7	8,7
15.04.2024	Ачинск-1	ВЛ80 ^Р -1554	1820/1711	21,8	840/840	216/209	240/240	110/108	3,7	7,9
11.04.2024	Лоста	ВЛ80 ^С -665/1	763/—	14,8	720/—	263/—	78/—	27/—	2,55	8,77
11.04.2024	Лоста	ВЛ80 ^С -665/2	—/737	15,4	—/840	—/236	—/69	—/20	2,3	9,0
13.04.2024	Лоста	ВЛ80 ^С -665/1	801/—	25,0	600/—	204/—	41/—	17/—	2,9	8,4
13.04.2024	Лоста	ВЛ80 ^С -665/2	—/916	27,2	—/840	—/247	—/64	—/25	3,4	7,9
16.04.2024	Лоста	ВЛ80 ^С -665/1	1186/—	35,6	840/—	258/—	32/—	16/—	4,3	7,0
16.04.2024	Лоста	ВЛ80 ^С -665/2	—/1114	33,8	—/720	—/262	—/55	—/23	4,0	7,3

* По вычисленным единичным значениям средней за период регистрации мощности.

** Только в режимах нагружения, без учета значений мощности при выбеге.

Таблица 5

Результаты расчета нормативов расхода электроэнергии на маневровую работу и проверки их выполнения

Table 5

Results of calculation of power consumption rates for shunting operations and verification of compliance

Дата работы	Станция	Электровоз/секция	Расход электроэнергии по данным БКРП, кВт·ч		Отклоне-ние $E_{Ф_{Б}}$ от $E_{P_{M}}$, %	Расход электроэнергии по данным АС ЦОММ, кВт·ч		Отклоне-ние $E_{Ф_{Ц}}$ от $E_{H_{Ц}}$, %	Отклонение $E_{Ф_{Б}}$ от $E_{H_{Ц}}$, %
			$E_{Ф_{Б}}$	$E_{P_{M}}$		$E_{Ф_{Ц}}$	$E_{H_{Ц}}$		
11.04.2024	Ачинск-1	ВЛ80 ^Р -1554	3719	3330	11,7	3721	2862	30,0	29,9
13.04.2024	Ачинск-1	ВЛ80 ^Р -1554	2133	1946	9,6	2146	2880	—25,5	—25,9
15.04.2024	Ачинск-1	ВЛ80 ^Р -1554	3531	3311	6,7	3496	2882	21,3	22,5
11.04.2024	Лоста	ВЛ80 ^С -665/1	763	907	—15,9	800	1086	—26,3	—29,7
11.04.2024	Лоста	ВЛ80 ^С -665/2	737	723	2,0	500	1262	—60,4	—41,6
13.04.2024	Лоста	ВЛ80 ^С -665/1	801	734	9,07	840	1262	—33,4	—36,5
13.04.2024	Лоста	ВЛ80 ^С -665/2	916	1037	—11,7	1000	1110	—9,9	—17,5
16.04.2024	Лоста	ВЛ80 ^С -665/1	1186	1221	—2,9	1150	1262	—8,9	—6,0
16.04.2024	Лоста	ВЛ80 ^С -665/2	1114	1216	—8,4	1100	1262	—12,8	—11,7
		Итого	14 900	14 425	3,3	14 753	15 868	—7,0	—6,1

Обсуждение и заключение. Полученные в исследовании результаты позволили определить существующие в текущей эксплуатации параметры расхода электроэнергии на маневровую работу, выполняемую электровозами. Она характеризуется достаточно широким диапазоном загрузок и большим разнообразием используемых серий электровозов. В 2023 г. электровозы использовались для выполнения как горочных, так и перестановочных маневров на 19 станциях, всего было задействовано 13 разных серий электровозов. Средний за смену расход электроэнергии находился в диапазоне 490–2695 кВт·ч. Статистическая обработка данных по маршрутам машиниста показала, что не для всех станций и их отдельных парков возможно определение среднего расхода электроэнергии даже за довольно длительный период (например, год). Возможно оперировать только диапазоном изменения этого расхода, так как коэффициент вариации превышает допустимое значение 0,33. Такая ситуация отмечена для станций Березники, Кропачёво, Златоуст и Куйбас. Для ряда станций средний за год расход электроэнергии может быть определен, но по ограниченному набору календарных месяцев. Это, например, парк 1 станции Дёма и станции Металлургическая, Ачинск-1, Магнитогорск-Грузовой, Карталы-2. Связанная с этими фактами неравномерность загрузки электровоза должна учитываться как при рассмотрении вопроса о разработке специализированных маневровых электровозов, в т. ч. контактно-аккумуляторных, так и вопроса о перспективных объемах их использования.

С учетом отсутствия в настоящее время специальных маневровых электровозов (кроме узкоспециализированного локомотива ЭМКА2) важным является обоснованный выбор серии магистрального электровоза, в наибольшей степени подходящего для использования на маневровых работах. При имеющемся крайне ограниченном и неинформативном наборе данных по фактической загрузке маневровых электровозов в официальной отчетности перспективным направлением анализа эффективности расхода электроэнергии при маневрах является использование данных БКРП. Эти данные даже в условиях, когда БКРП оборудованы не все эксплуатируемые на станциях электровозы, позволят получить такие характеристики, как скоростной диапазон, соотношение времени передвижений и стоянок, потребная мощность и связанное с этим наличие возможности асинхронного нагружения секций. Указанная информация может быть получена в т. ч. с разбивкой по отдельным маневровым районам. Использование данных БКРП позволит повысить достоверность и объективность как при оценке эффективности использования при маневрах существующих серий электровозов, так и при обосновании разработки специализированных маневровых электровозов.

Выводы. Достигнутые в эксплуатации результаты, совпадающие с теоретическими предпосылками, показывают эффективность применения для маневровой работы на станциях, электрифицированных на постоянном токе, электровозов с большей сцепной массой, позволяющей за счет меньшего времени разгона снизить пусковые потери.

С целью экономии электроэнергии целесообразно практиковать использование вместо целого магистрального электровоза отдельных его секций, так как при отдельных видах маневровой работы их мощности и тяговых качеств достаточно для передвижения обрабатываемых групп вагонов с допустимыми при выполнении маневров скоростями.

При нормировании расхода электроэнергии на маневровую работу в современных условиях необходимо активнее использовать данные БКРП. При этом целесообразно учитывать такие параметры, как фактические значения суммарного времени движения и стоянки в каждой рабочей смене, а также соответствующие этим режимам среднестатистические для данной станции маневровой работы значения потребляемой мощности.

Благодарности: автор выражает благодарность рецензентам за полезные замечания и советы, способствовавшие улучшению статьи.

Acknowledgments: the author expresses his gratitude to the reviewers for their constructive comments, improving the quality of the article.

Финансирование: автор заявляет об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

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

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов и не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Контактно-аккумуляторные электровозы для маневровой работы / С. П. Вакуленко [и др.] // Железнодорожный транспорт. 2023. № 9. С. 37–40. EDN: <https://www.elibrary.ru/hrjxc>.
Vakulenko S. P., Kolin A. V., Sokolov M. Yu., Rybakov P. V., Bakin A. A. Contact-accumulator electric locomotives for shunting operations. *Zheleznodorozhnyy transport*. 2023;(9):37-40. (In Russ.). EDN: <https://www.elibrary.ru/hrjxc>.
2. Использование контактно-аккумуляторных электровозов для маневровой работы на станциях / Ю. М. Иньков [и др.] // Наука и техника транспорта. 2014. № 4. С. 9–15. EDN: <https://www.elibrary.ru/tbdfkb>.
Inkov Yu. M., Kosmodamianskiy A. S., Fedyaeva G. A., Feoktistov V. P. Use of contact-accumulator electric locomotives for shunting operations at stations. *Science and technology in transport*. 2014;(4):9-15. (In Russ.). EDN: <https://www.elibrary.ru/tbdfkb>.

3. Особенности проектирования контактно-аккумуляторного маневрового электровоза / П. Г. Колпахчан [и др.] // Электротехника. 2021. № 10. С. 15–20. EDN: <https://www.elibrary.ru/iwzfd0>.

Kolpakchyan P. G., Evstafev A. M., Nikitin V. V., Zarifyan A. A., Talakhadze T. Z. Design features of a contact-battery shunting electric locomotive. *Electrical Engineering*. 2021;(10):15-20. (In Russ.). EDN: <https://www.elibrary.ru/iwzfd0>.

4. Штанг А. А., Ярославцев М. В. Контактно-аккумуляторный маневровый электровоз с накопителем энергии на основе литий-ионных аккумуляторов // Электроника и электрооборудование транспорта. 2016. № 1. С. 13–16. EDN: <https://www.elibrary.ru/vqhaaf>.

Shtang A. A., Yaroslavtsev M. V. Battery-electric shunting locomotive with lithium-ion storage batteries. *Elektronika i elektrooborudovaniye transporta*. 2016;(1):13-16. (In Russ.). EDN: <https://www.elibrary.ru/vqhaaf>.

5. Проблема перевода на электрическую тягу маневровой работы на железнодорожном транспорте / Ю. М. Иньков [и др.] // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. 2015. № 6. С. 9–14. EDN: <https://www.elibrary.ru/twphdx>.

Inkov Yu. M., Kosmodamianskiy A. S., Feoktistov V. P., Tretinnikov O. V. The problem of transfer of shunting to electric traction at railways. *Transport: science, equipment, management*. 2015;(6):9-14. (In Russ.). EDN: <https://www.elibrary.ru/twphdx>.

6. Забелло М. Л., Баранов А. М. Маневровые локомотивы электрифицированных железных дорог. М.: Транспорт, 1967. 150 с.

Zabello M. L., Baranov A. M. Shunting locomotives of electrified railways. Moscow: Transport Publ.; 1967. 150 p. (In Russ.).

7. Пути снижения расхода топлива в маневровой работе на железнодорожных станциях / В. М. Овчинников [и др.] // Вестник Белорусского государственного университета транспорта: наука и транспорт. 2010. № 2 (21). С. 151–158. EDN: <https://www.elibrary.ru/jbkzgg>.

Ovchinnikov V. M., Pozhidaev S. A., Skrezhendevskiy V. V., Shvets N. G. Ways of decrease in the charge of fuel to shunting work on the railway stations. *Vestnik Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta transporta: nauka i transport*. 2010;(2):151-158. (In Russ.). EDN: <https://www.elibrary.ru/jbkzgg>.

8. Сковородников Е. И., Анисимов А. С., Чулков А. В. Разработка методики нормирования расхода дизельного топлива на маневровую работу // Вестник транспорта Поволжья. 2013. № 5 (41). С. 22–38. EDN: <https://www.elibrary.ru/rqrbb>.

Skovorodnikov E. I., Anisimov A. S., Chulkov A. V. The methods to set the norms of diesel fuel consumption for shunting operations. *Vestnik transporta Povolzhya*. 2013;(5):22-38. (In Russ.). EDN: <https://www.elibrary.ru/rqrbb>.

9. Влияние переходных процессов в силовой установке маневрового тепловоза на расход топлива в эксплуатации / В. В. Грачев [и др.] // Бюллетень результатов научных исследований. 2022. № 1. С. 48–67. EDN: <https://www.elibrary.ru/vsvamj>.

Grachev V. V., Grishchenko A. V., Bazilevskiy F. Yu., Kurilkin D. N. Impact of Transition Processes in Propulsion of Shunting Diesel Locomotive on Fuel Consumption in Exploitation. *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy*. 2022;(1):48-67. (In Russ.). EDN: <https://www.elibrary.ru/vsvamj>.

10. Современная методология технического нормирования расхода топливно-энергетических ресурсов локомотивами на тягу поездов: [монография] / Л. А. Мугинштейн [и др.]. М.: ВМГ-Принт, 2014. 144 с. (Труды ВНИИЖТ). EDN: <https://www.elibrary.ru/vtznns>.

Muginshteyn L. A., Molchanov A. I., Vinogradov S. A. Modern methodology of technical rationing of fuel and energy consumption by locomotives for train traction: [monograph]. Moscow: VMG-Print Publ; 2014. 144 p. (Proceedings of the Railway Research Institute). (In Russ.). EDN: <https://www.elibrary.ru/vtznns>.

11. Оптимизация энергетической эффективности маневровых тепловозов / М. О. Мусабеков [и др.] // Вестник Казахской

академии транспорта и коммуникаций им. М. Тынышпаева. 2017. № 1 (100). С. 65–69. EDN: <https://www.elibrary.ru/ynuwd>.

Musabekov M. O., Baytusupov D. M., Bakyt G. B., Omirbek A. M. Optimization of power efficiency of shunting diesel locomotives. *The Bulletin of the Kazakh Academy of Transport and Communications named after M. Tynyshpaev*. 2017;(1):65-69. (In Kaz., Russ., Eng.). EDN: <https://www.elibrary.ru/ynuwd>.

12. Деордиев А. Г., Назаров Л. С., Зозулев А. К. Внедряются обоснованные нормы расхода топлива для маневровых тепловозов // Локомотив. 2004. № 2. С. 20–22.

Deordiev A. G., Nazarov L. S., Zozulev A. K. Introduction of reasonable fuel consumption rates for diesel shunters. *Locomotive*. 2004;(2):20-22. (In Russ.).

13. Оценка факторов, влияющих на перерабатывающую способность горки / Т. Г. Кузнецова [и др.] // Современные методы и принципы управления перевозочным процессом на транспорте: сб. тр. науч.-практ. конф. с междунар. участием, Москва, 17–18 мая 2023 г. / под общ. ред. Г. М. Биленко, И. А. Трушиной. М., 2023. С. 202–208. EDN: <https://www.elibrary.ru/pixvfe>.

Kuznetsova T. G., Kuznetsova A. N., Simachkova I. V., Buksha A. V. Assessment of factors affecting hump yard capacity. In: Bilenko G. M., Trushina I. A. (eds.) *Modern methods and principles of transportation management: Proceedings of the scientific and practical conference with international participation, 17–18 May 2023, Moscow*. Moscow; 2023. p. 202–208. (In Russ.). EDN: <https://www.elibrary.ru/pixvfe>.

14. Маринин С. А. Оценка влияния погодных условий на расход электроэнергии в моторвагонной тяге на примере Горьковской железной дороги // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения (Вестник РГУПС). 2023. № 4 (92). С. 193–200. https://doi.org/10.46973/0201-727X_2023_4_193.

Marinin S. A. Assessment of the influence of weather conditions on electric energy consumption in motor car traction by the example of the Gorky Railway. *Vestnik RGUPS*. 2023;(4):193-200. (In Russ.). https://doi.org/10.46973/0201-727X_2023_4_193.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Кирилл Михайлович ПОПОВ,

канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник, НЦ «Цифровые модели перевозок и технологии энергосбережения» (ВНИИЖТ, 129626, г. Москва, ул. 3-я Мытищинская, 10), Author ID: 1080218, <https://orcid.org/0000-0003-2284-8144>

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Kirill M. POPOV,

Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher, Digital Models of Transportation and Energy Saving Technologies Scientific Centre, Railway Research Institute (129626, Moscow, 10, 3rd Mytishchinskaya St.), Author ID: 1080218, <https://orcid.org/0000-0003-2284-8144>

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

The author has read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию 13.09.2024, рецензия от первого рецензента получена 07.10.2024, рецензия от второго рецензента получена 11.10.2024, рецензия от третьего рецензента получена 21.10.2024, принята к публикации 05.11.2024.

The article was submitted 13.09.2024, first review received 07.10.2024, second review received 11.10.2024, third review received 21.10.2024, accepted for publication 05.11.2024.

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Оригинальная статья

УДК 625.151

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

Технические решения для улучшения условий и плавности движения поездов по стрелочным переводам

Б. Э. Глюзберг¹✉, П. В. Трегубчак¹, И. В. Цитцер²¹ Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ),
Москва, Российская Федерация² Новосибирский стрелочный завод (НСЗ),
Новосибирск, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Введение. Используемые в настоящее время геометрические схемы стрелочных переводов позволили разработать и начать серийное производство основных видов стрелочной продукции, которая обеспечивает перевозочный процесс на российских железных дорогах. Дальнейшее развитие инфраструктуры и стрелочного хозяйства как ее важнейшей составляющей невозможно без разработки новых, более современных геометрических схем стрелочных переводов, учитывающих возросшие требования к скоростям движения поездов, динамическим нагрузкам и повышению комфортности поездки пассажиров. Приведенное исследование посвящено разработке таких геометрических схем для наиболее массовых видов стрелочной продукции.

Материалы и методы. Условия движения подвижного состава по стрелочному переводу оцениваются по величинам возникающих при этом движении кинематических характеристик — скоростей движения, ускорений экипажа и скорости изменения этих ускорений. Разработки, представленные в настоящей статье, базируются на анализе кинематики движения экипажей по прямому и ответвленному путям стрелочных переводов с учетом их особенностей и отличия от движения по кривым на перегонах.

Результаты. Для предлагаемых стрелочных переводов получены данные по непогашенному ускорению, параметру потери энергии, эквивалентной конструкционной скорости и другим. Разработаны технические решения к изменению геометрических параметров стрелочных переводов, влияющих на комфорт пассажиров, на основе которых построены геометрические схемы стрелочных переводов с улучшенными показателями плавности хода подвижного состава по стрелочным переводам.

Обсуждение и заключение. Анализ разработок геометрических схем стрелочных переводов, позволяющих улучшить плавность движения подвижного состава по стрелочным переводам и положительно влияющих на комфортабельность езды пассажиров, позволяет рекомендовать к реализации четыре технических решения, дающих наибольшую эффективность при наименьших затратах на их укладку и использование на сети российских железных дорог. Это два варианта стрелочных переводов марки 1/11 со стрелочными кривыми касательного типа, взаимозаменяемых с переводами, массово применяемыми на российских железных дорогах в настоящее время, и два варианта стрелочных переводов с более пологой маркой 1/13. Рекомендуется также использовать разработанные по той же методике технические решения для стрелочных переводов марки 1/9 и симметричных марки 1/6.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: железнодорожный путь, стрелочные переводы, особенности движения, геометрические схемы, кинематические характеристики, комфортабельность движения, технические решения

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Глюзберг Б. Э., Трегубчак П. В., Цитцер И. В. Технические решения для улучшения условий движения и плавности хода поездов по стрелочным переводам // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2024. Т. 83, № 4. С. 336–347.

✉ Glusberg@mail.ru (Б. Э. Глюзберг)

© Глюзберг Б. Э., Трегубчак П. В., Цитцер И. В., 2024



TECHNICAL MEANS OF RAILWAY TRANSPORT

Original article

UDK 625.151

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



Engineering solutions to improve conditions and smoothness of train traffic on turnout switches

Boris E. Glyuzberg¹✉, Pavel V. Tregubchak¹, Il'ya V. Tsittser²

¹ Railway Research Institute,
Moscow, Russian Federation

² Novosibirsk Switch Plant,
Novosibirsk, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The currently used turnout switches geometries provided for the development and serial production of the main types of turnout equipment that ensure the transport process on the Russian railways. Further development of the infrastructure and the turnout facilities as its most important component calls for new, more advanced turnout switches geometries that take into account higher requirements for train speeds, dynamic loads and passenger comfort. The study develops geometries for the most common turnout equipment.

Materials and methods. The conditions of rolling stock movement along turnout switch are evaluated in terms of associated kinematics: travelling speeds, accelerations and the change rate of these accelerations. The developments in this article are based on the analysis of the cab kinematics moving along straight and branch tracks of turnout switches considering their properties and differences from the movement along curves on space intervals.

Results. The proposed turnout switches have obtained data on unbalanced acceleration, energy loss, equivalent design speed and others. The paper offers design solutions to change turnout switches geometries that affect passenger comfort and provided the basis for the design of turnout geometries with a smoother rolling stock run.

Discussion and conclusion. An analysis of turnout switches geometry developments that smoothen rolling stock movement on turnout switches and improve passenger comfort identifies four engineering solutions recommended for implementation as providing the highest efficiency at the lowest cost of installation and operation on the Russian railway network. These are two variants of 1/11 turnout switches with tangent switch curves interchangeable with the turnout switches currently widely used on Russian railways, and two more gentle variants of 1/13 turnout switches. The engineering solutions developed under the same methodology are also recommended for 1/9 and symmetrical 1/6 turnout switches.

KEYWORDS: railway track, turnout switches, movement parameters, geometry, kinematic performance, traffic comfort, engineering solutions

FOR CITATION: Glyuzberg B. E., Tregubchak P. V., Tsittser I. V. Engineering solutions to improve conditions and smoothness of train traffic on turnout switches. *Russian Railway Science Journal*. 2024;83(4):336-347. (In Russ.).

Введение. В настоящее время разработчиками стрелочной продукции ведутся работы по созданию нового поколения технических средств для стрелочного хозяйства российских железных дорог, удовлетворяющих перспективным требованиям организации перевозочного процесса [1, 2]. Важнейшим условием создания новых конструкций пути является улучшение условий поездок пассажиров [3–6].

Основой проектирования и конструирования стрелочных переводов являются принципиальные технические решения, представляемые в виде геометрических схем стрелочных переводов (или других видов стрелочной продукции). В качестве исходных данных для формирования геометрических схем используются комплексы динамико-кинематических характеристик, определяющих кинематику движения и динамику взаимодействия пути и подвижного состава при проходе по стрелочному переводу, показатели плавности движения и комфортабельность пассажиров [7–10]. Схемы позволили запустить в работу основные виды стрелочной продукции, которая обеспечивает перевозочный процесс на сегодняшний день.

Дальнейшее развитие инфраструктуры и стрелочного хозяйства как ее важнейшей составляющей невозможно без разработки новых (усовершенствованных) геометрических схем, учитывающих возросшие требования к скоростям движения поездов, нагрузкам и улучшению комфортабельности езды пассажиров. Предлагаемые вниманию читателя исследования посвящены разработке таких геометрических схем для наиболее массовых видов стрелочной продукции.

Устройство пути в местах расположения стрелочных переводов имеет особенности, отличающие эти участки железнодорожного пути от других [11]. Наиболее характерные из этих особенностей — короткие протяженности однородных участков, соизмеримые с длинами базы экипажей; отсутствие переходных кривых; наличие углов в плане на стрелочных переводах с острьями секущего типа (типовое решение на российских железных дорогах); короткие прямые вставки между стрелочными кривыми смежных переводов или их полное отсутствие; отсутствие возвышения наружного рельса кривой (может быть и обратное возвышение); элементы стрелочных переводов, резко изменяющие направление движения колесных пар и тележек (набегания колес на острья, контррельсы, усовики крестовин).

Наличие этих особенностей приводит к тому, что условия прохождения подвижного состава по стрелочным кривым и их сочетаниям принципиально отличаются от условий движения по кривым и прямым участкам перегонных путей [11]. Все это вызывает необходимость решать вопросы назначения устройства

стрелочных переводов и скоростей движения подвижного состава по стрелочным переводам по методикам, отличным от методик, применяемых для путей на перегонах и станциях.

Стрелочные переводы как элементы путевой инфраструктуры должны отвечать целому комплексу требований. В соответствии с используемыми на железных дорогах России методиками проектирования факторами, обеспечивающими плавность движения и ограничивающими конструкционные скорости движения подвижного состава по стрелочному переводу, являются динамико-кинематические характеристики, прочностные параметры, показатели воздействия на пассажиров и грузы, характеристики, обеспечивающие плавность движения и вписывание расчетного экипажа в стрелочную кривую.

Разработка геометрической схемы. Проектирование стрелочного перевода начинается с разработки его геометрической схемы. В качестве исходных данных для построения и расчета геометрической схемы используют динамико-кинематические характеристики стрелочных кривых. Условия движения подвижного состава по стрелочному переводу оцениваются по величинам возникающих при этом движении кинематических характеристик — скоростей движения, ускорений экипажа и скорости изменения этих ускорений.

Кинематические характеристики движения зависят от радиус-вектора, определяющего положение движущейся точки в каждый момент времени [8]:

$$\vec{r}(t) = x(t)\vec{i} + y(t)\vec{j} + z(t)\vec{k}, \quad (1)$$

где $x(t), y(t), z(t)$ — функции, характеризующие изменение положения движущейся точки во времени в системе координат $(\vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$.

При постоянной скорости движения после несложных преобразований составляющие ускорений и скоростей их изменения, которые влияют на параметры движения экипажа по стрелочной кривой, по модулю составят [9]:

$$a = |\vec{a}| = \frac{V^2}{R}; \quad \psi = |\vec{\psi}| = \frac{V^3}{Rd}, \quad (2)$$

где R — радиус стрелочной кривой, м; V — скорость перемещения экипажа вдоль кривой, м/с; a — модуль горизонтальной поперечной составляющей вектора ускорения, м/с²; ψ — модуль скорости изменения горизонтального поперечного ускорения экипажа, м/с³, с базой d , м.

В мировой практике в настоящее время используют в основном две концепции проектирования геометрических схем стрелочных переводов.

В ряде стран, например во Франции, применяют концепцию, которая исходит из «недостаточности

возвышения наружного рельса в стрелочной кривой» (на стрелочном переводе возвышение наружного рельса не устраивается из конструктивных возможностей). Критериями в данном случае служат нормируемые недостаточность возвышения наружного рельса и скорость его изменения, которые оцениваются по величинам непогашенного ускорения и скорости его изменения.

В большинстве европейских стран (в т. ч. Австрии, ФРГ), включая Россию, при разработке геометрических схем стрелочных переводов используют другой подход. При проектировании геометрии нового стрелочного перевода рассматривают условия движения экипажей исходя из ускорения j , внезапно возникающего при набегании колес на остряк, непогашенного ускорения при движении по стрелочной кривой a , параметров, связанных с потерей кинетической энергии при набегании колеса на остряк при входе на стрелочную кривую W_0 и набеганиях на направляющие элементы крестовинного узла — элементы крестовины и контррельсов W_r .

При установлении расчетных скоростей движения конкретных экипажей по комбинациям стрелочных переводов и примыкающих участков пути дополнительно рассматривается скорость изменения непогашенного ускорения ψ на входе в стрелочную кривую (и при движении по ней, если радиус кривой переменный). Величины этих параметров, используемые в практическом проектировании, принимаются исходя из опыта эксплуатации.

Модель для формирования геометрии стрелочного перевода рассматривает взаимодействие колес экипажа по рабочей грани рельсовых элементов на расчетном уровне. Сформированная на основе расчетов по этой модели геометрическая схема стрелочного перевода является основой для разработки его конструкции.

Фактические величины динамико-кинематических характеристик для типовых стрелочных переводов, используемых на российских железных дорогах, приведены в табл. 1.

Для улучшения плавности движения необходимо уменьшить неблагоприятное влияние факторов, отрицательно влияющих на динамико-кинематические параметры движения, т. е. обеспечить снижение величин ускорений и эффекта потери кинетической энергии, воздействующих на путь и подвижной состав.

При движении по прямому пути стрелочных переводов факторами, отрицательно влияющими на плавность движения подвижного состава, являются повышенная частота виляния колесных пар экипажей и наличие переходных зон от расположения рельсов на перегоне и стрелочном переводе (наличие на перегоне и отсутствие на стрелочном переводе подуклонки рельсовых нитей).

Для стрелочных переводов, имеющих в своем составе крестовинные узлы с крестовинами с неподвижным сердечником, фактором, отрицательно влияющим на плавность движения, является также наличие контррельсовых узлов, вызывающих сдвиги не менее трети колесных пар, проходящих по стрелочному переводу.

Способы повышения плавности движения по прямому пути стрелочных переводов вытекают из способов снижения отрицательных влияний этих факторов. Для всех видов стрелочных переводов это разработка конструкций с рабочими поверхностями, имеющими ту же форму (тот же наклон), что и у рельсов, примыкающих к стрелочному переводу путей (подуклонка, псевдоподуклонка). На стрелочных переводах, имеющих в своем составе крестовинные узлы с контррельсами, для обеспечения плавности движения необходимо уменьшить эффект удара, возникающий при набегании колес на контррельс, который определяется из зависимости [7]:

$$W = V \sin(\gamma_{kl}), \quad (3)$$

где V — скорость движения экипажа, м/с; γ_{kl} — угол отвода отогнутой части контррельса, рад.

Таблица 1

Динамико-кинематические характеристики типовых одиночных обыкновенных стрелочных переводов железных дорог России

Table 1

Dynamic and kinematic performance of typical single ordinary turnout switches of Russian railways

Тип рельса	Марка стрелочного перевода	Радиус стрелочной кривой, м		Конструкционная скорость на ответвление, км/ч	Ускорение, м/с ²		Параметр потери кинетической энергии, м/с
		Стрелки	Переводной кривой		Внезапно возникающее	Непогашенное	
P65	1/9	300,000	200,060	40	0,412	0,617	0,191
P65	1/11	300,000	300,000	50	0,643	0,643	0,225
P65	1/18	961,590	963,380	80	0,514	0,513	0,238
P65	1/22	2800,00–1600,00*		120	0,397	0,694	0,223

* Клотоида.

Для этого необходимо уменьшить угол отвода отогнутой части контррельса γ_{k1} . Уменьшение угла отвода контррельса потребует увеличения длины отогнутой части контррельса l_{k1} и контррельса в целом l_k [12]:

$$l_{k1} = \frac{1}{W} V(t_{k1} - t_{k2}); l_k = l_{k0} + 2l_{k1} + 2l_{k2}, \quad (4)$$

где t_{k1} , t_{k2} — размеры желобов в начале и конце отогнутой части контррельса, м; l_{k0} , l_{k2} — длина средней и улавливающей частей контррельса, м.

Ограничивать длину контррельса в данном случае будет расположение заднего стыка крестовины.

При необходимости увеличения длины контррельса практическая длина стрелочного перевода увеличивается за счет смещения заднего стыка, однако это может быть осуществлено без нарушения взаимозаменяемости стрелочного перевода и возможности осуществления его замены. Основа технического решения — геометрическая схема стрелочного перевода — при этом не изменяется.

Для улучшения плавности движения при движении на боковое направление стрелочных переводов необходимо уменьшать эффект удара при набегании колес на остяк, при входе колесных пар на стрелку, а также увеличивать радиусы стрелочных кривых.

При использовании геометрии стрелки секущего типа (типовое решение для российских железных дорог) в общем случае начальный стрелочный угол остяков и их радиусы определяются из соотношений кинематики движения экипажа при входе на стрелку [12]:

$$\sin \beta_n \leq \frac{1}{V} \sqrt{W_0^2 - 2\delta j}; R_1 = \frac{V_6^2}{j_0}; R_2 = \frac{V_6^2}{a}, \quad (5)$$

где β_n — начальный стрелочный угол остяка ответвленного направления; δ — расчетный наибольший зазор между гребнем колеса и рамным рельсом; R_1 — радиус остяка ответвленного пути в зоне возможных набеганий на него гребней колес экипажей; V_6 — скорость на боковой путь, м/с; R_2 — радиус остяка вне этой зоны.

При использовании однорадиусных стрелочных кривых $R_1 = R_2$. При использовании геометрии стрелочной кривой касательного типа $\beta_n = 0$.

С учетом этого из (5) можно получить соотношения для расчета стрелочных кривых с улучшенной плавностью движения и их динамико-кинематические характеристики.

Дополнительными требованиями будут являться ограничения по длине и возможности полной или частичной взаимозаменяемости стрелочных переводов с улучшенной плавностью движения с переводами массовых конструкций, эксплуатируемых на дорогах в настоящее время.

Угол крестовины α в соотношения (5) не входит и не относится к исходным данным, а является результатом проектирования стрелочного перевода, поэтому расчеты параметров стрелочных кривых могут быть выполнены независимо для стрелочных переводов различных марок.

Для обеспечения полной взаимозаменяемости стрелочных переводов необходимо совпадение их теоретических, разбивочных и практических размеров. Именно таким образом шло совершенствование и модернизация стрелочной продукции в течение нескольких десятков лет. Однако такое полное совпадение накладывает на конструкцию стрелочных переводов требования, ограничивающие возможности их совершенствования.

С точки зрения возможности замены стрелочного перевода одного проекта на стрелочный перевод другого проекта без реконструкции горловины (схемы горловины) станции достаточно, чтобы совпадали теоретические и разбивочные размеры: марка стрелочного перевода, расстояние от его центра до острия остяков и расстояние от центра перевода до математического центра крестовины. Совпадение таких размеров, как передний вылет рамного рельса и задний вылет крестовины, необходимо только в случаях стесненного расположения комбинации стрелочных переводов, когда расстояние между стрелочными переводами (размеры прямых вставок между ними) отличается в меньшую сторону от нормируемых величин.

Анализ показывает, что если расстояния между стрелочными переводами в их комбинациях достаточно велики, то для замены стрелочного перевода одного проекта на перевод другого проекта достаточно совпадения их марок и расстояния от центра перевода до математического центра крестовины (МЦК). Изменение расстояния от центра перевода до острия остяков или до переднего стыка перевода может быть скомпенсировано за счет примыкающих к переднему стыку рельсов (рельсовых рубок). В этом случае при замене эксплуатируемого перевода на перевод нового проекта не требуется изменять геометрическую схему станции. Длины станционных путей в местах расположения стрелочного перевода не меняются, и реконструктивные мероприятия не требуются.

С учетом этого возникает возможность изменить типовую геометрическую схему стрелочного перевода марки 1/11 за счет замены геометрической схемы стрелочной кривой с секущей на касательную, сохранив марку, увеличив радиус кривой и уменьшив угол удара колес в остяк. Такие стрелочные переводы будут иметь улучшенную плавность движения по боковому направлению, но останутся взаимозаменяемыми с типовыми.

Результаты расчетов стрелочных кривых с такими техническими решениями приведены в табл. 2.

Таблица 2

Параметры геометрических схем стрелочных переводов марки 1/11
(голубым цветом выделены строки с динамико-кинематическими параметрами стрелочных кривых)

Table 2

Geometries of 1/11 turnout switches
(lines with dynamic and kinematic parameters of switch curves are highlighted in blue)

Геометрическая схема перевода	Проект 2750	С кривой до переднего стыка крестовины*	С кривой до МЦК крестовины	С кривой до заднего стыка
1	2	3	4	5
Вид кривой	Секущая	Касательная	Касательная	Касательная
Радиус кривой, мм	300 000	305 011	370 123	459 653
Непогашенное ускорение, м/с ²	0,64	0,63	0,52	0,42
Параметр потери энергии, м/с	0,225	0,194	0,176	0,158
Эквивалентная конструкционная скорость при параметрах $j=0,64$ м/с ² , $W=0,225$ м/с	50 км/ч	51 км/ч	56 км/ч	61 км/ч
Расстояние от центра перевода до МЦК крестовины, мм	16 755	16 755	16 755	16 755**
Передний вылет рамного рельса, мм	2765	1635	$\frac{1413***}{2765}$	2144
Практическая длина, мм	34 858	34 858	$\frac{37\,554***}{38\,906}$	41 615

* Реализована в проекте 8365 Муромского стрелочного завода.

** Условно.

*** Числитель — с минимальной длиной переднего вылета рамного рельса, знаменатель — с передним вылетом, соответствующим проекту 2750.

В качестве исходного варианта при выполнении расчетов рассмотрена геометрическая схема стрелочного перевода проекта 2750 со стрелочной кривой секущего типа (табл. 2, столбец 2). Для улучшения параметров плавности движения вместо геометрии стрелочной кривой секущего типа применена геометрия касательного типа.

В табл. 2, помимо параметров стрелочной кривой секущего типа стрелочного перевода проекта 2750, приведены еще три варианта стрелочной кривой касательного типа:

- касательная кривая с окончанием в переднем стыке крестовины;
- касательная кривая с окончанием в МЦК;
- касательная кривая с окончанием в заднем стыке крестовины.

При расчетах практических размеров стрелки учитывалась необходимость укрытия острия острия, которое планировалось осуществлять по применяемой в современных конструкциях схеме (см. рисунок).

Стрелочные переводы, которые могут быть реализованы на основе схем, параметры которых приведены в табл. 2, взаимозаменяемы с переводом проекта 2750, так как расстояния от центра перевода до МЦК одинаковы.

Стрелочный перевод с кривой до переднего стыка крестовины (табл. 2, столбец 3) имеет ту же практическую длину, что и перевод проекта 2750.

При такой схеме сохраняется унификация крестовин для правого и левого переводов.

Переводы с кривой до МЦК крестовины (табл. 2, варианты с параметрами в столбце 4) различаются длиной переднего вылета рамного рельса, имеют практическую длину на 7,7–11 % больше, чем перевод проекта 2750, а перевод со схемой в соответствии со столбцом 5 табл. 2 имеет практическую длину на 19 % больше, чем перевод проекта 2750.

Крестовины правого и левого стрелочных переводов, изготовленных по этой схеме, различаются. Условик со стороны переводной кривой криволинеен от переднего стыка до МЦК и должен иметь отклонение от прямой в переднем стыке 12 мм внутрь кривой. Устройство такого отклонения при изготовлении стрелочного перевода не представляет технологических сложностей.

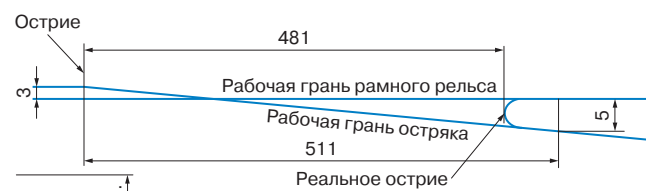


Рис. Схема построения рабочей грани в острия острия

Fig. Schematic diagram of the working face in the contact tongue point

Таблица 3

Параметры геометрических схем стрелочных переводов марки 1/9 со стрелкой, унифицированной со стрелкой перевода марки 1/11 с криволинейной крестовиной (голубым цветом выделены строки с динамико-кинематическими параметрами стрелочных кривых)

Table 3

Geometries of 1/9 turnout switches unified with the 1/11 point with a curved crossbar
(lines with dynamic and kinematic parameters of switch curves are highlighted in blue)

Геометрическая схема перевода	1/9 (проект 2769)	1/9 (проект 2796)	1/11 (вариант с кривой до заднего стыка крестовины)	1/9 с кривой до заднего стыка крестовины проекта	
				2769	2796
1	2	3	4	5	6
Вид кривой	Секущая	Секущая	Касательная	Касательная	Касательная
Радиус кривой на стрелке, мм	300 000	300 000	370 123	370 123	370 123
Радиус переводной кривой, мм	200 060	200 060	370 123	240 764	264 052
Начальный стрелочный угол	0° 27' 19,57"	0° 27' 19,57"	0°	0°	0°
Непогашенное ускорение, м/с ²	0,62	0,62	0,52	0,52	0,47
Параметр потери энергии, м/с	0,225	0,225	0,176	0,176	0,176
Эквивалентная конструкционная скорость при $j=0,64$ м/с ² , $W=0,225$ м/с	40 км/ч	40 км/ч	56 км/ч	45 км/ч	47 км/ч
Передний вылет рамного рельса, мм	2765	2765	2144	2144	2144
Задний вылет крестовины, мм	2090	3680	4045	2090	3680
Практическая длина, мм	31 035	32 625	37 554	33 355	34 945

Дополнительной особенностью схемы, соответствующей столбцу 5 табл. 2, является то, что марка перевода сохраняется равной 1/11, а марка крестовины не совпадает с маркой перевода. Крестовина по боковому направлению полностью криволинейна. Несмотря на наличие криволинейной крестовины, марка перевода и расположение центра перевода (в отличие от марки крестовины) соответствуют параметрам перевода проекта 2750. Перевод может быть уложен взамен перевода проекта 2750 без реконструкции путей в месте укладки.

Изменение геометрических схем влечет за собой изменение динамико-кинематических характеристик стрелочных переводов. Все переводы со схемами касательного типа, рассмотренными в табл. 2, имеют преимущество перед переводом проекта 2750 по параметрам, определяющим плавность движения.

Анализ параметров, определяющих плавность движения при проходе подвижного состава по боковому пути стрелочного перевода (строки в табл. 2, выделенные голубым цветом), показывает следующие преимущества схем:

- по величинам внезапно возникающего и непогашенного ускорения схема с касательной кривой до МЦК имеет меньшие значения на 19 %, а схема с кривой до заднего стыка крестовины на 34 %;
- по величине эффекта удара при набегании колес на остяк схема с касательной кривой до переднего стыка крестовины эффективнее схемы стрелочного перевода проекта 2750 на 14 %, с касательной кривой

до МЦК крестовины имеет меньшие значения на 22 %, а схема с кривой до заднего стыка крестовины на 30 %.

Эти преимущества иллюстрирует анализ эквивалентных конструкционных скоростей движения, т. е. скоростей движения, которые могут быть допущены, если принять в качестве критериев величины, принятые при проектировании стрелочного перевода проекта 2750 (нижняя из помеченных голубым цветом строчек табл. 2).

Схема с касательной кривой до переднего стыка крестовины имеет эквивалентную конструкционную скорость 51 км/ч, с касательной кривой до МЦК крестовины — 56 км/ч, а схема с кривой до заднего стыка крестовины — 61 км/ч.

В целом преимущества предлагаемых схем очевидны.

Аналогичным образом за счет применения более эффективных стрелочных кривых могут быть переработаны геометрические схемы других распространенных видов стрелочных переводов, в частности широко применяемых стрелочных переводов марки 1/9. При этом имеет смысл сохранять унификацию стрелок таких стрелочных переводов со стрелками предлагаемых вариантов стрелочных переводов марки 1/11, как это сделано в выпускаемых в настоящее время серийных конструкциях.

Результаты расчетов таких схем стрелочных переводов марки 1/9 представлены в табл. 3.

В качестве исходных данных взяты геометрические параметры и динамико-кинематические характеристики серийных стрелочных переводов марки 1/9

Таблица 4

Параметры геометрических схем стрелочных переводов марки 1/13
(голубым цветом выделены строки с динамико-кинематическими параметрами стрелочных кривых)

Table 4

Geometries of 1/13 turnout switches
(lines with dynamic and kinematic parameters of switch curves are highlighted in blue)

Геометрическая схема перевода	Исходная, проект 2750	С кривой до переднего стыка крестовины	С кривой до части переднего вылета* жесткая/(НПК)	С кривой до МЦК крестовины жесткая/(НПК)
1	2	3	4	5
Марка перевода	1/11	1/13	1/13	1/13
Вид кривой	Секущая	Касательная	Секущая	Касательная
Радиус кривой, мм	300 000	425 393	450 000	516 039
Непогашенное ускорение, м/с ²	0,64	0,65	0,62	0,54
Параметр потери энергии, м/с	0,225	0,198	0,206	0,180
Эквивалентная конструкционная скорость при параметрах $j=0,64$ м/с ² , $W=0,225$ м/с	50 км/ч	60 км/ч	61 км/ч	66 км/ч
Расстояние от центра перевода до МЦК крестовины, мм	16 755	19 789	19 789	19 789
Передний вылет рамного рельса, мм	2765	2036	2765	1761
Практическая длина, мм	34 858	40 881	$\frac{42\,683^{**}}{(48\,237)}$	$\frac{44\,362^{**}}{(49\,916)}$

* Реализована в проекте Н03.009 Новосибирского стрелочного завода.

** Числитель — с крестовиной с неподвижным сердечником, знаменатель — с непрерывной поверхностью катания (НПК).

проектов 2769 и 2796 с различной длиной крестовины (табл. 3, столбцы 2, 3). При выполнении расчетов за основу принят вариант стрелочного перевода марки 1/11 с касательной геометрией стрелочной кривой, заканчивающейся в МЦК крестовины стрелочного перевода (табл. 3, столбец 4). Если стрелку разрабатываемых стрелочных переводов марки 1/9 сделать унифицированной с этим вариантом перевода марки 1/11, а стрелочную кривую продлить до заднего торца крестовины, то получатся варианты стрелочных переводов марки 1/9, показанные в столбцах 5 и 6 табл. 3.

Оба варианта имеют преимущества в параметрах, определяющих плавность движения по сравнению с серийно выпускаемыми. Использование касательной геометрии стрелок и криволинейной геометрии крестовин позволило увеличить радиусы стрелочной кривой в зоне стрелки с 300 000 до 370 123 м, а в остальной части стрелочной кривой соответственно для перевода с короткой крестовиной (проект 2769) с 200 060 до 240 764 м, а с более длинной крестовиной (проект 2796) — до 264 052 м. За счет применения более пологих стрелочных кривых величины непогашенных ускорений при движении по стрелочной кривой уменьшились с 0,62 м/с² до соответственно 0,52 и 0,47 м/с². Параметр потери кинетической энергии колесных пар, двигающихся в противошерстном направлении, при набегании колеса на остяк уменьшился с 0,225 до 0,176 м/с.

Эквивалентные конструкционные скорости движения по стрелочной кривой при расчетных значениях ускорений и параметра потери кинетической энергии в результате увеличились до 45 и 47 км/ч.

Помимо улучшения плавности движения за счет применения более эффективных стрелочных кривых, плавность движения может быть улучшена за счет применения стрелочных переводов более пологих марок. В качестве примера были проведены расчеты геометрических схем стрелочных переводов марки 1/13. Результаты расчетов сведены в табл. 4.

Так же, как и при разработке технических решений для переводов марки 1/11, в табл. 4 результаты даны в сравнении с типовым стрелочным переводом проекта 2750.

Рассмотрено три вида геометрических схем:

- стрелочная кривая касательного типа с окончанием кривой в переднем стыке крестовины;
- стрелочная кривая секущего типа с окончанием кривой между передним стыком и МЦК;
- стрелочная кривая касательного типа с окончанием кривой в МЦК.

Помимо этого, для последних кривых рассмотрены по два подвида — стрелочный перевод с крестовиной, имеющей неподвижный сердечник, и стрелочный перевод с крестовиной с непрерывной поверхностью катания.

Стрелочные переводы марки 1/13 имеют характеристики, способные обеспечить значительно более плавное движение подвижного состава по боковому направлению стрелочных переводов.

При длинах стрелочной кривой, обеспечивающих унификацию правого и левого исполнения крестовины с неподвижным сердечником, применение стрелочной кривой касательного и секущего типа примерно равноценно (столбцы 3 и 4 табл. 4).

По параметрам, определяющим плавность движения, даже при использовании стрелочной кривой секущего типа (табл. 3, столбец 4) есть преимущество в горизонтальных поперечных ускорениях (около 5%), а эффект удара меньше на 8,4%. Эти преимущества связаны с применением стрелочной кривой большего радиуса: 450 000 вместо 300 000 мм.

Хорошие результаты имеет вариант стрелочного перевода со стрелочной кривой касательного типа с окончанием в точке МЦК.

Динамико-кинематические показатели, определяющие плавность движения по боковому пути стрелочного перевода, с такой стрелочной кривой значительно лучше, чем по переводу проекта 2750. Горизонтальные поперечные ускорения меньше на 15,6%, а эффект удара меньше на 20%.

Преимущества в показателях, определяющих плавность движения подвижного состава по стрелочным переводам марки 1/13, иллюстрирует анализ эквивалентных конструкционных скоростей движения, т. е. скоростей движения, которые могут быть допущены, если принять в качестве критериев величины, установленные при проектировании стрелочного перевода проекта 2750 (нижняя из выделенных голубым цветом строчек табл. 4).

Схема с касательной кривой до переднего стыка крестовины имеет эквивалентную конструкционную скорость 60 км/ч, с секущей кривой до середины расстояния от переднего стыка до МЦК крестовины — 61 км/ч, а схема с кривой до МЦК крестовины — 66 км/ч.

Общим недостатком стрелочных переводов марки 1/13 является их невзаимозаменяемость с переводами марки 1/11. Укладывать такие переводы в путь следует там, где путевое развитие горловин станций допускает необходимую для этого реконструкцию.

Результаты расчетов показали, что практическая длина стрелочного перевода марки 1/13 со стрелочной кривой касательного типа с жесткой крестовиной (табл. 4, столбец 3) превышает практическую длину стрелочного перевода проекта 2750 на 17%. Перевод имеет исполнение крестовины, унифицированное под правое и левое ответвление пути. То есть по длине, необходимой для размещения перевода в горловине станции, такая схема стрелочного перевода более

целесообразна по сравнению со схемой перевода марки 1/11 с криволинейной крестовиной (табл. 2, столбец 5).

Варианты стрелочных переводов марки 1/13 с крестовиной, имеющей неподвижный сердечник, практически укладываются в требования взаимозаменяемости. Вариант, соответствующий столбцу 3 табл. 4, длиннее перевода проекта 2750 на 17%, а вариант, соответствующий столбцу 4 табл. 4, длиннее перевода проекта 2750 на 22%.

Размерные характеристики стрелочных переводов с непрерывной поверхностью катания следует сравнивать с аналогичными величинами для переводов с непрерывной поверхностью катания марки 1/11. Сравнение с переводами проекта 2956 показывает следующее.

Перевод марки 1/13 со стрелочной кривой по варианту, соответствующему столбцу 5 табл. 4, длиннее перевода проекта 2750 на 19%, а перевод, соответствующий столбцу 2 табл. 4, длиннее перевода проекта 2956 на 23%. При этом следует иметь в виду, что необходимость иметь для таких переводов правое и левое исполнение крестовин не имеет значения, так как для переводов с непрерывной поверхностью катания такое техническое решение используется и в переводах других конструкций и марок.

Применение стрелочных переводов с криволинейными крестовинами позволит улучшить плавность движения подвижного состава по стрелочным переводам, а в случае необходимости без существенных затрат повысить скорости движения в горловинах станций в местах, где это ограничивает возможности перевозочного процесса.

Отдельно следует рассмотреть вопрос *повышения плавности движения подвижного состава по симметричным стрелочным переводам*.

Основными конструкциями стрелочных переводов, эксплуатируемыми на горочных путях сортировочных станций российских железных дорог, являются симметричные стрелочные переводы типа Р65 марки 1/6 проектов 2307 и 8307 на деревянных и проектов 2628 и 2946 на железобетонных брусках. Интенсивно работающие стрелочные переводы на путях роспуска составов испытывают повышенное боковое воздействие, приводящее к быстрому износу металлических частей, особенно элементов стрелки. Улучшение условий движения по стрелочным кривым за счет совершенствования их геометрии позволит снизить интенсивность износа металлических частей, сделать более стабильной рельсовую колею и уменьшить затраты на эксплуатацию горочных стрелочных переводов. Однако, разрабатывая предложения по совершенствованию геометрии горочных стрелочных переводов, следует иметь в виду, что на горочных

Таблица 5

Параметры геометрических схем симметричных стрелочных переводов марки 1/6
(голубым цветом выделены строки с динамико-кинематическими параметрами стрелочных кривых)

Table 5

Geometries of symmetrical 1/6 turnout switches
(lines with dynamic and kinematic parameters of switch curves are highlighted in blue)

Геометрическая схема перевода	Типовая крестовина		Криволинейная крестовина с кривой до ее заднего стыка	
	Проект 2307	Проект 2946	Крестовина перевода 2307	Крестовина перевода 2946
1	2	3	4	5
Вид кривой	Секущая	Секущая	Секущая	Секущая
Радиус кривой, мм	200 770	200 770	231 350	244 260
Начальный стрелочный угол	0° 39' 2,14"	0° 39' 2,14"	0° 33' 53,6"	0° 32' 4,88"
Непогашенное ускорение, м/с ²	0,62	0,62	0,53	0,51
Параметр потери энергии, м/с	0,246	0,246	0,224	0,217
Эквивалентная конструкционная скорость при параметрах $j=0,64$ м/с ² , $W=0,225$ м/с	40 км/ч	40 км/ч	44 км/ч	45 км/ч
Передний вылет рамного рельса, мм	737	737	737	737
Задний вылет крестовины, мм	1380	2451	1380	2451
Практическая длина, мм	17 537	18 605	17 537	18 605

путях стрелочные переводы эксплуатируются в стесненных условиях и предлагаемые варианты должны обеспечивать полную взаимозаменяемость с переводами, эксплуатируемыми в настоящее время.

Наиболее перспективными являются варианты геометрии с увеличенными радиусами стрелочных кривых за счет применения криволинейных крестовин, у которых стрелочная кривая продлевается до заднего стыка крестовины. Результаты расчетов таких вариантов геометрии стрелочных кривых, выполненных по тем же методикам, как и для обыкновенных стрелочных переводов, с учетом особенностей симметричных конструкций приведены в табл. 5.

Как видно из данных, приведенных в табл. 5, предлагаемые варианты (столбцы 4 и 5) имеют те же размеры практической длины и переднего вылета рамного рельса, они полностью взаимозаменяемы с соответствующими стрелочными переводами, применяемыми на горочных путях в настоящее время. За счет продления стрелочных кривых до заднего стыка крестовин удалось увеличить радиусы стрелочной кривой с 200 770 м для перевода проекта 2307 до 231 350 м, а для перевода проекта 2946 до 244 260 м. Это значительно улучшило условия движения подвижного состава по стрелочным переводам и повысило плавность движения. Так, внезапно возникающее при набегании колес на остяк ускорение и непогашенные ускорения при движении по стрелочной кривой уменьшились при конструкционной скорости

движения для переводов проектов 2307 и 2946 с 0,62 до 0,53 и до 0,51 м/с² (на 15 и 18 %) соответственно, а величина параметра, характеризующего потерю кинетической энергии при набегании колеса на остяк, уменьшилась с 0,246 до 0,224 и до 0,217 м/с соответственно, т. е. на 9 и 12 %.

Полученное снижение уровня динамико-кинематических воздействий на симметричные стрелочные переводы марки 1/6 (с улучшенной геометрией стрелочных кривых) позволяет увеличить конструкционные скорости движения подвижного состава по ним с 40 до 45 км/ч, а также будет способствовать уменьшению интенсивности износа их элементов.

Имеющиеся в настоящее время технологические возможности российских производителей стрелочной продукции позволяют освоить производство стрелочных переводов с криволинейными крестовинами. При решении организационно-финансовых проблем такие конструкции могут быть освоены в производстве в кратчайшие сроки.

Обсуждение и заключение. Задача обеспечения плавности движения подвижного состава и комфортабельности езды пассажиров по стрелочным переводам является частью общей принципиальной проблемы обеспечения современных и перспективных потребностей перевозочного процесса на российских железных дорогах.

Одно из эффективных направлений решения этой проблемы — повышение пропускной способности

горловин станций, которая напрямую зависит от скоростей движения по стрелочным переводам и их комбинациям. Простейшее решение этой задачи — реконструкция горловин с применением стрелочных переводов пологих марок, однако возможности такой реконструкции ограничиваются стесненными условиями, высокой стоимостью, а порой и невозможностью выполнения реконструктивных работ. В связи с этим предложения авторов статьи, позволяющие увеличить скорости движения по стрелочным переводам без реконструкции горловин станций или с минимальным объемом реконструктивных работ, имеют большое практическое значение.

Представленные результаты работы позволяют не только достигнуть поставленной цели, а именно повышения плавности движения подвижного состава по стрелочным переводам, но и дают альтернативную возможность повышения скоростей движения. Помимо этого, улучшенные геометрические характеристики стрелочных кривых обеспечивают меньшее воздействие на путь, что должно положительно сказаться на затратах по обслуживанию стрелочных переводов в эксплуатационной работе.

В качестве предложения рекомендуется продолжить выполнение работ в направлении повышения скоростей движения по стрелочным переводам, распространив их на вопросы повышения скоростей движения по комбинациям стрелочных переводов и съездам.

Выводы. По результатам выполненных работ предложены геометрические схемы стрелочных переводов, позволяющих повысить плавность движения (или увеличить конструкционные скорости) на ответвленное направление, эффективные для сети российских железных дорог. Это стрелочные переводы следующих марок:

1. Марки 1/9 со стрелочной кривой касательного типа радиусом в зоне стрелки 370 123 м, а в остальной части стрелочной кривой до заднего торца крестовины — 264 052 м.
2. Марки 1/11 со стрелочной кривой касательного типа радиусом 305 011 м до переднего стыка крестовины и с практической длиной 34 858 м.
3. Марки 1/11 со стрелочной кривой касательного типа радиусом 370 123 м до МЦК и с практической длиной 37 554 м.
4. Марки 1/13 со стрелочной кривой секущего типа радиусом 450 000 м.
5. Марки 1/13 со стрелочной кривой касательного типа радиусом 516 039 м до МЦК.
6. Марки 1/6 симметричный с радиусом 244 260 м до заднего торца крестовины и с практической длиной 18 605 м.

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. Глюзберг Б. Э. Анализ динамики и кинематики движения по сочетаниям стрелочных переводов для реализации резервов пропускной способности горловин станций // Транспорт Урала. 2023. № 2 (77). С. 49–53. <https://doi.org/10.20291/1815-9400-2023-2-49-53>.
- Glyuzberg B. E. Analysis of movement dynamics and kinematics by combinations of switches for the fulfillment of reserves for increasing the throughput of station necks. *Transport of the Urals*. 2023;(2):49-53. (In Russ.). <https://doi.org/10.20291/1815-9400-2023-2-49-53>.
2. Расчет скорости движения по боковому пути для пологих марок стрелочных переводов / А. А. Локтев [и др.] // Транспорт Урала. 2020. № 2. С. 52–56. EDN: <https://elibrary.ru/yqddhn>.
- Loktev A. A., Korolev V. V., Shishkina I. V., Berezovskiy M. E. Calculation of the speed of movement on the side track for flat grades of switches. *Transport of the Urals*. 2020;(2):52-56. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/yqddhn>.
3. Выбор формы переводной кривой стрелочных переводов для высоких скоростей движения / А. А. Локтев [и др.] // Транспорт Урала. 2020. № 3. С. 62–67. EDN: <https://elibrary.ru/ficgyu>.
- Loktev A. A., Korolev V. V., Shishkina I. V., Kuskov V. S. Selection of shape for turnout curve of high-speed switches. *Transport of the Urals*. 2020;(3):62-67. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/ficgyu>.
4. Бржезовский А. М., Заверталюк А. В., Ромен Ю. С. Нормы допустимого воздействия на путь и методы испытаний подвижного состава // Железнодорожный транспорт. 2015. № 5. С. 40–44. EDN: <https://elibrary.ru/udzorp>.
- Brzhezovskiy A. M., Zavertalyuk A. V., Romen Yu. S. Standards of permissible impact on the track and methods of rolling stock testing. *Zheleznodorozhnyy transport*. 2015;(5):40-44. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/udzorp>.
5. О необходимости актуализации нормативов оценки геометрии рельсовой колеи / В. А. Гапанович [и др.] // Вестник Института проблем естественных монополий: Техника железных дорог. 2019. № 4 (48). С. 22–27. EDN: <https://elibrary.ru/jlhqpv>.
- Gapanovich V. A., Pevzner V. O., Kochergin V. V., Maksimov I. N. On the need to update the standards for evaluating the geometry of the rail track. *Railway Equipment*. 2019;(4):22-27. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/jlhqpv>.
6. Шапетько К. В., Третьяков В. В., Максимов И. Н. Комфорт проезда пассажиров как показатель взаимодействия пути и подвижного состава // Известия Транссиба. 2022. № 4 (52). С. 115–123. EDN: <https://elibrary.ru/spsiwib>.

Shapet'ko K. V., Tret'yakov V. V., Maksimov I. N. Passenger comfort as an indicator of interaction between track and rolling stock. *Journal of Transsib railway studies*. 2022;(4):115-123. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/spsiwbl>.

7. Расчеты и проектирование железнодорожного пути / В. В. Виноградов [и др.]. М.: Маршрут, 2003. 484 с. EDN: <https://elibrary.ru/qnqwzr>.

Vinogradov V. V., Nikonov A. M., Yakovleva T. G., Karpushchenko N. I. Calculations and designing of the railway track. Moscow: Marshrut Publ.; 2003. 484 p. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/qnqwzr>.

8. 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>.

Gluzberg 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>.

9. Смелянский И. В. Совершенствование нормативов непогашенных ускорений и его приращение при скоростном движении // Перспективные задачи развития железнодорожного транспорта: сб. ст. молодых ученых и аспирантов ВНИИЖТ. М.: Интекст, 2010. С. 232–235. (Труды ОАО «ВНИИЖТ»). EDN: <https://elibrary.ru/tambrp>.

Smelyanskiy I. V. Improvement of the norms of unbalanced accelerations and its increment in high-speed movement. In: *Prospects of railway transport development: Collection of articles by young scientists and postgraduate of the Railway Research Institute*. Moscow: Intext Publ.; 2010. p. 232–235. (Proceedings of the Railway Research Institute). (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/tambrp>.

10. Желнин Г. Г. Ограничения скоростей движения на стрелочных переводах, уложенных в кривых участках пути // Скорости движения поездов в кривых: сб. науч. тр. / под ред. О. П. Ершкова. М.: Транспорт, 1988. С. 33–39.

Zhelnin G. G. Turnout speed restrictions in curved track sections. In: Ershkov O. P. (ed.) *Train speeds in curves: Collection of scientific articles*. Moscow: Transport Publ.; 1988. p. 33–39.

11. Певзнер В. О., Ромен Ю. С. Основы разработки нормативов содержания пути и установления скоростей движения. М.: Интекст, 2013. 224 с. (Труды ОАО «ВНИИЖТ»). EDN: <https://elibrary.ru/sjrszh>.

Pevzner V. O., Romen Yu. S. *Basics of development of track maintenance and speed setting norms*. Moscow: Intext Publ.; 2013. 224 p. (Proceedings of the Railway Research Institute). (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/sjrszh>.

12. Шахунянц Г. М. Железнодорожный путь. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Транспорт, 1969. 536 с.

Shakhunyan G. M. *Railway track*. 2nd ed., revision and additions. Moscow: Transport Publ.; 1969. 536 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Борис Эйнихович ГЛЮЗБЕРГ,

д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник института, 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>

Павел Владимирович ТРЕГУБЧАК,

канд. техн. наук, директор научного центра «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>

Илья Владимирович ЦИТЦЕР,

главный инженер, Новосибирский стрелочный завод (НСЗ, 630004, г. Новосибирск, ул. Аксенова, д. 7), <https://orcid.org/0009-0004-5227-1459>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Boris E. GLUZBERG,

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

Pavel V. TREGUBCHAK,

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

Il'ya V. TSITSER,

Chief Engineer, Novosibirsk Switch Plant (630004, Novosibirsk, 7, Aksenova St.), <https://orcid.org/0009-0004-5227-1459>

ВКЛАД АВТОРОВ

Борис Эйнихович ГЛЮЗБЕРГ. Формирование направления исследований, разработка методики работы, выполнение расчетов, участие в формулировке выводов (50%).

Павел Владимирович ТРЕГУБЧАК. Формулировка цели работы, сбор информации для проведения расчетов, разработка методики расчетов, участие в формулировке выводов (25%).

Илья Владимирович ЦИТЦЕР. Проведение расчетов, составление геометрических схем, участие в формулировке выводов (25%).

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Boris E. GLUZBERG. Formulation of research focus, development of research methods, calculations, contribution to conclusions (50%).

Pavel V. TREGUBCHAK. Formulation of the goal and objectives, collecting information for calculations, development of calculation methods, contribution to conclusions (25%).

Il'ya V. TSITSER. Calculations, drafting geometrical diagrams, contribution to conclusions (25%).

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The authors have read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию 17.09.2024, рецензия от первого рецензента получена 25.10.2024, рецензия от второго рецензента получена 28.10.2024, рецензия от третьего рецензента получена 01.11.2024, принята к публикации 12.11.2024.

The article was submitted 17.09.2024, first review received 25.10.2024, second review received 28.10.2024, third review received 01.11.2024, accepted for publication 12.11.2024.

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Оригинальная статья

УДК 629.488.2:629.4.027.5

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

Эффективное использование и разработка колесообрабатывающих станков для нужд локомотивного комплекса

Р. Х. Рафиков¹✉, А. С. Шинкарук², Е. И. Елисейкин¹¹Инновационный инжиниринговый центр,
Москва, Российская Федерация²Федеральная пассажирская компания (ФПК),
Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Введение. Целью работы является формулировка рекомендаций по уменьшению времени обточки колесных пар локомотивов путем анализа конструкций станков, эффективности использования в сервисных локомотивных депо существующих типов колесотокарных и колесофрезерных станков отечественного и зарубежного производства. Наблюдаемый рост интенсивности движения и объемов перевозок по железным дорогам России требует обеспечения надежности и повышения эксплуатационных характеристик локомотивов. Колесная пара является одним из наиболее металлоемких и ответственных элементов ходовой части. Взаимодействие колеса и рельса вызывает комплекс физико-механических явлений, приводящих к интенсивным термомеханическим повреждениям поверхности катания бандажа — подрезу гребня, прокату, ползунам. Для устранения дефектов на поверхности катания требуется обточка колесной пары на станках режущим инструментом до получения требуемого исходного профиля — процесс, связанный с повышенными затратами времени. Поэтому важной задачей является минимизация издержек при обточке, что требует использования последних технологических решений, реализованных в новом станочном оборудовании, включая импортируемое.

Материалы и методы. Анализируются особенности развития мирового станкостроения и его влияние на рынок станкостроительной техники в России. Рассматриваются типы, модели, сравнительные характеристики, опыт эксплуатации, технического обслуживания и ремонта локомотивов с применением колесотокарных и колесофрезерных станков 96 сервисными локомотивными депо в 13 филиалах ООО «ЛокоТех-Сервис».

Результаты. Исследован парк колесообточных станков (типы, конструкция, состояние), рассчитана загрузка станков, рассмотрены аналоги зарубежного производства. На основе потребности сервисных локомотивных депо в переоснащении и данных о рынке колесообточного оборудования предложен мобильный колесотокарный станок с числовым программным управлением с профильной конструкцией.

Обсуждение и заключение. Определены узкие места эксплуатации станочного парка и приведены данные по его устареванию и подбору аналогов от иностранного производителя. Отечественные станки более адаптированы к специфике российских условий эксплуатации, зарубежные модели имеют преимущества в системах числового программного управления. Для устранения проблемы узких мест в обточке колесных пар предложены мероприятия по конструкторско-технологическим направлениям, обучению персонала, организации производства.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: локомотивы, колесные пары, колесотокарные станки, обточка без выкатки, обточка с выкаткой

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Рафиков Р. Х., Шинкарук А. С., Елисейкин Е. И. Эффективное использование и разработка колесообрабатывающих станков для нужд локомотивного комплекса // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2024. Т. 83, № 4. С. 348–361.



TECHNICAL MEANS OF RAILWAY TRANSPORT

Original article

UDK 629.488.2:629.4.027.5

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



Efficient use and development of wheel-working machines for the locomotive facility needs

Rafik H. Rafikov¹✉, Andrey S. Shinkaruk², Evgeniy I. Eliseykin¹

¹Innovative Engineering Centre,
Moscow, Russian Federation

²Federal Passenger Company,
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The study is intended to provide guidelines to reduce the machining time of locomotive wheel pairs by analysing the design and performance of existing types of wheel turning and milling lathes of domestic and foreign production in locomotive service depots. The observed growth in traffic intensity and volumes on Russian railways requires ensuring reliability and improving the performance of locomotives. The wheel pair is one of the most metal-intensive and critical elements of the undercarriage. The wheel and rail interaction causes a range of physical and mechanical phenomena inflicting intensive thermomechanical damage on the tyre tread surface: undercutting of the ridge, rolling, slides. Removal of tread surface defects requires turning the wheel pair on machine tools, until the required initial profile is obtained, which is a time-consuming process. Therefore, an important task is to minimise turning costs, which requires the use of the newest technological solutions implemented in new machine-tools, including imported equipment.

Materials and methods. The article analyses global machine-tool industry trends and their impact on the machine-tool market in Russia and considers types, models, comparative characteristics, experience in operation, maintenance and repair of locomotives using wheel turning and milling machines by 96 locomotive service depots in 13 branches of LocoTech-Service LLC.

Results. The paper examines the fleet of wheel turning machines (types, design, condition), calculated the load of the machines, and considered foreign-made analogues. A numerically controlled mobile wheel turning machine with a profile design has been developed based on locomotive service depot re-equipment needs and wheel turning market data.

Discussion and conclusion. The work identified the bottlenecks of the machine fleet operation and provided data on its obsolescence and selection of analogues from foreign manufacturers. Domestic machines are more adapted to Russian operating conditions, foreign models have advantages in numerical control systems. The paper proposes a number of design and technological, staff training, and production organisation measures to eliminate bottlenecks in wheel pair machining.

KEYWORDS: locomotives, wheel pairs, wheel lathes, machining without rolling out, machining with rolling out

FOR CITATION: Rafikov R. H., Shinkaruk A. S., Eliseykin E. Ya. Efficient use and development of wheel-working machines for the locomotive facility needs. *Russian Railway Science Journal*. 2024;83(4):348-361. (In Russ.).

Введение. Среди узлов экипажной части локомотива, подвергаемых пристальному вниманию и учету, находятся колесно-моторный блок и отдельные элементы, такие как колесные пары (КП), эксплуатируемые в различных условиях кривизны и профиля пути. При эксплуатации локомотива происходит изнашивание поверхности колес в зоне контакта с рельсом¹. Изнашивание поверхности катания колес, возникновение различных дефектов приводит к наибольшему среди узлов числу отказов и, следовательно, к выводу локомотива из эксплуатации в неплановый ремонт (табл. 1).

Для восстановления поверхности катания колеса до профиля, предусмотренного действующим стандартом², поверхность обтачивается до требуемого профиля [1, 2]. Систематизация методов восстановления и обработки профиля катания КП, выполненная в [3], объединяет методы в три основные группы: механическая обработка резанием по копиру (программе), обработка профильным инструментом, комбинированная обработка.

Срок службы колес определяется интенсивностью износа зоны гребня и поверхности катания. Начальная толщина бандажа нового колеса составляет 70 мм,

в процессе эксплуатации бандаж колеса подвергается естественному износу, а также обтачивается с целью восстановления профиля. При каждой обточке колеса с поверхности катания удаляется до 5 мм, а при наличии глубоких выщербин величина удаляемого слоя металла может достигать 7 мм. Количество переточек колес за срок службы составляет от 7 до 16. После депоовского ремонта допустимая минимальная толщина бандажа колеса — 24 мм, колеса с толщинами 22 мм и менее изымаются [1].

Обточка КП по стандартному профилю поверхности катания является традиционным, относительно простым способом восстановления профиля катания. Способ переточки колес по новому криволинейному профилю поверхности катания предложен в [2], где авторы показывают, что новый профиль позволяет существенно снизить контактные напряжения в колесе и рельсе и износ гребней бандажей и боковых поверхностей рельсов, увеличить дорожку катания колес и рельсов, тем самым уменьшая вероятность выкрашивания материала по кругу катания, снизить сопротивление движению в кривых, уменьшить скорость изнашивания контактных поверхностей колеса и рельса.

Известны два типа технологии обточки: с выкаткой КП из-под локомотива и без выкатки. Обработка КП с выкаткой на стационарных колесотокарных или колесофрезерных станках сопряжена с повышенными трудоемкостью и себестоимостью, большими затратами времени на выкатку и монтаж КП, переналадку в станке. Обточка КП без выкатки выполняется на подрельсовых или мобильных станках отечественного и зарубежного производства. Мобильные токарные станки востребованы ввиду возможности установки в любом сервисном локомотивном депо (СЛД) [2, 3], однако имеют ограничения по типу, глубине и размерам обрабатываемых дефектов и, как правило, применяются на ТО-2 и ТО-3, когда требуется в 1–2 прохода устранить, например, остроконечный накат на нескольких КП. Подрельсовые станки, наоборот, применяются на ТО-4, ТР и неплановых ремонтах для обточки ползунов, глубоких выщербин и трещин — для устранения крупных дефектов.

Современное состояние станочного парка. Основным методом устранения поверхностных дефектов КП является обточка бандажа с восстановлением профиля катания — с выкаткой из-под локомотива и без выкатки³ [4]. Для обточки КП с выкаткой в СЛД

Таблица 1

Данные об отказах основных узлов электропоездов
серий ЭТ2, ЭТ2М, ЭД2Т, ЭД4М, ЭД4МК

Table 1

Failures of main components of electric trains of ET2, ET2M, ED2T, ED4M, ED4MK series

Наименование узла	Число отказов, ед.	Процент числа отказов в общей сумме	Накопленный процент отказов
Колесная пара	107	33,4	33,4
Электрическое оборудование и аппараты	76	23,8	57,1
Зубчатые передачи	69	21,6	78,8
Токоприемники и крышное оборудование	34	10,6	89,4
Тормозное оборудование	24	7,5	96,9
Приборы безопасности и радиостанции	7	2,2	99,1
Вспомогательные машины	3	0,9	100
Итого	320	100	—

¹ Пышный И. М. Повышение ресурса бандажей колесных пар локомотивов на промышленном железнодорожном транспорте: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07. Екатеринбург, 2014. 169 с.

² ГОСТ 11018–2011. Колесные пары тягового подвижного состава железных дорог колеи 1520 мм. Общие технические условия: дата введения 01.01.2013. М.: Стандартинформ, 2012. 28 с.

³ Об утверждении Инструкции по осмотру, освидетельствованию колесных пар локомотивов и моторвагонного подвижного состава железных дорог колеи 1520 мм: распоряжение от 22.12.2016 № 2631р. Введ. 22.12.2016. М.: ЦЕНТРМАГ, 2023. 125 с.; Инструкция по формированию, ремонту и содержанию колесных пар тягового подвижного состава железных дорог колеи 1520 мм: № ЦТ-329. Введ. 16.03.2015. М.: ЦЕНТРМАГ, 2018. 78 с.

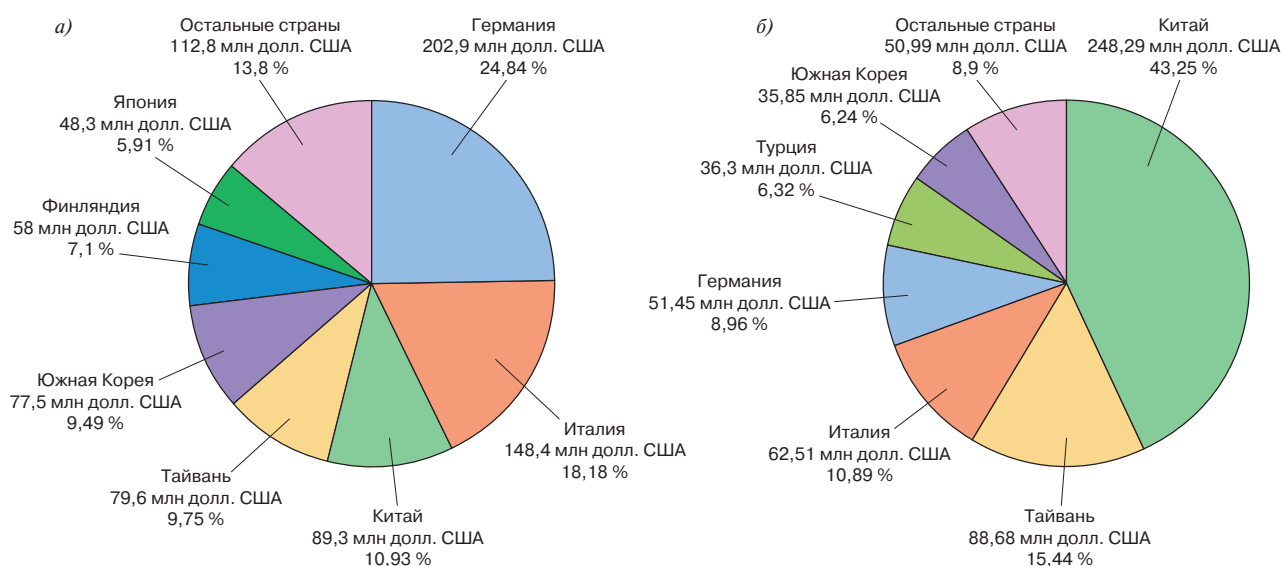


Рис. 1. Импорт металлообрабатывающего оборудования в Россию:
а — в 2021 г.; б — в 2022 г.

Fig. 1. Import of metalworking equipment to Russia:
a — in 2021; б — in 2022

и на заводах наиболее часто применяются станки отечественного производства и ближнего зарубежья (табл. 2). До начала текущего десятилетия на отечественный рынок поставлялись станки из США, Германии и Швейцарии. На долю станков иностранного производства приходилось порядка 48 % от общего количества закупаемого оборудования. Данные объемы в последние годы составляли примерно половину всего отечественного импорта машиностроительного оборудования в целом, поставки сопоставимы с совокупным внутренним производством аналогичной продукции [5, 6].

После сокращения импорта из стран Запада в период 2022–2024 гг. спрос на отечественную продукцию заметно возрос, а вектор импорта сместился в азиатскую сторону (значительную часть высокотехнологического станочного оборудования взамен вышеупомянутых стран поставляют Китай и Тайвань). В 2021 г. Россия импортировала металлообрабатывающего оборудования на 816,8 млн долл. США (11 433 ед.), а в 2022 г. — на 574,1 млн долл. США (9074 ед.). Падение за год составило 20,63 %. В 2021 г. первое место по поставке оборудования занимала Германия (24,84 % от всего импорта), затем Италия (18,18 %), далее — страны Азии (рис. 1). Если в 2021 г. Китай и Тайвань поставляли в Россию 20,68 % оборудования (рис. 1, а), то в 2022 г. доля Китая выросла до 43,25 %, Тайваня — до 15,45 % (рис. 1, б). Доля колесообточных станков от всего объема импортируемого оборудования за 2021–2022 гг. составила 0,4–0,8 % и на рис. 1 не показана.

Рассмотрим распределение колесообточных станков с выкаткой КП и без выкатки в СЛД ООО «ЛокоТех-Сервис» на начало 2022 г. (см. рис. 2). Анализ состояния парка колесотокарных станков по годам в разрезе — без выкатки и с выкаткой (см. рис. 3, 4) — показал, что 57 ед. (28 %) имеют срок службы 30 и более лет, 9 из них находятся в неработоспособном состоянии. Данный станочный парк преимущественно состоит из подрельсовых станков КЖ-20 и А-41 в равных количествах. Использование станков без выкатки КП в СЛД непосредственно влияет на время нахождения локомотива в нерабочем парке, что, в свою очередь, сказывается на коэффициенте готовности к эксплуатации⁴ [7–10].

Анализ парка колесообточного оборудования показал, что в двенадцати СЛД наблюдается низкая производительность однотипных станков ввиду их технического и морального устаревания. Возникают узкие места, увеличивающие простой локомотива на обточке КП. Для нивелирования дополнительного простоя локомотива сравним технические и стоимостные характеристики подрельсового колесотокарного станка UGE300/400N относительно ТК950Ф3, ТК2500, ТК4125, КЖ-20, А-41, приведенные в табл. 3 согласно информации от заводов-изготовителей.

По съему материала за один проход при одинаковой площади режущей пластины UGE300/400N производительнее относительно: ТК950Ф3 — на 40 %;

⁴ Типовая инструкция по расчету производственной мощности колесных цехов. М., 2001. 32 с.

TK2500 — на 70%. По продолжительности времени обточки (два прохода) по профилю бандажа UGE300/400N производительнее: КЖ-20 — на 200 %; А-41 — на 150 %; ТК950Ф3 — на 112 %; ТК2500 — на 70%. Стоимость UGE300/400N выше: ТК950Ф3 — на 53 %; ТК2500 — на 77 % (табл. 4).

Таблица 2

Модели колесообточных станков

Table 2

Wheel turning machine models

№ п/п	Производители	Модель	Страна изготовления
1	ООО «Таганрогский станкостроительный завод»	TK950Ф3М	Россия
		TK941Ф3	
2	ООО «ПромТех»		
3	ООО «ТехСтрой»	ТС912Ф3	
		TK950Ф3ТУ.01	
4	ОАО «Рязанский станкостроительный завод»	РТ905Ф1	
		ТС912Ф3	
	Новохоперский РМЗ ЮВС ДИ ЦДИ — филиала ОАО «РЖД»	А-41.01	
5	Алзамайский РМЗ ВСЖД — филиала ОАО «РЖД»	А-41	
	АО «Бурейский механический завод»		
	ООО «ТрансАтом»		
6	АО «Астраханский станкостроительный завод»	1В62Г	
7	АО «Вотский станкозавод»	Универсал-В ТШЗ-01	
8	ЗАО «Седин-ТКС»	1516	
9	ЗАО «ЭконикаТехно»	1Е516ПФ2И	
10	Краматорский завод тяжелого станкостроения (КЗТС)	КЖ-20ТФ1	Украина
		КЖ-1841	
		КЖ-1841.02	
		ТЭ6226.02-01	
		ТЭ6226.02-02	
		1836М.10	
		1836М.10(ТК936Фз)	
		КЖ-20Б	
		КЖ-20М	
11	АО «Ивано-Франковский завод»	А-41	
12	Interprinderea de masini unelte ARAD, I.M.U.A	SNB360	Румыния
13	Mecanica Roman	SC17	
14	Umaro, I.M. Roman	SC17CC	
15	Rafamet	UBC150	Польша
		TLA140	
		UGB150	
16	ZMM-BULGARIA	CU310	Болгария

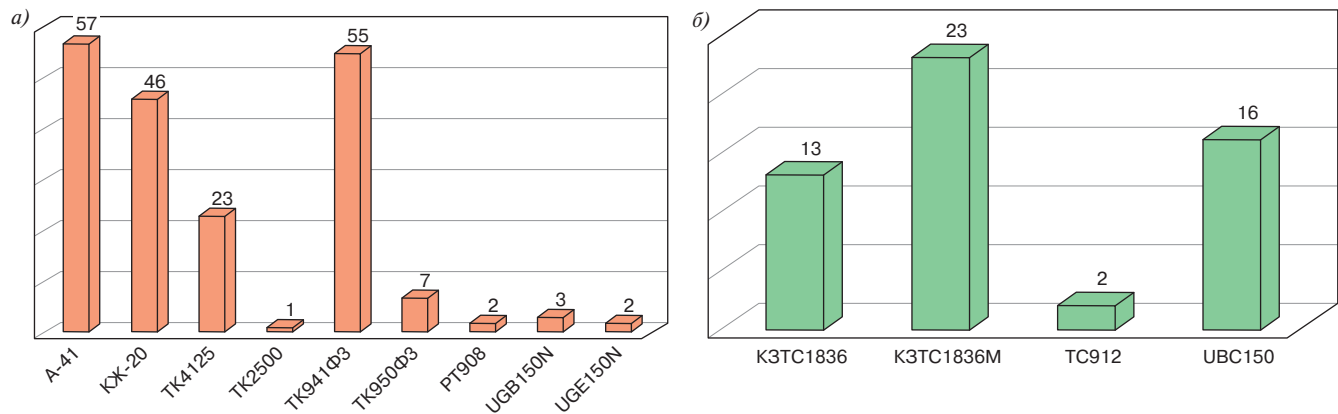


Рис. 2. Общее количество станочного парка для обточки КП:
 а — с выкаткой 196 ед. (78 % станочного парка); б — без выкатки 54 ед. (22 % станочного парка)

Fig. 2. Total number of machine fleet for wheel pair turning:
 а — with rolling out, 196 units (78 % of the machine fleet); б — without rolling out, 54 units (22 % of the machine fleet)

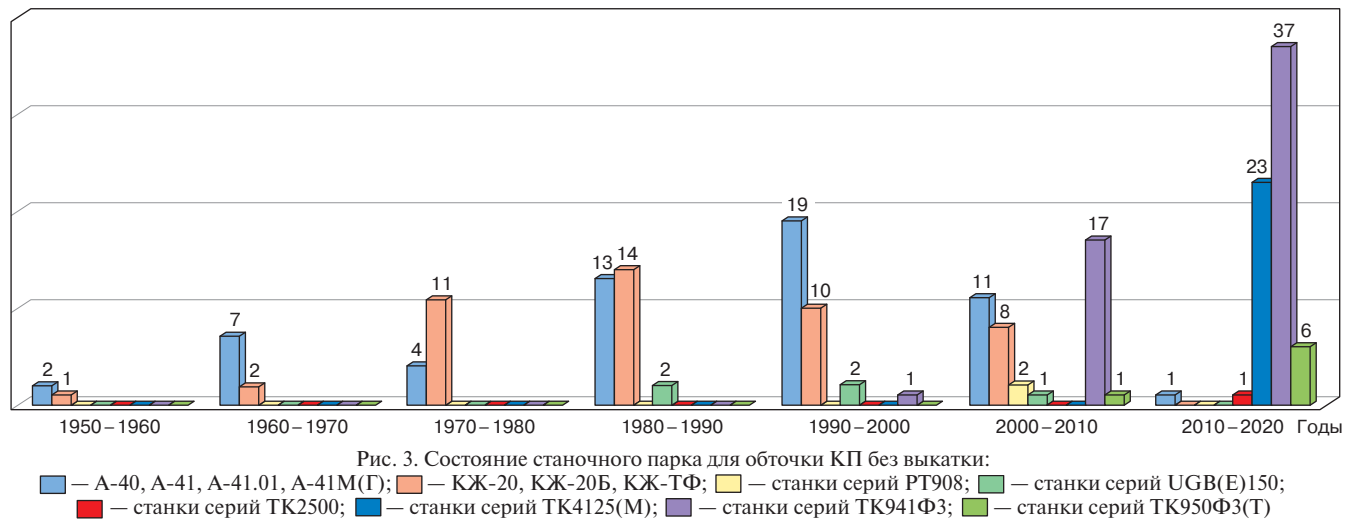


Рис. 3. Состояние станочного парка для обточки КП без выкатки:

— A-40, A-41, A-41.01, A-41M(G); — KЖ-20, KЖ-20Б, KЖ-ТФ; — станки серий РТ908; — станки серий УGB(E)150; — станки серий ТК2500; — станки серий ТК4125(M); — станки серий ТК941Ф3; — станки серий ТК950Ф3(T)

Fig. 3. Condition of the machine fleet for wheel pair turning without rolling out:

— A-40, A-41, A-41.01, A-41M(G); — KZh-20, KZh-20B, KZh-TF; — machines of RT908 series; — machines of UGB(E)150 series; — machines of TK2500 series; — machines of TK4125(M) series; — machines of TK941F3 series; — machines of TK950F3(T) series

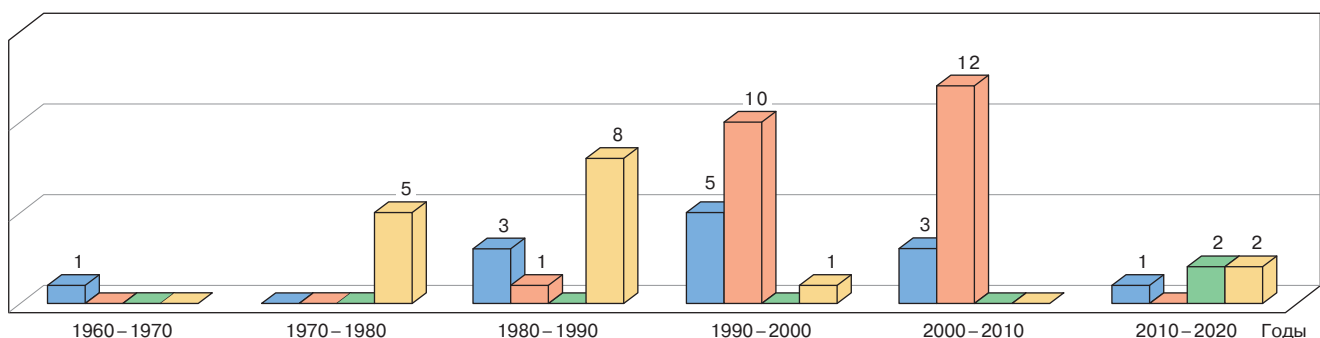


Рис. 4. Состояние станочного парка для обточки КП с выкаткой:

— КЗТС1836, КЗТС1836Б, КЗТС1836Б-03; — КЗТС1836М10, КЗТС1836М17; — станки серий ТС912Ф3; — станки серий UBC150

Fig. 4. Condition of the machine fleet for wheel pair turning with rolling out:

— KZTS1836, KZTS1836B, KZTS1836B-03; — KZTS1836M10, KZTS1836M17; — machines of TS912F3 series; — machines of UBC150 series

Таблица 3

Характеристики подрельсовых колесообточных станков

Table 3

Characteristics of under-rail wheel turning machines

Характеристики	Производитель					
	КЗТС	АО «Ивано-Франковский завод»	ООО «ТехСтрой»			Rafamet
	КЖ-20 (фрезерный)	А-41	ТК4125	ТК950Ф3	ТК2500	UGE300/ 400N
Нагрузка на ось подвижного состава минимальная, кН	160	30	180	50	30	30/40
Нагрузка на ось подвижного состава максимальная, кН	220	н/д	250	250	245	300/400
Сечение стружки, мм ²	н/д	Ручная подача	2×6	2×6	2×3	2×10
Скорость резания, м/мин	60	80	90	90	20–90	60
Работа двумя суппортами параллельно	В наличии	Нет	В наличии	В наличии	В наличии	В наличии
Привод вращения КП	Независимый	От локомотива	От локомотива	Независимый	Независимый	Независимый
Мощность общая, кВт * с учетом выпрямительного преобразователя для питания ТЭД	95	30*	26*	90	30	100
Время обточки по результатам хронометражных измерений, ч ** по данным завода-изготовителя	1,23	1,04	0,92	0,87	0,7	0,41**
Стоимость станка, млн руб.	Снят с производства	Снят с производства	40	70	60,3	107,12

Аналогично сравним технические и стоимостные характеристики станка UDA125N для обточки КП с выкаткой относительно TC912Ф3, UBF112N UFD140N, приведенные в табл. 5 и 6 также согласно информации от заводов-изготовителей. По съему материала за один проход при одинаковой площади режущей пластины UDA125N производительнее относительно: КЗТС1836М — на 200%; TC912Ф3 — на 20% (табл. 6). По продолжительности времени обточки (один проход) по профилю бандажа UDA125N производительнее: КЗТС1836М — на 200%; TC912Ф3 — на 250%. Стоимость UDA125N выше TC912Ф3 на 121%. Дальнейший сравнительный анализ трудоемкости обточки КП на колесообточных станках выполнен по информации, занесенной в шаблоны работ в автоматизированной системе управления «Сетевой график» (АСУ СГ), а также полученной в ходе хронометражных измерений обточки на наиболее распространенных в СЛД станках (табл. 5, 6).

Согласно представленным данным, возможность снижения времени на обточку одной КП зависит от

использования высокотехнологичных станков и их типов: на 1,1–2,1 ч при применении UGE300/400N и 1–1,5 ч при применении UDA125N. Но поскольку оборудование производства Rafamet является санкционным и не поставляется в Россию, то необходим поиск и устранение узких мест в эксплуатации имеющегося станочного парка (табл. 7).

Загрузка основного оборудования колесного цеха производилась из расчета обеспечения годовой производственной программы по каждой серии локомотивов⁵. Пропускная способность основного оборудования колесного цеха определяется из выражения

$$M = P n K_{\text{ог}} T, \quad (1)$$

где P — количество единиц однотипного оборудования; $ч$ — число фактических рабочих дней в году; n — количество рабочих смен в сутки, принятое предприятием; $K_{\text{ог}}$ — коэффициент использования оборудования; T — норма выработки в единицах продукции в смену.

⁵ Там же.

Таблица 4

Характеристики колесотокарного станка UGE300/400N в сравнении с применяемыми моделями

Table 4

Comparison of the UGE300/400N wheel lathe with used models

Характеристики	Применяемая модель станка			
	КЖ-20	А-41	ТК950Ф3	ТК2500
Производительность по съему материала за один проход при одинаковой площади режущей пластины	Фрезеровка профиля	Выше на 300%	Выше на 40%	Выше на 70%
Работа двумя суппортами параллельно	В наличии	Нет	В наличии	В наличии
Привод вращения КП	Независимый	От локомотива	Независимый	Независимый
Производительность обточки КП по результатам хронометражных измерений, ч (в один проход)	Выше на 200 %	Выше на 150 %	Выше на 112 %	Выше на 70 %
Увеличение общей мощности станка, %	На 5 %	Увеличение на 200 %	На 10 %	На 200 %
Увеличение стоимости станка, %	Снят с производства	Снят с производства	На 53 %	На 77 %

Таблица 5

Характеристики колесообточных станков с выкаткой КП

Table 5

Characteristics of wheel rolling machines with wheel pair rolling out

Характеристики	Производитель				
	КЗТС	ООО «ТехСтрой»	Rafamet		
	КЗТС1836М	ТС912Ф3	UBF112N(В)	UDA125N	UFD140N
Минимальный обрабатываемый диаметр, мм	840	700	700	660	540
Максимальный обрабатываемый диаметр, мм	1250	1250	1250	1250	1250
Максимальная масса колесной пары, кг	4000	5000	3000	4500	5000
Сечение стружки, мм ²	2×4	2×10	2×10	2×12	2×18
Скорость резания, м/мин	80	90	60–90	60–90	60–90
Точность обработки профиля, мм	0,2–0,3	0,1	0,1	0,1	0,1
Непостоянство диаметра после обточки, мм	0,2–0,3	0,2	0,15	0,15	0,15
Работа двумя суппортами параллельно	Да	Да	Да	Да	Да
Мощность общая, кВт	90	70	80	100	110
Производительность обточки КП по результатам хронометражных измерений, ч (в два прохода) * данные от завода-изготовителя	1,25	1,43	0,41*	0,41*	0,41*
Изготовление станины станка	Цельнолитая, чугунная	Сварная	Цельнолитая, чугунная	Цельнолитая, чугунная	Цельнолитая, чугунная
Стоимость станка, млн руб.	Снят с производства	50	88,2	110,9	140,1

Оборудование колесного цеха специализировано, т. е. на каждом станке, как правило, выполняются определенные технологические операции. Загрузка каждой единицы (или группы одноименных) оборудования колесного цеха определяется по следующей формуле:

$$K = \frac{\left(\frac{N_1}{T_1}\right) + \left(\frac{N_2}{T_2}\right) + \dots + \left(\frac{N_n}{T_n}\right)}{\Pi \cdot 2 \cdot 251 \cdot K_{06}}, \quad (2)$$

где $N_1, N_2 \dots N_n$ — количество отдельных элементов или КП в сборе, шт., которые необходимо обработать на данной единице (или группе единиц) оборудования в год для обеспечения годовой программы цеха; $T_1, T_2 \dots T_n$ — прогрессивные нормы съема в смену каждого вида продукции с данного оборудования в единицах продукции.

В результате анализа данных (табл. 8) выявлены узкие места по СЛД Ачинск, Нижнеудинское, Улан-Удэнское, эксплуатирующим станки А-41, и по СЛД

Карасук, Лиски, Тюмень, эксплуатирующим станки КЖ-20, с превышением 100%-й загрузки (при переводе на 11-часовой рабочий день загрузка составляет 75 %), что не обеспечивает требуемую производительность.

Помимо устранения узких мест в эксплуатации имеющихся станков другим путем уменьшения издержек на обточку КП является разработка мобильных станков упрощенной конструкции, с возможностью изготовления и сборки на базе СЛД напрямую. На сегодняшний день отечественной и зарубежной промышленностью выпускаются различные модели мобильных станков, ранее рассмотренных в работе [11]. Необходимо отметить, что на многих моделях подобных станков подача осуществляется оператором вручную. Поскольку поверхность катания КП имеет сложную геометрию, ручной подачей трудно или вовсе невозможно точно выдержать заданные

размеры, поэтому целесообразно использовать технологии числового программного управления (ЧПУ).

Одним из основных факторов, влияющих на конструкцию мобильного колесотокарного станка, являются габариты нижней части подвижного состава и расположение тормозной рычажной передачи. Так, ранее представленная в работе [11] конструкция станка для обточки КП электровозов серии ВЛ80 всех индексов не предусматривала ограниченного пространства по высоте. Предлагался продольный суппорт, оснащенный шарико-винтовой передачей (ШВП) для перемещения на всю длину пролета между рельсами, однако ШВП повышенной длины дороги и сложны в изготовлении. Важно также учитывать попадание стружки, пыли и грязи на винт и каретку ШВП, что повышает требования к эксплуатации станка.

Таблица 6

Характеристики колесотокарного станка UDA125N в сравнении с применяемыми моделями

Table 6

Comparison of the UDA125N wheel lathe with used models

Характеристики	Применяемая модель станка	
	КЗТС1836М	ТС912Ф3
Производительность по съему материала за один проход при одинаковой площади режущей пластины	Выше на 200 %	Выше на 250 %
Работа двумя суппортами параллельно	В наличии	В наличии
Производительность обточки КП по результатам хронометражных измерений, ч (в два прохода)	Выше на 200 %	Выше на 20 %
Увеличение общей мощности станка, %	На 10 %	На 30 %
Увеличение стоимости станка, %	Снят с производства	На 121 %

Таблица 7

Сравнительные данные о трудоемкости обточки КП

Table 7

Comparison of the labour intensity of wheel pair turning

Модель	Тип	Средняя трудоемкость обточки одной КП, ч (по данным АСУ СГ)	По результатам хронометражных испытаний			
			Вспомогательная операция, ч	Токарная операция, ч	Подготовительная операция, ч	Общая трудоемкость обточки, ч
А-41	Подрельсовый	2,10	1,44	1,04	0,11	2,6
КЖ-20	Подрельсовый	2,00	0,53	1,23	0,45	2,2
КЗТС1836М	С выкаткой	1,75	0,20	1,25	0,12	1,57
ТК2500	Подрельсовый	0,40	0,56	0,70	0,23	1,50
ТК950Ф3	Подрельсовый	1,80	0,20	0,87	0,07	1,14
ТС912Ф3	С выкаткой	1,94	0,20	1,43	0,26	1,90
Станки производства Rafamet						
UBF112N	С выкаткой	—	0,05*	0,41*	0,03*	0,49*
UDA125N	С выкаткой	—				
UFD140	С выкаткой	—				
UGE300/400N	Подрельсовый	—	0,14*		0,31*	0,87*

*Данные предоставлены заводом-изготовителем

Таблица 8

Данные о загрузке подрельсовых станков 1950–1990 гг. выпуска

Table 8

Utilisation of under-rail lathes of 1950–1990 production years

Управление по железной дороге	СЛД ООО «ЛокоТех-Сервис»	Станок	Год выпуска	Среднегодовое количество обточек	Трудоемкость обточки, ч (хронометраж)	Загрузка станка при 8-часовом рабочем дне (247 раб. дней), %	Загрузка станка при 11-часовом рабочем дне (365 раб. дней), %
Забайкальское	Раздольное	А-41	1988	741	2,6	97,5	48
Октябрьское	Кемское	А-41	1984	204	2,6	26,8	13,2
	Санкт-Петербург	КЖ-20	1988	245	2,2	27,3	13,4
	Санкт-Петербург-Сортировочный-Витебский	КЖ-20	1985	502	2,2	55,9	27,5
		А-41	1974	5 (неисправен)	0	0	0
Западно-Сибирское	Барнаул	А-41	1966	50	2,6	6,6	3,2
	Барнаул (СО Кулунда)	А-41	1958	0 (неисправен)	0	0	0
	ПТОЛ Новосибирск-Главный	А-41	1965	0 (неисправен)	0	0	0
	Карасук	КЖ-20	1980	1485	2,2	165,3	81,4
	Топки	А-41	1957	0 (консервация)	0	0	0
Юго-Восточное	Россошь	КЖ-20	1964	73	2,2	8,1	4
	Лиски	КЖ-20	1979	1500	2,2	167	82,2
Северо-Кавказское	Батайск	А-41	1960	70	2,6	9,2	4,5
		КЖ-20	1972	1250	2,2	139,2	68,5
	Морозовская	А-41	1981	480	2,6	63,2	31,1
	Минеральные Воды-Грузовое	КЖ-20	1978	274	2,2	30,5	15
	Сальск-Грузовое	А-41	1981	235	2,6	30,9	15,2
	Гудермес-Грозненский	КЖ-20	1965	300	2,2	33,4	16,4
	Дербент-Махачкалинский	А-41	1982	240	2,6	31,6	15,5
Красноярское	Ачинск	А-41	1983	2124	2,6	279,5	137,5
	Боготол-Сибирский	А-41	1962	1020	2,6	134,2	66,1
	Абакан	А-41	1989	99	2,6	13	6,4
	Канск-Иланский	А-41	1960	100	2,6	13,2	6,5
	Красноярск	UGB150N	1982	0 (неисправен)	0	0	0
Восточно-Сибирское	Братское	А-41	1984	571	2,6	75,1	37
	Зиминское	А-41	1961	24	2,6	3,2	1,6
	Иркутское	А-41	1980	861	2,6	113,3	55,8
		А-41	1980	836	2,6	110	54,1
	Нижнеудинское	А-41	1961	2500	2,6	328,9	161,9
	СО Лена	А-41	1980	2	2,6	0,3	0,1
	Новая Чара	А-41	1980	300	2,6	39,5	19,4
	Улан-Удэнское	А-41	1971	1200	2,6	157,9	77,7
		А-41	1980	1200	2,6	157,9	77,7
Свердловское	Серов	А-41	1979	0 (неисправен)	0	0	0
	Тюмень	КЖ-20	1981	1521	2,2	169,3	83,3
	Югра	КЖ-20	1987	471	2,2	52,4	25,8

Окончание табл. 8

End of Table 8

Управление по железной дороге	СЛД ООО «ЛокоТех-Сервис»	Станок	Год выпуска	Среднегодовое количество обточек	Трудоемкость обточки, ч (хронометраж)	Загрузка станка при 8-часовом рабочем дне (247 раб. дней), %	Загрузка станка при 11-часовом рабочем дне (365 раб. дней), %
Московское	Москва-Сортировочная	КЖ-20	1959	0 (неисправен)	0	0	0
		КЖ-20	1977	121 (в КР)	2,2	0	0
	Смоленск	КЖ-20	1986	126	2,2	14	6,9
	Унеча	КЖ-20	1978	29	2,2	3,2	1,6
	Брянск-Льговский	КЖ-20	1973	1120	2,2	124,7	61,4
		КЖ-20	1987	0 (неисправен)	0	0	0
Приволжское	Астраханское	КЖ-20	1984	593	2,2	66	32,5
	Волгоград	КЖ-20	1970	720	2,2	80,2	39,5
	Саратов	КЖ-20	1974	350	2,2	39	19,2
Дальнево-сточное	Амурское	А-41	1971	300	2,6	39,5	19,4
	Приморское	А-41	1990	346	2,6	45,5	22,4
	Сибирцево (СО Ружино)	КЖ-20	1984	280	2,2	31,2	15,3
Северное	Няндом-Северная	КЖ-20	1971	290	2,2	32,3	15,9
	Сольвычегодск	КЖ-20	1989	300	2,2	33,4	16,4
Горьковское	Муром-Восточный	КЖ-20	1986	80	2,2	8,9	4,4
	Лянгасово-Западный	КЖ-20	1989	272	2,2	30,3	14,9
	СО Зуевка	КЖ-20	1983	66	2,2	7,3	3,6
	Красноуфимск-Уральский	КЖ-20	1979	1350	2,2	150,3	74
	Юдино-Казанский	КЖ-20	1978	700	2,2	77,9	38,4
	Горький-Центральный	КЖ-20	1981	388	2,2	43,2	21,3

Превышение нормативной загрузки станка при 8-часовом рабочем дне.

Превышение нормативной загрузки станка при 11-часовом рабочем дне, потребность в замене станка.

СО — сервисное отделение.

Проведя расчет оптимальных режимов резания с использованием ПО CoroPlus ToolGuide, заметим, что подача на оборот $s = 0,69$ мм/об, скорость резания $v = 212$ м/мин, скорость вращения колесной пары 54 об/мин. Рассчитав по полученным данным силы резания, получим $P_z = 970$ Н, $P_y = 320$ Н, $P_x = 470$ Н. Схожие результаты приведены в работе [12]. Крутящий момент, необходимый для преодоления сил резания, составит 5 Н·м. Для плавной работы ШВП с рассчитанными ранее нагрузками предлагается использовать шаговый электродвигатель с планетарным соосным редуктором. Редуктор позволит использовать шаговый двигатель с крутящим моментом 2 Н·м и 10 Н·м момента на выходе, что уменьшит себестоимость станка [13].

Предлагаемая конструкция мобильного станка с ЧПУ (рис. 5) для обточки бандажей КП состоит из продольного 3 и поперечного 4 приобретаемых суппортов с разной длиной хода (100 мм для поперечного

и 300 мм для продольного). В качестве рамы для станка используются неравнобокие уголки 6 длиной, большей пролета между рельсами. Данная конструкция позволяет последовательно обрабатывать оба колеса. Обточив один бандаж 9, спарку суппортов необходимо вручную переместить к другому бандажу по профильным направляющим 7, закрепленным на раме. Перемещение выполняется до упора 5, после чего спарка фиксируется. Каретки направляющих 8 крепятся к пластинам 11 с проставками 12, установленными вдоль продольного суппорта. Закрепление станка на рельсах производится двумя болтами 1, упирающимися в один рельс, за второй рельс зацеплен базирующий уголок 2 (рис. 6) [14].

Расшивка производственных ограничений при эксплуатации станков по обточке колесных пар производится при использовании следующих мероприятий:

- внедрение многозадачных станков, которые могут выполнять несколько операций последовательно,

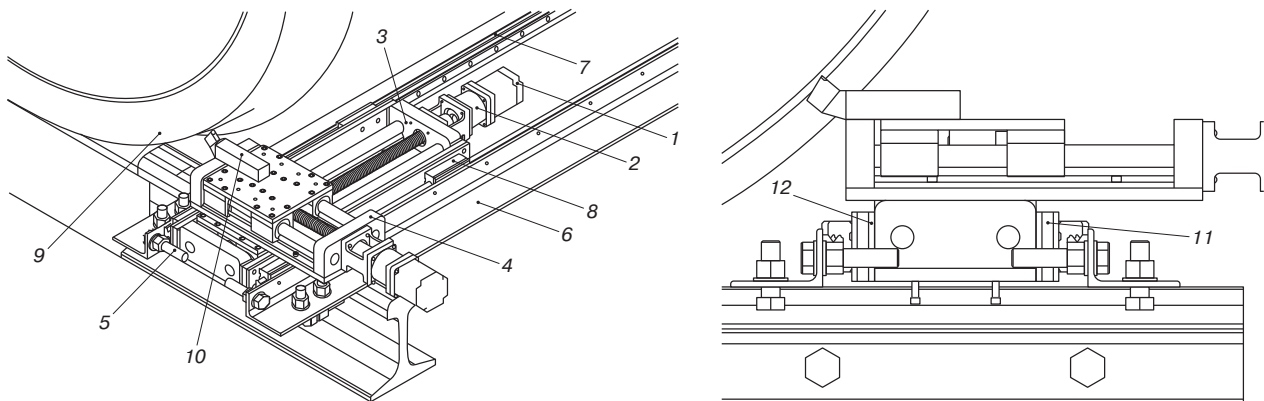


Рис. 5. Общий вид станка с ЧПУ для обточки КП [14]:

1 — шаговый электродвигатель; 2 — редуктор; 3 — продольный суппорт; 4 — поперечный суппорт; 5 — упор; 6 — рама; 7 — направляющая; 8 — каретка; 9 — бандаж; 10 — резец; 11 — пластина; 12 — проставка

Fig. 5. General view of the numerically controlled machine for wheel pair turning [14]:

1 — stepping motor; 2 — gearbox; 3 — longitudinal support; 4 — transverse support; 5 — stopper; 6 — frame; 7 — guide; 8 — carriage; 9 — band; 10 — cutter; 11 — plate; 12 — spacer

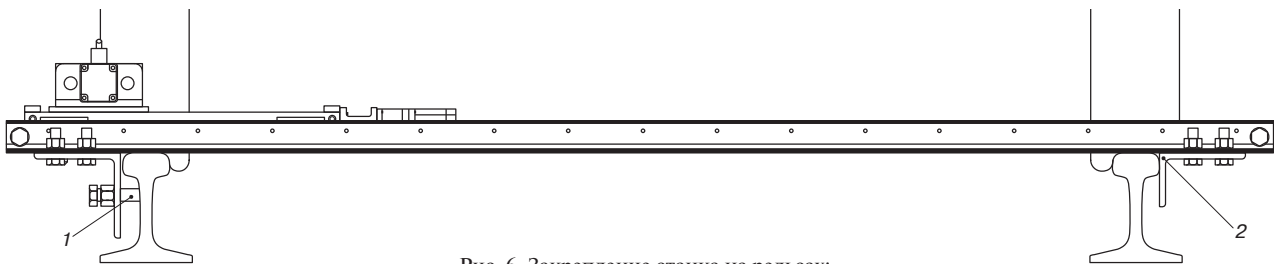


Рис. 6. Закрепление станка на рельсах:

1 — крепежные болты; 2 — базирующий уголок

Fig. 6. Fastening of the machine to the rails:

1 — fixing bolts; 2 — base corner

уменьшая время на транспортировку деталей между станками;

- применение различных систем охлаждения и фильтрации стружки для поддержания рабочих температур и чистоты рабочих зон, что также может положительно сказаться на сроках обработки;

- проведение мониторинга и анализа производительности. Регулярный анализ данных о времени обработки поможет выявить узкие места в процессе и оптимизировать его, перераспределяя станки из одного депо в другое.

Обсуждение и заключение. Уход таких зарубежных станкостроительных компаний, как Rafamet, с российского рынка в 2022 г. привел к тому, что спрос на отечественные станки в данной отрасли значительно вырос. Однако на сегодняшний день отечественные колесообточники по техническим характеристикам уступают иностранным по производительности — например, UGE300/400N.

Проведенный анализ состояния парка колесотокарных станков в СЛД ООО «ЛокоТех-Сервис» показал, что 57 станков имеют срок службы 30 лет и более, при этом 9 из них полностью неработоспособны. Значительная

часть станочного парка составляют станки типа КЖ-20 и А-41 в равных количествах, устаревшие технически и морально. Узкие места, выявленные в СЛД после анализа загрузки подрельсовых станков 1950–1990 гг. выпуска, являются серьезной проблемой и отмечены в СЛД Ачинск, Нижнеудинское, Улан-Удэнское, Карасук, Лиски, Тюмень, где станки эксплуатируются с перегрузкой более 100 % по сравнению с требуемой (свыше 75 % при условии 11-часового рабочего дня). Несоответствия в загрузке станков приводят к простоем локомотивов в ожидании обточки на ТО-4 или на неплановых ремонтах.

Для решения проблемы узких мест в обточке КП локомотивов необходимо выполнить:

1. Разработку отечественного колесообточного оборудования нового поколения с применением реверс-инжиниринга конструкций и программного обеспечения зарубежных станков, таких как UGE300/400N, имеющих повышенные характеристики жесткости и стабильности при загрузке. При этом некоторые зарубежные модели имеют преимущества в системах ЧПУ и повышенном качестве обработки, тогда как отечественные могут быть более адаптированы к специфике российских условий эксплуатации.

2. Дооснащение существующего оборудования, в том числе путем разработки и изготовления ремонтными организациями (с привлечением научно-производственных организаций) собственных станков, включая мобильные колесотокарные профильной конструкции. Внедрение мобильных станков собственного изготовления позволит оперативно устранять поверхностные дефекты КП локомотива на ТО-2 вместо использования стационарного колесообточного оборудования на ТО-4 и повышения его загрузки.

3. Организацию рабочего процесса: введение единого стандарта для всех этапов работы с КП, включая очистку, проверку, обточку и контроль качества. Это позволит снизить время на переключение между этапами.

4. Обучение и повышение квалификации персонала: организацию тренингов для сотрудников на тему эффективного использования оборудования, понимания методов работы с современным инструментом.

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

- Бисерикан М. И., Иванова Ю. А., Иванов В. В. Совершенствование технологии обточки колес подвижного состава с усталостными дефектами // Омский научный вестник. 2012. № 2 (110). С. 120–125. EDN: <https://elibrary.ru/pbgnhf>.
- Biserikan M. I., Ivanova Yu. A., Ivanov V. V. Improvement of technology of turning of rolling stock wheels with fatigue defects. *Omskiy nauchnyy vestnik*. 2012;(2):120–125. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/pbgnhf>.
- Корольков Е. П., Коржин С. Н., Козлов М. П. Семь аргументов за переточку и внедрение колес с криволинейным профилем // Наука и техника транспорта. 2018. № 3. С. 29–33. EDN: <https://elibrary.ru/uyrhvu>.
- Korol'kov E. P., Korzhin S. N., Kozlov M. P. Seven arguments for regrinding and curved profile wheels. *Science and technology in transport*. 2018;(3):29–33. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/uyrhvu>.
- Влияние структуры и механических характеристик колесных стальных на изнашивание и режимы восстановления профиля колесных пар: монография / В. С. Кушнер и др.; под ред. И. А. Иванова, В. С. Кушнера; Минобрнауки России, ОмГТУ. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2015. 224 с. EDN: <https://www.elibrary.ru/vcbhmv>.
- Kushner V. S., Krut'ko A. A., Vorob'yev A. A., Gubenko S. I., Ivanov I. A., Kerentsev D. E. *Influence of the structure and mechanical*

properties of wheel steels on wear and modes of wheel pair profile restoration: monograph. Omsk: Omsk State Technical University Publ.; 2015. 224 p. (In Russ.). EDN: <https://www.elibrary.ru/vcbhmv>.

4. Тютин В. И. Шаблоны для измерения геометрических параметров колес // Локомотив. 1998. № 9. С. 29–30.

Tyutin V. I. Templates for measuring wheel geometries. *Locomotive*. 1998;(9):29–30. (In Russ.).

5. Афанасьев А. А. Промышленная политика России по достижению технологического суверенитета: теоретико-методологические основы и практические аспекты. М.: Первое экономическое издательство, 2023. 204 с. EDN: <https://elibrary.ru/cytckm>.

Afanasiev A. A. *Industrial policy of Russia to achieve technological sovereignty: theoretical and methodological foundations and practical aspects*. Moscow: First Economic Publ.; 2023. 204 p. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/cytckm>.

6. Афанасьев А. А. Об оценке влияния международных санкций на условия функционирования отечественной промышленности // Экономические отношения. 2022. № 2. С. 179–194. <https://doi.org/10.18334/eo.12.2.114858>.

Afanasiev A. A. Concerning the assessment of the impact of international sanctions on Russian industry. *Journal of International Economic Affairs*. 2022;(2):179–194. (In Russ.). <https://doi.org/10.18334/eo.12.2.114858>.

7. Формирование научно обоснованных требований к инновационному подвижному составу в части надежности / О. Н. Назаров [и др.] // Техника железных дорог. 2018. № 3. С. 40–48. EDN: <https://elibrary.ru/xvviyp>.

Nazarov O. N., Babkov Yu. V., Belova E. E., Perminov V. A. Formation of scientifically based requirements for innovative rolling stock in terms of reliability. *Railway Equipment*. 2018(3):40–48. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/xvviyp>.

8. Лакин И. И., Пустовой И. В. Как повысить коэффициент технической готовности локомотивов // Локомотив. 2016. № 11. С. 26–27. EDN: <https://elibrary.ru/wwyoyd>.

Lakin I. I., Pustovoy I. V. How to improve the technical availability of locomotives. *Locomotive*. 2016;(11):26–27. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/wwyoyd>.

9. Филимонов С. В. Оптимальная обточка бандажей как способ повышения их ресурса // Вестник МИИТа. 2003. № 9. С. 79–82.

Filimonov S. V. Optimal band turning as a way to increase service life. *Vestnik MIITa*. 2003;(9):79–82. (In Russ.).

10. Воротилкин А. В. Повышение эффективности локомотивного и вагонного хозяйств // Железнодорожный транспорт. 2011. № 2. С. 24–27. EDN: <https://elibrary.ru/nuefzh>.

Vorotilkin A. V. Improving the efficiency of locomotive and carriage facilities. *Zhelezнодороzhnyy transport*. 2011;(2):24–27. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/nuefzh>.

11. Куликовский М. Ю., Шапошников А. М. Разработка конструкции мобильного станка с ЧПУ для обточки бандажей (колес) колесных пар // Семьдесят третья Всероссийская научно-техническая конференция студентов, магистрантов и аспирантов высших учебных заведений с международным участием, Ярославль, 20 апреля 2020 г.: сб. материалов конф.: в 2 ч. Ярославль: Издательство ЯГТУ, 2020. Ч. 2. С. 159–163. EDN: <https://www.elibrary.ru/phccjj>.

Kulikovsky M. Yu., Shaposhnikov A. M. Development of mobile CNC machine design for turning of wheel pair bands (wheels). In: *The Seventy Third Russian National Scientific and Technical Conference of students, undergraduates and postgraduates of higher educational institutions with international participation, 20 April 2020, Yaroslavl: Conf. Proceedings. 2 parts*. Yaroslavl: YSTU Publ.; 2020. Part 2. p. 159–163. (In Russ.). EDN: <https://www.elibrary.ru/phccjj>.

12. Богданов А. Ф., Иванов И. А., Терехов П. М. Восстановление профиля поверхности катания колесных пар без выкатки // Бюллетень результатов научных исследований / ПГУПС. 2014. № 1 (10). С. 58–68. EDN: <https://elibrary.ru/sevted>.

Bogdanov A. F., Ivanov I. A., Terekhov P. M. Reprofileing the wheel pair tread surfaces without removing. *Bulletin of scientific research results*. 2014;(1):58–68. (In Russ.). <https://elibrary.ru/sevted>.

13. Куликовский М. Ю., Петрова Д. П., Шапошников А. М. Мобильный станок для обточки бандажей (колес) колесных пар // История и перспективы развития транспорта на севере России. 2020. № 1. С. 82–86. EDN: <https://www.elibrary.ru/gokyko>.

Kulikovskiy M. Yu., Petrova D. P., Shaposhnikov A. M. Mobile machine for turning wheel pair bands (wheels). *Istoriya i perspektivy razvitiya transporta na severe Rossii*. 2020;(1):82-86. (In Russ.). EDN: <https://www.elibrary.ru/gokyko>.

14. Мобильный колесотокарный станок с ЧПУ для последовательной обточки колесных пар локомотивов / М. Ю. Куликовский [и др.] // Семьдесят четвертая Всероссийская научно-техническая конференция студентов, магистрантов и аспирантов высших учебных заведений с международным участием, Ярославль, 21 апреля 2021 г.: сб. материалов конф.: в 2 ч. Ярославль: Издательство ЯГТУ, 2021. Ч. 2. С. 48–52. EDN: <https://www.elibrary.ru/boswmh>.

Kulikovskiy M. Yu., Shaposhnikov A. M., Eliseykin E. I., Rafikov R. H. Mobile cnc lathe for sequential turning of locomotive wheelsets. In: *The Seventy Fourth Russian National Scientific and Technical Conference of students, undergraduates and postgraduates of higher educational institutions with international participation, 21 April 2021, Yaroslavl: Conf. Proceedings. 2 parts*. Yaroslavl: YSTU Publ.; 2021. Part 2. p. 48–52. (In Russ.). EDN: <https://www.elibrary.ru/boswmh>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Рафик Хайдарович РАФИКОВ,

канд. техн. наук, начальник отдела транспортного машиностроения, Инновационный инжиниринговый центр (121059, г. Москва, ул. Брянская, д. 5), Author ID: 792534, <https://orcid.org/0000-0003-3577-3401>

Андрей Сергеевич ШИНКАРУК,

канд. техн. наук, главный ревизор по безопасности движения, Федеральная пассажирская компания (ФПК, 107078, г. Москва, ул. Маши Порываевой, д. 34), Author ID: 1209386, <https://orcid.org/0000-0001-8462-8265>

Евгений Игоревич ЕЛИСЕЙКИН,

аспирант, Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ, 129626, г. Москва, ул. 3-я Мытищинская, д. 10); руководитель проектов транспортного машиностроения, Инновационный инжиниринговый центр (121059, г. Москва, ул. Брянская, д. 5), Author ID: 1147151

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Rafik H. RAFIKOV,

Cand. Sci. (Eng.), Transport Engineering Manager, Innovative Engineering Centre (121059, Moscow, 5, Bryanskaya St.), Author ID: 792534, <https://orcid.org/0000-0003-3577-3401>

Andrey S. SHINKARUK,

Cand. Sci. (Eng.), Chief Traffic Safety Auditor, Federal Passenger Company (107078, Moscow, 34, Mash Poryvayevoy St.), Author ID: 1209386, <https://orcid.org/0000-0001-8462-8265>

Evgeniy I. ELISEYKIN,

Postgraduate, Railway Research Institute (129626, Moscow, 10, 3rd Mytishchinskaya St.); Transport Engineering Project Manager, Innovative Engineering Centre (121059, Moscow, 5, Bryanskaya St.), Author ID: 1147151

ВКЛАД АВТОРОВ

Рафик Хайдарович РАФИКОВ. Разработка методологии, проведение экспериментов и анализ полученных данных, написание статьи (40%).

Андрей Сергеевич ШИНКАРУК. Анализ отечественных и зарубежных моделей колесообрабатывающих станков, участие в написании статьи (35%).

Евгений Игоревич ЕЛИСЕЙКИН. Подготовка раздела «Обсуждение и заключение», а также рекомендаций по устранению выявленных узких мест в обточке колесных пар локомотива (25%).

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Rafik H. RAFIKOV. Methodology development, experiments and data analysis, article writing (40%).

Andrey S. SHINKARUK. Analysis of domestic and foreign wheel processing machines, contributions to the article (35%).

Evgeniy I. ELISEYKIN. Preparation of the Discussion and Conclusion section, and guidelines to address identified bottlenecks in locomotive wheel pair turning (25%).

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The authors have read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию 21.04.2024, рецензия от первого рецензента получена 12.05.2024, рецензия от второго рецензента получена 27.07.2024, рецензия от третьего рецензента получена 01.11.2024, принята к публикации 14.11.2024.

The article was submitted 21.04.2024, first review received 12.05.2024, second review received 27.07.2024, third review received 01.11.2024, accepted for publication 14.11.2024.

АО «ВНИИЖТ»

Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта



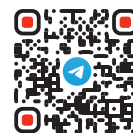
Сайт ВНИИЖТ

Узнать больше о научных проектах ВНИИЖТ можно на нашем сайте

Подписывайтесь на ВНИИЖТ в социальных сетях, чтобы быть в курсе актуальных новостей о жизни института



ВК ВНИИЖТ



ТГ ВНИИЖТ

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Оригинальная статья

УДК 625.172

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

Влияние динамики взаимодействия пути и подвижного состава на изменение состояния пути и организацию его технического обслуживания в процессе эксплуатации

О. А. Суслов✉

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

АННОТАЦИЯ

Введение. В настоящее время на ряде направлений сети железных дорог Российской Федерации происходит повышение объемов перевозок. Наиболее характерными направлениями, которые показывают максимальный годовой прирост, являются Восточный полигон, участки Транссиба и БАМа. Повышение объемов перевозимого груза, особенно в условиях ограниченных провозных способностей, влечет за собой повышение длин и масс поездов, рост нагрузок на ось, что приводит к увеличению интенсивности использования всех элементов существующей железнодорожной инфраструктуры, и прежде всего пути. В результате увеличиваются силы взаимодействия в системе «колесо — рельс» и связанная с ними нагруженность и повреждаемость пути. Данная работа выполнена с целью выявления связи между эксплуатационными факторами и показателями, характеризующими нагруженность пути.

Материалы и методы. Для анализа фактических значений повреждаемости на различных участках сети и Восточного полигона с помощью автоматических устройств регистрации в течение нескольких месяцев были собраны данные, характеризующие величины сил в системе «колесо — рельс», определены законы и параметры их распределения.

Результаты. Анализ параметров распределений показал их большой разброс (45–55 % для средних значений и до 300 % для дисперсий). Аналогичный разброс получен для значений накопления повреждаемости пути и интенсивности истощения его ресурса на исследованных участках. Дополнительно было выявлено высокое влияние на повреждаемость (от 40 % и более) динамических качеств подвижного состава, зависящих от его конструктивных особенностей и фактического состояния.

Обсуждение и заключение. Для принятия решений по конструкции устройства пути и организации его технического обслуживания на направлениях сети, особенно с высокой интенсивностью эксплуатации, необходим постоянный контроль и анализ нагрузок в системе «колесо — рельс». Такой подход позволит оптимизировать устройство и техническое обслуживание пути с учетом эксплуатационных особенностей конкретных направлений, что обеспечит безопасность движения и повысит эффективность затрат на техническое обслуживание и ремонты пути.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: верхнее строение пути, взаимодействие пути и подвижного состава, отступления геометрии рельсовой колеи, текущее содержание пути, прогнозирование работ

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Суслов О. А. Влияние динамики взаимодействия пути и подвижного состава на изменение состояния пути и организацию его технического обслуживания в процессе эксплуатации // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2024. Т. 83, № 4. С. 362–371.

✉ Suslov.oleg@vniizht.ru (О. А. Суслов)

© Суслов О. А., 2024



TECHNICAL MEANS OF RAILWAY TRANSPORT

Original article

UDK 625.172

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



Effects of track and rolling stock interaction on track condition and maintenance

Oleg A. Suslov✉

Railway Research Institute,
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. A number of railway lines in Russia experience increased traffic volume. The lines with the fastest annual growth are the Eastern Polygon, Transsib and BAM sections. Higher volumes of trailing load, especially in limited traffic-carrying capacity, entail longer and heavier trains and higher axle loads, which puts more strain on the existing railway infrastructure, especially the tracks. This intensifies the interaction in the wheel — rail system, further increasing track load and damage rates. This paper is intended to identify the correlation between operational factors and track load indicators.

Materials and methods. The study of the actual damage rate on the network and the Eastern Polygon sections involved automatic devices collecting wheel — rail interaction data for several months and determined the laws and parameters of their distribution.

Results. The analysis of distribution parameters showed large variation (45–55% for average values and up to 300% for dispersions). A similar variation was obtained for the accumulated damage and resource exhaustion rates on the investigated track sections. The work also reveals a high dependence of damage rate (from 40% and above) on the dynamic qualities of the rolling stock determined by its design and condition.

Discussion and conclusion. Structural and maintenance solutions for tracks with particularly high usage require constant monitoring and analysing of the loads in the wheel — rail system. This approach would improve track design and maintenance based on the operational characteristics of specific lines for safer traffic and more efficient track maintenance and repair costs.

KEYWORDS: track superstructure, track and rolling stock interaction, rail track geometry deviations, routine track maintenance, work forecasting

FOR CITATION: Suslov O. A. Effects of track and rolling stock interaction on track condition and maintenance. *Russian Railway Science Journal*. 2024;83(4):362-371. (In Russ.).

Введение. В настоящее время протяженность участков, где загрузка пропускной способности более 85 % от максимально возможной, составляет 25 % от общей эксплуатационной длины сети железных дорог. На этих участках обращается 80% от общесетевого грузооборота, а наибольший объем перевозок и количество таких участков сосредоточено на Восточном полигоне [1, 2]. Объем перевозок в направлении портов Дальнего Востока за 2023 г. составил 173 млн т, плановое значение на 2024 г. — 180 млн т, а на 2030 г. — 210 млн т. Освоение таких объемов перевозок осуществляется всеми технически возможными решениями [3, 4], в т. ч.:

- строительством двухпутных вставок, вторых и третьих путей, увеличением путевого развития станций;
- повышением массы и длины поездов (тяжеловесное движение);
- сокращением межпоездных интервалов (виртуальная сцепка);
- повышением гарантийных плеч подвижного состава и совершенствованием технологии обработки поездов в пути следования.

Повышение грузонапряженности, масс и длин поездов, уплотнение графика движения на таких участках вызывает увеличение интенсивности использования путевой инфраструктуры и, как следствие, приводит к повышению нагруженности пути (нагруженность — состояние изделия, обусловленное внешними воздействиями и режимами функционирования).

Краткий обзор проблемы. В настоящий момент наиболее перспективным направлением для организации технического обслуживания пути на линиях с высокой грузонапряженностью и дефицитом «оконного» времени, трудовых и материальных ресурсов для выполнения путевых работ является применение предиктивных технологий, основанных на применении деградационных моделей [5–10]. Состав этих моделей разнообразен и учитывает различные эксплуатационные факторы, связанные с влиянием на накопление отступлений пути от норм его устройства и содержания, такие как:

- конструктивные особенности пути (план, профиль, конструкция верхнего строения пути);
- конструктивные особенности подвижного состава (осевая схема, количество тележек и осей, нагрузка на ось) и техническое состояние его экипажной части;
- грузонапряженность, масса, скорость и режимы движения поездов.

Все вышеперечисленные факторы в результате определяют силы взаимодействия пути и подвижного состава, которые характеризуют итоговую нагруженность пути и являются итоговой причиной накопления его

расстройств [11]. Для выявления связи между эксплуатационными факторами и нагруженностью пути были выполнены исследования, результаты которых будут изложены ниже.

Методы и приемы анализа. Анализ нагруженности рассматриваемого сечения пути включает в себя следующие этапы:

- 1) определение структуры нагруженности;
- 2) определение вида нагруженности;
- 3) схематизацию нагруженности;
- 4) оценку параметров нагруженности.

Структура нагруженности для пути определяется передающимися от колес подвижного состава на рельсы силами (вертикальной, боковой и продольной) и крутящими моментами от этих сил, которые, в свою очередь, формируют силы, давления, напряжения и деформации в остальных элементах конструкции пути. Основным видом нагруженности является импульсный циклический процесс, формируемый проходом колес через сечение пути, где параметры цикла (длительность и амплитуда в одном нагружении, полный период цикла и межцикловый интервал, общее количество циклов) зависят от эксплуатационных условий участка, таких как грузонапряженность, масса/длина и скорость движения поезда, межпоездной интервал. Поскольку нагруженность циклическая (при этом каждый проход колеса через сечение пути является отдельным циклом со своей амплитудой и знаком), то наиболее актуальным является применение схематизации нагруженности по методу экстремумов, т. е. определяется значение амплитуды и ее знак от каждого колеса для каждой рассматриваемой силы, входящей в структуру нагруженности. Для получения оценочных параметров нагруженности выполняются измерения и накопления массивов амплитуд сил, передающихся от колеса на рельс. По результатам наблюдений для накопленных массивов получают оценочные параметры — закон распределения и характеризующие его параметры, которые являются базисом для дальнейших расчетов по анализу надежности пути и планирования мероприятий технического обслуживания.

Для мониторинга нагруженности пути в различных эксплуатационных условиях был разработан стационарный пост автоматической регистрации сил в системе «колесо — рельс» (далее — пост), схема и внешний вид которого представлены на рис. 1, 2 соответственно. Пост состоит из измерительных сечений, предназначенных для регистрации сил в соответствии с требованиями ГОСТ 34759–2021¹, датчиков прохода колес, регистрирующих проход подвижного состава через

¹ ГОСТ 34759–2021. Железнодорожный подвижной состав. Нормы допустимого воздействия на железнодорожный путь и методы испытаний: дата введения 2022-02-01. М.: ФГБУ «РСТ», 2021. 33 с.

измерительные сечения, шкафа с аппаратурой измерения, обработки и регистрации сигналов. Набор оборудования и программное обеспечение поста позволяет в автоматическом режиме осуществлять регистрацию сигналов от вертикальных, боковых и продольных сил, их обработку для получения знаков и амплитуд сил, накопление полученных данных в массивы, передачу массивов на центральный сервер для дальнейшей обработки распределений². Данные посты были использованы в рамках проекта «Колесо — рельс» для исследования нагруженности пути на различных участках сети Октябрьской, Горьковской, Забайкальской и Дальневосточной железных дорог. Эксплуатационные характеристики участков установки постов приведены в табл. 1. В процессе регистрации были получены распределения вертикальных, боковых, продольных сил в системе «колесо — рельс» и их статистические характеристики за период наблюдений от 6 до 10 месяцев.

Для дальнейшего изучения были приняты вертикальные силы, так как более 60 % отступлений геометрии рельсовой колеи, регистрируемых мобильными средствами диагностики, являются отступлениями в профиле — просадки, перекосы, короткие и длинные неровности.

Основные термины, которые были приняты в ходе проведения исследования:

Параметр деградации — вид отступления геометрии рельсовой колеи или элемента верхнего строения пути от нормы его устройства, измеряемого средствами диагностики или иным способом.

Амплитуда отступления — значение отступления геометрии рельсовой колеи или элемента верхнего строения пути от нормы его устройства, измеренное средствами диагностики или иным способом и выраженное в установленных единицах измерения.

Интенсивность параметра деградации — величина, определяемая как отношение разницы амплитуд отступлений параметра деградации за расчетный период к пропущенному за этот же период тоннажу или продолжительности периода.

Силовая нагрузка — совокупность значений вертикальных, боковых, продольных сил, передающихся от колес подвижного состава на рельсы.

Повреждаемость пути — показатель, функционально связывающий динамическую нагрузку с интенсивностью параметра деградации в одном цикле нагружения.

Основные гипотезы, которые были приняты для проведения исследования:

1. Причиной возникновения отступлений геометрии рельсовой колеи от норм устройства пути или выхода

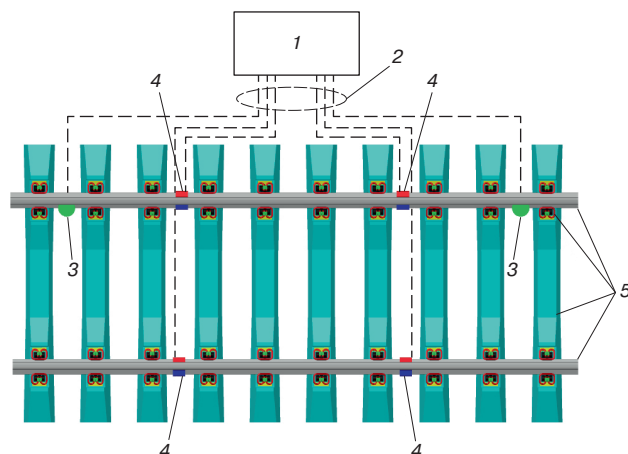


Рис. 1. Схема расположения измерительных элементов поста регистрации сил на пути:

1 — климатический шкаф с оборудованием; 2 — сигнальные линии; 3 — датчик прохода колес; 4 — измерительное рельсовое сечение; 5 — элементы рельсошпальной решетки измерительного участка

Fig. 1. Location of sensors and gauges in a force registration hub on the track:

1 — climate cabinet with equipment; 2 — signal lines; 3 — wheel detector; 4 — gauging rail section; 5 — elements of the rail-sleeper grid of the gauging section



Рис. 2. Стационарный пост автоматической регистрации сил в системе «колесо — рельс» для оценки динамики взаимодействия экипажа и пути (общий вид):

1 — антенна сотовой связи; 2 — климатический шкаф для оборудования; 3 — промышленный компьютер; 4 — аналогово-цифровой преобразователь сигналов от измерительного рельсового сечения; 5 — источник бесперебойного питания

Fig. 2. Stationary automatic force registration hub for assessing the cab and track interaction trends in the wheel — rail system (general view): 1 — mobile antenna; 2 — climate cabinet with equipment; 3 — industrial computer; 4 — A/D converter for signals from the gauging rail section; 5 — uninterruptible power supply

² Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020617509 Российская Федерация. Программа регистрации сигналов с тензо-виброметрических датчиков измерения параметров взаимодействия в системе «колесо — рельс»: № 2020616368; заявл. 25.06.2020; опубл. 08.07.2020 / Ададуров А.С., Нерезков А.В., Суслов О.А.; заявитель Акционерное общество «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (АО «ВНИИЖТ»).

Таблица 1

Эксплуатационные характеристики участков установки постов

Table 1

Performance of sections with installed hubs

Наименование показателя	Участок установки поста						
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6	№ 7
Железная дорога	Дальневосточная	Дальневосточная	Горьковская	Московская	Забайкальская	Забайкальская	Октябрьская
Место установки (перегон, км, пк)	Хурмули — Холони, II путь, 3752 км, пк 3	Кумтэ — Гайтер, I путь, 20 км, пк 8	Лянгасово — Поздино, II путь, 943 км, пк 3	Экспериментальное кольцо АО «ВНИИЖТ» 3 кольцевой путь, 6 км, пк 3	Укурей — Чернышевск-Забайкальский, II путь, 6583 км, пк 6	Джиктанда — Талдан, II путь, 7381 км, пк 7	Веймарн — Котлы-II, I путь, 128 км, пк 3
План линии	Кривая R=340 м	Кривая R=400 м	Кривая R=593 м	Кривая R=1100 м	Кривая R=315 м	Кривая R=636 м	Кривая R=632 м
Установленная скорость движения грузовых поездов, км/ч	60	60	80	70	60	80	80
Средняя нагрузка на ось на участке, тс	17,0	18,3	19,0	19,3	21,2	23,9	24,0
Грузонапряженность на участке, млн т-км брутто/км в год	34,6	64,9	42,5	224,9	142,5	160,6	139,9

из строя элементов его верхнего строения являются динамические нагрузки, которые формируются поездом и вагонопотоком, проходящим через рассматриваемые сечения пути.

2. Силовая нагрузка, формируемая всем многообразием подвижного состава, режимами движения поездов для конкретного участка и конкретной силы, может быть описана кривой распределения сил в рассматриваемом сечении или на участке пути.

3. Значение амплитуды отступления в рассматриваемом сечении пути функционально связано с распределением динамических сил, действующих в этом сечении, а характер связи представлен на рис. 3.

4. Значение амплитуды отступления a складывается из накопленной в процессе эксплуатации средней части амплитуды $a_{ср}$ и ее динамической части $a_{дин}$. Средняя часть амплитуды имеет функциональную связь с математическим ожиданием кривой распределения сил, динамическая часть — с отклонением распределения сил от ее математического ожидания.

5. Изменение амплитуды отступления Δa от значения a_i до значения a_{i+1} за период времени Δt (в этот период пропущено осей — ΔN , шт.) определяется следующим выражением:

$$a_{i+1} = a_i + W_v(d\Delta N), \quad (1)$$

где W_v — передаточная функция связи между накопленной за период времени Δt повреждаемостью $d\Delta N$ и изменением амплитуды отступления Δa ; d — повреждаемость пути в одном цикле нагружения (проход одной оси через рассматриваемое сечение пути), характерная для изменения амплитуды рассматриваемого отступления.

6. Повреждаемость пути d в одном цикле нагружения согласно исследованиям [12, 13] может быть определена выражением

$$d = \sum_{i=-3\sigma}^{i=+\sigma} (Q_i)^\chi f_i, \quad (2)$$

где Q_i — значение силы, соответствующее i -му диапазону ее распределения; f_i — значение плотности вероятности, соответствующее i -му диапазону нормированного распределения силы Q_i ; χ — степенной коэффициент.

На основании границ, приведенных на рис. 3 и в формуле (2), можно записать выражение, связывающее повреждаемость и параметры распределения этих сил:

$$d = \sum (Q_{\pm\sigma})^\chi f_{\pm\sigma} + \sum (Q_{\pm\sigma \div \pm 3\sigma})^\chi f_{\pm\sigma \div \pm 3\sigma}, \quad (3)$$

где $-3\sigma \div +\sigma$ — диапазон распределения, соответствующий среднему значению силы Q (составляющая от среднего значения нагрузки на ось); $+\sigma \div +3\sigma$ —

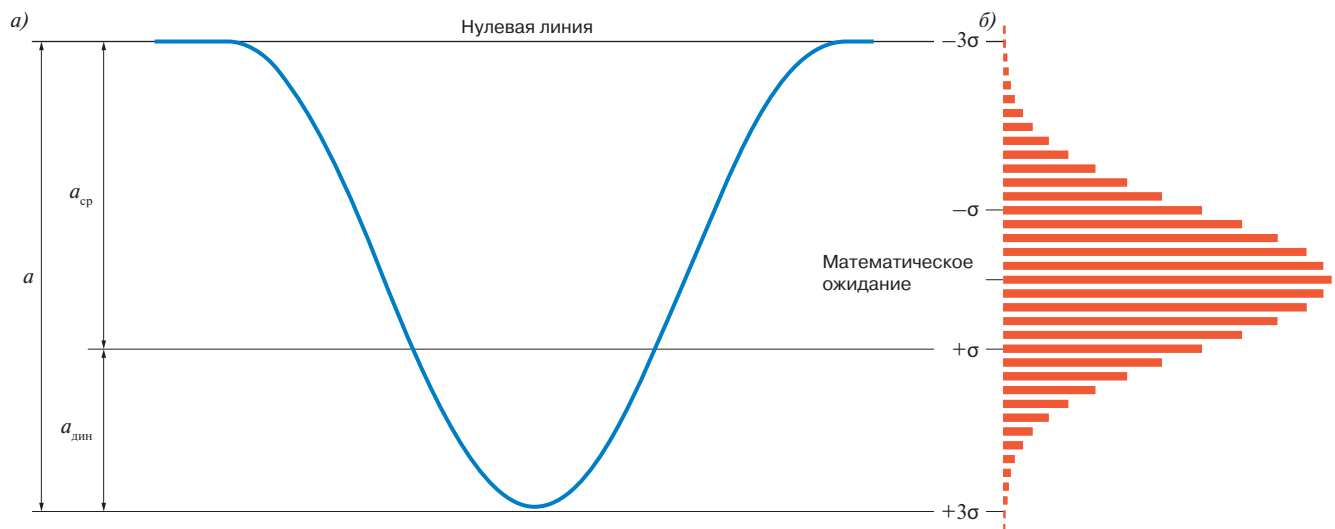


Рис. 3. Характер связи между амплитудой отступления в рассматриваемом сечении пути (а) и распределением динамических сил в системе «колесо — рельс» (б), действующих в этом же сечении и определяющих рост амплитуды отступления

Fig. 3. Correlation between the deviation amplitude in the considered track section (a) and the distribution of dynamic forces in the wheel — rail system (b) acting in the same section and determining the growth of the deviation amplitude

диапазон распределения, соответствующий отклонению распределения сил от их среднего значения (динамическая составляющая).

Результаты исследований. Анализ массивов вертикальных сил, зарегистрированных постами регистрации, показал их соответствие нормальному закону распределения, а математическое ожидание и отклонения могут быть описаны средним значением сил и среднеквадратическим отклонением (СКО). На рис. 4 представлены характеристики полученных распределений. Для расчета статистических характеристик выбраны данные измерений летних (июнь — август) и осенних (сентябрь — ноябрь) месяцев. Параметры распределений показывают, что средние значения вертикальных сил и СКО значительно отличаются по участкам наблюдений. Разброс средних значений составляет 45–55 % и коррелирует со средним значением нагрузки на ось и составом вагонопотока на участке — преимущественно грузовое (участки со значением более 90 кН) или смешанное движение с наличием возврата порожних составов (участки со значением 85 кН и менее). Разброс СКО составляет более 300 % и характеризует динамические качества и техническое состояние подвижного состава.

На основе выражения (3) были определены значения повреждаемости пути вертикальными силами — динамическая и среднестатистическая составляющие, а также суммарное значение повреждаемости. Результаты расчетов, расположенные в порядке возрастания средней нагрузки на ось на участке измерений, приведены в табл. 2 и на рис. 5. Дополнительно была построена зависимость распределения долевого участия

в суммарной повреждаемости вертикальными силами динамической и среднестатистической составляющих на участках измерений (рис. 6).

Анализ данных табл. 1 и величин на рис. 5 показывает, что максимальное значение суммарной удельной повреждаемости не соответствует максимальному значению средней нагрузки на ось и максимальная удельная повреждаемость соответствует участку № 2

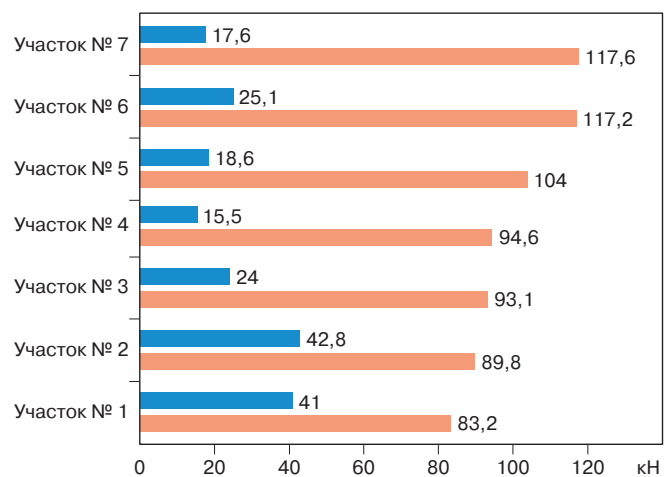


Рис. 4. Характеристики распределений вертикальных сил, полученные в процессе обработки записей сигналов с измерительных рельсовых сечений постов регистрации сил на различных участках сети:

■ — СКО, кН; ■ — среднее значение, кН

Fig. 4. Vertical force distributions obtained by processing signals from gauging rail sections of force registration hubs on network sections:

■ — standard deviation, kN; ■ — average, kN

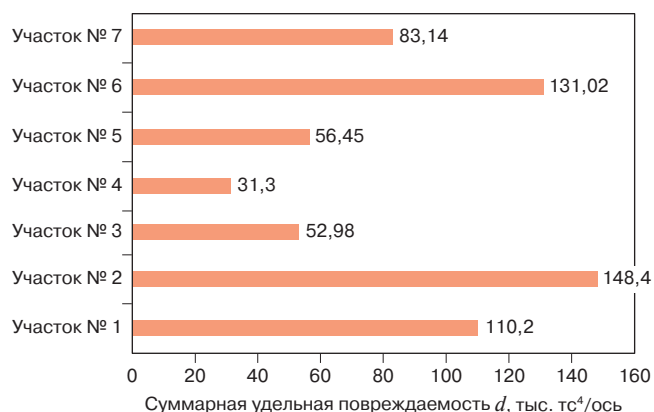


Рис. 5. Величины суммарной удельной повреждаемости пути вертикальными силами в одном цикле нагружения на различных участках сети

Fig. 5. Total specific track damage rates under vertical forces in one loading cycle on different sections of the network

Таблица 2

Значения повреждаемости пути вертикальными силами в одном цикле нагружения

Table 2

Track damage rate under vertical force in one loading cycle

Наименование показателя	Участок установки поста						
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6	№ 7
Составляющая удельной повреждаемости от средних значений сил, тыс. тс ⁴ /ось	45,97	66,15	31,22	22,48	41,77	90,17	60,09
Составляющая удельной повреждаемости от динамических добавок сил, тыс. тс ⁴ /ось	64,23	82,25	21,76	8,82	14,68	40,85	23,05
Суммарная удельная повреждаемость d , тыс. тс ⁴ /ось	110,2	148,40	52,98	31,30	56,45	131,02	83,14

(средняя нагрузка на ось — 18,3 тс), а суммарная удельная повреждаемость на участке в 1,8 раза выше повреждаемости участка с максимальным значением средней нагрузки на ось — участок № 7 (средняя нагрузка на ось — 24 тс). Дополнительно можно отметить, что повреждаемости участков № 3 и 5 идентичны (разница составляет 6,5%), при этом разница в средних нагрузках на ось составляет 12%, а значение коэффициента корреляции между средней нагрузкой на ось и суммарной удельной повреждаемостью составляет менее 0,05, что свидетельствует о полном отсутствии связи между суммарной удельной повреждаемостью и средней нагрузкой на ось на участке.

Значение коэффициента корреляции между средней нагрузкой на ось и удельной повреждаемостью

динамической составляющей распределения составляет 0,51; для удельной повреждаемости среднее значение распределения коэффициента корреляции составляет 0,41. Оба значения коэффициента свидетельствуют о наличии корреляции слабой силы. Значения доли динамической составляющей колеблются от 28 до 58 %. Повышение долевого значения связано с ростом значения величины СКО вертикальных сил на участке, что, как было отмечено ранее, связано с динамическими качествами и состоянием подвижного состава.

Удельная повреждаемость характеризует состояние вагонопотока в единичном цикле нагрузки, однако для накопления отступлений важна не только удельная характеристика, но и влияние фактической нагруженности пути на изменение амплитуды отступления $\Delta a = W_v(d\Delta N)$ за период времени $\Delta t = 15$ сут, что соответствует среднему значению периодичности контроля состояния пути мобильными средствами диагностики, при пропуске за этот период осей, шт., т. е. $\Delta N_{15\text{сут}} = (15/365)\Gamma \cdot 10^6 / P_{\text{сред}}$, где Γ — грузонапряженность на участке, млн т·км брутто/км в год, $P_{\text{сред}}$ — средняя нагрузка на ось на участке. В табл. 3 представлены результаты анализа.

Оценка производилась в первом приближении при условии линейности передаточной функции связи W_v между накоплением амплитуды Δa и накоплением повреждаемости $d\Delta N$. Как видно из данных табл. 3, наиболее интенсивно накопление амплитуд отступлений за период 15 сут будет происходить на участке № 6 (перегон Джиктанда — Талдан Забайкальской железной дороги), а значение накопления повреждаемости данного участка практически в 7,4 раза больше среднесетевого уровня. Повышенное значение накопления может привести к появлению отступлений, значения амплитуд которых могут требовать ограничений скорости при следующем проходе мобильных средств диагностики, что повышает риск возникновения отказов и подтверждается высокой балловой оценкой состояния пути на участке № 6 (336 баллов при среднесетевом значении 46 баллов).

Также данный показатель характеризует общий темп накопления отступлений и исчерпания ресурса элементов пути в целом, а с учетом полученных значений накоплений возможно обоснованно вносить корректировки в периодичность диагностики и потребные трудовые и материальные ресурсы с учетом особенностей вагоно- и поездопотока на конкретном участке. Оценка силы корреляционной связи между значением накопленной повреждаемости на участке и его грузонапряженностью показала значение 0,46 (сила связи слабая); аналогичный коэффициент для среднего значения нагрузки на ось составляет 0,70 (связь между параметрами сильная), что говорит о необходимости учета показателя среднего значения

нагрузки на ось в качестве критерия для нормирования при организации текущего содержания.

В рамках научного проекта по оптимизации взаимодействия в системе «колесо — рельс», реализованного в 2022–2024 гг. научно-образовательным комплексом ОАО «РЖД» под руководством АО «ВНИИЖТ» [14], были разработаны и утверждены комплексные мероприятия по снижению силового воздействия на инфраструктуру путевого хозяйства. Комплексные мероприятия, кроме разделов по оптимизации норм устройства и содержания пути, включают технические требования к тележкам грузовых вагонов, позволяющие добиться снижения динамической составляющей воздействия на путь до 15–25 %.

Для оценки влияния этого снижения на общее накопление повреждаемости пути были сделаны расчеты, аналогичные приведенным ранее, при которых было задано снижение значений СКО вертикальных сил на 25 %. Результаты расчета, представленные в табл. 4, показывают, что возможное снижение накопления повреждаемости пути при снижении СКО вертикальных сил составляет от 40 до 80 %.

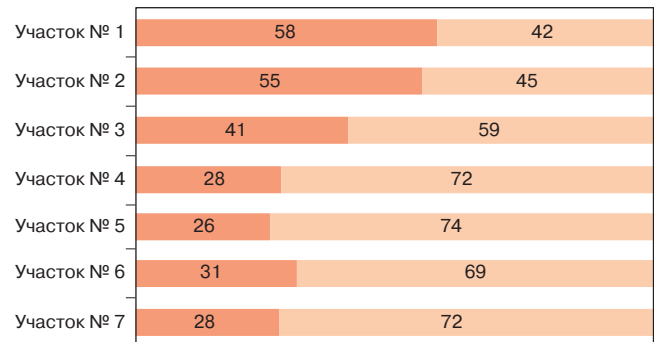


Рис. 6. Распределения долевого участия в суммарной удельной повреждаемости среднего значения и динамической составляющей вертикальных сил на различных участках сети:

— доля повреждаемости динамической составляющей распределения сил, %; — доля повреждаемости средним значением распределения сил, %

Fig. 6. Shares of the mean value and dynamic component of vertical forces in the total specific damage on different network sections:

— share of the damage from the dynamic component of the force distribution, %; — share of the damage from the mean value of the force distribution, %

Таблица 3

Значения накопленной повреждаемости пути вертикальными силами за период 15 сут

Table 3

Accumulated track damage under vertical force for 15 days

Наименование показателя	Участок измерений						
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6	№ 7
Число осей за период 15 сут (ΔN), шт.	83 700	146 000	91 900	479 000	276 000	276 000	239 000
Значение накопленной повреждаемости за 15 сут ($d\Delta N$), млрд тс ⁴	9,23	21,6	4,87	15,01	15,6	36,2	19,9
Изменение накопленной повреждаемости относительно среднесетевого уровня*	1,9	4,4	1**	3,1	3,2	7,4	4,1

* Определено как отношение накопленной повреждаемости на рассматриваемом участке к повреждаемости на участке, соответствующей среднесетевому значению эксплуатационных условий (участок № 3, Горьковская железная дорога).

** Среднесетевой уровень.

Таблица 4

Значения накопленной повреждаемости пути вертикальными силами за период 15 сут с учетом снижения динамичности подвижного состава

Table 4

Accumulated track damage under vertical force for 15 days considering reduced dynamics of the rolling stock

Наименование показателя	Участок измерений						
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6	№ 7
Число осей за период 15 сут (ΔN), шт.	83 700	146 000	91 900	479 000	276 000	276 000	239 000
Значение накопленной повреждаемости с учетом снижения динамичности подвижного состава (период 15 сут), млрд тс ⁴	5,01	11,9	3,31	10,5	10,8	24,5	14,1
Изменение накопленной повреждаемости относительно среднесетевого уровня	1,03	2,45	0,68	2,16	2,23	5,03	2,90

Обсуждение и заключение. Нагруженность пути силовым воздействием и соответствующее этой нагруженности накопление повреждаемости пути — параметры, которые комплексно характеризуют условия эксплуатации пути. Эти параметры позволяют учесть реальное состояние подвижного состава, входящего в вагонопоток участка, а также режимы движения поездов с учетом их масс, скоростей движения, особенностей формирования составов, межпоездных интервалов.

Проведенный для различных участков пути анализ полученных распределений нагруженности пути показывает, что результаты значительно отличаются по участкам наблюдений. Разброс средних значений нагруженности составляет 45–55 % и коррелирует со средним значением нагрузки на ось на участке, разброс дисперсии нагруженности составляет более 300 % и характеризует динамические качества и состояние подвижного состава. Полученная разница в нагруженности рассмотренных участков объясняет результаты оценки состояния пути по балловой оценке: на участках с меньшей нагруженностью и интенсивностью накопления повреждаемости количество штрафных баллов в 3–5 раз ниже, чем на участках с максимальным выявленным значением.

Выявлена зависимость значения повреждаемости пути от динамических качеств подвижного состава — его устройства и технического состояния. Доля в суммарной повреждаемости от динамической составляющей нагруженности составляет от 30 до 60 %. Такой разброс позволяет использовать эту составляющую как резерв для продления срока службы пути за счет улучшения состояния и конструкции подвижного состава с целью снижения динамической составляющей и накопленной повреждаемости. Расчеты показали, что снижение дисперсии для нагруженности от вертикальных сил в системе «колесо — рельс» на 25 % позволяет снизить повреждаемость в зависимости от участка на 40–80 %, продлив тем самым срок эксплуатации пути и снизив расходы на его техническое обслуживание и ремонт.

С учетом выявленного влияния полученных значений нагруженности и повреждаемости на общее состояние пути можно сделать вывод о необходимости наблюдения за этими параметрами. Таким образом, по полученным результатам для пути должны синхронизироваться:

- требования к конструкции;
- периодичность диагностики;
- периодичность проведения ремонтов;
- расчет контингента и норм расхода ресурсов;
- сроки проведения работ по устранению выявленных отступлений.

Анализ динамической составляющей нагруженности позволяет уточнять требования к состоянию подвижного состава с учетом возможностей технического

обслуживания пути на данном участке и затраты на его текущее содержание. Такой подход позволит оптимизировать устройство и техническое обслуживание пути с учетом эксплуатационных особенностей конкретных направлений, что обеспечит безопасность движения и повысит эффективность затрат на техническое обслуживание и ремонты пути.

Благодарности: автор выражает благодарность рецензентам за полезные замечания и советы, способствовавшие улучшению статьи.

Acknowledgments: the author expresses his gratitude to the reviewers for their constructive comments, improving the quality of the article.

Финансирование: автор заявляет об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

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

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов и не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Выдашенко Л. А., Выдашенко П. А., Гарифуллина Ю. М. Исследование перспектив развития Восточного полигона на Транссибирской магистрали // Бюллетень науки и практики. 2023. Т. 9, № 4. С. 389–398. <https://doi.org/10.33619/2414-2948/89/45>.
- Yvdashenko L. A., Yvdashenko P. A., Garifullina Yu. M. Study of the prospects of development of the Eastern polygon on the Trans-Siberian highway. *Bulletin of Science and Practice*. 2023;9(4):389-398. (In Russ.). <https://doi.org/10.33619/2414-2948/89/45>.
2. Кокшаров В. А. Отраслевая оценка развития железнодорожного транспорта // Инновации и инвестиции. 2022. № 11. С. 155–158. EDN: <https://elibrary.ru/lcesti>.
- Koksharov V. A. Sectorial assessment of the development of railway transport. *Innovations and Investments*. 2022;(11):155-158. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/lcesti>.
3. Рачек С. В., Колышев А. С. Применение технологии тяжеловесного движения на железных дорогах мира // Евразийский союз ученых. 2016. № 1 (22). С. 94–96. EDN: <https://elibrary.ru/xdeamh>.
- Rachek S. V., Kolyshev A. S. Application of heavy-weight traffic technology on the world railways. *Eurasian Union of Scientists*. 2016;(1):94-96. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/xdeamh>.
4. Криворотов А. А., Григорьева Н. Н. Инфраструктура Восточного полигона: реальность и перспективы // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке: тр. Всерос. науч.-практ. конф. творческой молодежи с междунар. участием, Хабаровск, 16–19 апреля 2019 г.: в 2 т. Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2019. Т. 1. С. 330–334. EDN: <https://elibrary.ru/gpymnb>.
- Krivorotov A. A., Grigor'yeva N. N. Infrastructure of the Eastern Polygon: reality and prospects. In: *Scientific, technical and economic cooperation of the Asia Pacific countries in the XXI century: Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference of Creative Youth with international participation, 16–19 April 2019, Khabarovsk: 2 Vols*. Khabarovsk: Far Eastern State Transport University Publ.; 2019. Vol. 1. p. 330–334. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/gpymnb>.

5. Суслов О. А., Федорова В. И. Перспективные подходы к прогнозному моделированию деградационных процессов элементов верхнего строения пути и их применение при создании цифровых двойников // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2021. Т. 80, № 5. С. 251–259. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-5-251-259>.

Suslov O. A., Fedorova V. I. Prospective approaches to predictive modeling of degradation processes of track superstructure elements and its application in creating digital twins. *Russian Railway Science Journal*. 2021;80(5):251-259. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-5-251-259>.

6. Бельтюков В. П. Принципы прогнозирования изменения технического состояния железнодорожного пути // Инфраструктура транспорта. 2022. № 1 (3). С. 65–78. EDN: <https://elibrary.ru/oesaox>.

Beltyukov V. P. Principles for forecasting of railway track technical condition changes. *Infrastruktura transporta*. 2022;(1):65-78. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/oesaox>.

7. Дружинина О. В., Гапеева А. С., Людаговская М. А. Анализ системы «железнодорожный путь — подвижной состав» на основе методов оценки влияния поездных нагрузок на техническое состояние пути // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. 2019. № 6. С. 3–9. EDN: <https://elibrary.ru/vafnsw>.

Druzhinina O. V., Gapeeva A. S., Ludagovskaya M. A. Analysis of the “railway track — rolling stock” system on the basis of methods for assessment of the impact of train loads on technical condition of track. *Transport: science, equipment, management*. 2019;(6):3-9. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/vafnsw>.

8. Севостьянов А. А., Величко Д. В. Моделирование организации технологических процессов по содержанию геометрии рельсовой колеи // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2023. Т. 82, № 2. С. 168–176. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2023-82-2-168-176>.

Sevostyanov A. A., Velichko D. V. Process organisation modelling for maintaining rail track geometry. *Russian Railway Science Journal*. 2023;82(2):168-176. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2023-82-2-168-176>.

9. Бельтюков В. П., Симонюк И. А. К вопросу об улучшении среднесрочного планирования путевых работ // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2016. Т. 13, № 4(49). С. 472–477.

Beltyukov V. P., Simonyuk I. A. Concerning the improvement of medium-term track works planning. *Proceedings of Petersburg Transport University*. 2016;13(4):472-477. (In Russ.).

10. Баронайте Р. А. Определение потребности в выправочных работах с учетом интенсивности роста расстройств // Железная дорога: путь в будущее: сб. материалов I Междунар. науч. конф. аспирантов и молодых ученых, Москва, 28–29 апреля 2022 г. М.: Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта, 2022. С. 9–15. EDN: <https://elibrary.ru/tpnjyo>.

Baronayte R. A. Determination of the need for surfacing on railway track according to the intensity of the growth deviations. In: *The railway: track to the future: Proceedings of the International Scientific Conference of postgraduates and young scientists, 28–29 April 2022, Moscow*. Moscow: Railway Research Institute; 2022. p. 9–15. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/tpnjyo>.

11. Федорова В. И., Назаров И. В., Горский Д. В. Анализ состояния пути Восточного полигона с применением цифрового грузового вагона V.1.0 в рамках оптимизации взаимодействия системы колесо — рельс // 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. 275–283. EDN: <https://elibrary.ru/kglsbb>.

Fedorova V. I., Nazarov I. V., Gorskiy D. V. Analysis of the track condition of the eastern polygon using the V.1.0 Digital freight car in the framework of optimising the interaction of the wheel — rail system. In: *Science 1520 VNIIZhT: Look beyond the horizon: Proceedings of the II International Conference, 24–25 August 2023, Moscow*. Moscow: Railway Research Institute; 2023. p. 275–283. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/kglsbb>.

12. Вериги М. Ф., Коган А. Я. Взаимодействие пути и подвижного состава / под ред. М. Ф. Вериги. М.: Транспорт, 1986. 558 с.

Verigo M. F., Kogan A. Ya. *Track and rolling stock interaction*. Moscow: Transport Publ.; 1986. 558 p. (In Russ.).

13. Huesmann H., Beck A. Система колесо — рельс с точки зрения путевого хозяйства // Железные дороги мира. 2005. № 10. С. 12. EDN: <https://elibrary.ru/hsxxoj>.

Huesmann H., Beck A. The wheel and rail system in terms of railway facilities. *Zheleznyye dorogi mira*. 2005;(10):12. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/hsxxoj>.

14. Оптимизация взаимодействия в системе колесо — рельс / С. А. Виноградов [и др.] // Железнодорожный транспорт. 2023. № 3. С. 37–45. EDN: <https://elibrary.ru/pevfyz>.

Vinogradov S. A., Sukhov A. V., Lunin A. A., Suslov O. A., Nazarov I. V., Zagranichnik K. L. Improvement of wheel and rail interaction. *Zhelezнодороzhnyy transport*. 2023;(3):37-45. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/pevfyz>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Олег Александрович СУСЛОВ,

д-р техн. наук, технический эксперт, научный центр «Инфраструктура», Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ, 129626, Россия, г. Москва, ул. 3-я Мытищинская, д. 10), Author ID: 445985, <https://orcid.org/0000-0001-5466-5479>

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Oleg A. SUSLOV,

Dr. Sci. (Eng.), Technical Expert, Infrastructure Science Centre, Railway Research Institute (129626, Moscow, 10, 3rd Mytishchinskaya St.), Author ID: 445985, <https://orcid.org/0000-0001-5466-5479>

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

The author has read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию 06.03.2024, рецензия от первого рецензента получена 11.11.2024, рецензия от второго рецензента получена 18.11.2024, рецензия от третьего рецензента получена 25.11.2024, принята к публикации 25.11.2024.

The article was submitted 06.03.2024, first review received 11.11.2024, second review received 18.11.2024, third review received 25.11.2024, accepted for publication 25.11.2024.

Содержание журнала «Вестник ВНИИЖТ» за 2024 год

№ 1

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

К. М. Попов. Энергоэффективность различных вариантов эксплуатации моторвагонного подвижного состава на частично электрифицированных маршрутах 9–23

А. Н. Савоськин, Н. С. Лавлинская. Генерирование геометрических неровностей как случайных возмущений, вызывающих колебания рельсовых экипажей 24–39

А. А. Свечников, Ю. К. Мустафаев, И. В. Метальников. Экспериментальная оценка возможностей теплового аккумулятора с целью использования в масляной системе дизеля маневрового тепловоза 40–49

А. Г. Отока, О. В. Холодилов. Сравнительный анализ чувствительности ультразвукового контроля при применении прямых и наклонных пьезоэлектрических преобразователей различных производителей на примере дефектоскопа УД2-102 «Пеленг» 50–58

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ
НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

С. А. Бессоненко, А. А. Гунбин, А. А. Климов. Актуализация параметров «расчетов бегунов», используемых при проектировании сортировочных горок 60–68

УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССАМИ ПЕРЕВОЗОК

Р. Р. Юсупов, А. С. Хохрин. О снижении влияния помех от линий электропередачи на функционирование канала автоматической локомотивной сигнализации непрерывного типа 70–80

ТРАНСПОРТНОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

А. В. Лапа, И. С. Гершман, С. В. Новиков. Корпус боксы грузового вагона из алюминиевого сплава: опыт разработки, производства и эксплуатационных испытаний (1958–1993 гг.) и современные перспективы 82–90

№ 2

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

А. В. Белянкин, В. В. Балакин, В. К. Мешков, М. А. Федоров. Нагруженность и износ автосцепок в пассажирском вагоне локомотивной тяги 101–110

О. А. Суслов, И. В. Хромов. Разработка новых ремонтных профилей рельсов для различных условий эксплуатации 111–123

В. И. Сакало, А. В. Сакало. Кривые контактной усталости рельсовой стали 124–135

И. О. Лобыцин, И. А. Панков, В. В. Федин, Н. А. Баранов, К. И. Шведин, С. О. Литвинцев. Определение дополнительного сопротивления движению поезда от подвагонных генераторов на основе анализа кривой скорости 136–147

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ
НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

А. А. Марков, А. Г. Антипов, Е. А. Максимова. Автоматизация измерения стыковых зазоров рельсового пути магнитным методом 149–160

Е. В. Климова. Комплексная оценка обращения скоростных пассажирских поездов на существующей железнодорожной инфраструктуре в Сибирском федеральном округе 161–174

ВНИИЖТ: ВЧЕРА, СЕГОДНЯ, ЗАВТРА

Л. А. Мазо, О. Ф. Мирошниченко, Е. Н. Ефимова, Г. Е. Писаревский. Анатолий Петрович Абрамов — патриарх экономической транспортной науки 176–182

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

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

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

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

УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССАМИ ПЕРЕВОЗОК

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

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

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

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

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

УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССАМИ ПЕРЕВОЗОК

**С. А. Бессоненко, Е. В. Климова,
Н. И. Осипов.** Оценка эффективности
интервального регулирования движения
поездов на однопутных направлениях
железнодорожной сети 287–301

**В. Г. Федюлин, М. И. Мехедов,
В. А. Антонец, В. А. Устинов.** Определение
рациональной схемы предоставления «окон»
для работ по капитальному
ремонту пути 302–310

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

А. А. Локтев, И. В. Шишкина. Оценка
возможности использования
окологабаритного пространства
для железнодорожных мостов 312–318

К. М. Попов. Анализ энергетических затрат
на выполняемую электровозами
маневровую работу 319–335

**Б. Э. Глюзберг, П. В. Трегубчак,
И. В. Цитцер.** Технические решения
для улучшения условий и плавности
движения поездов по стрелочным
переводам 336–347

**Р. Х. Рафиков, А. С. Шинкарук,
Е. И. Елисейкин.** Эффективное
использование и разработка
колесообрабатывающих станков
для нужд локомотивного комплекса 348–361

О. А. Суслов. Влияние динамики
взаимодействия пути и подвижного
состава на изменение состояния пути
и организацию его технического
обслуживания в процессе
эксплуатации 362–371

Содержание журнала за 2024 год 372–373

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. Полещук. — 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. Тибилов, 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. Мирошниченко. — 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. Лapidуса, Г. В. Гогричиани. — 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. Гогричиани. — Москва : Интекст, 2013. — 288 с.
- Путь и путевое хозяйство. Взаимодействие колеса и рельса / под ред. М. М. Железнова. — Москва : Интекст, 2013. — 236 с.
- Лapidус, Б. М. Железнодорожный бизнес: как встать на главный путь / Б. М. Лapidус. — Москва : Интекст, 2013. — 383 с.
- Макроэкономическая роль железнодорожного транспорта: Теоретические основы, исторические тенденции и взгляд в будущее / под ред. Б. М. Лapidуса, 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. Лapidуса, Г. В. Гогричиани. — Москва : Интекст, 2012. — 260 с.
- Мугинштейн, Л. А. Энергооптимальные методы управления движением поездов / Л. А. Мугинштейн, И. А. Ябко, 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):



