

Вестник

Научно-исследовательского
института железнодорожного
транспорта

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

Том 79, № 6, 2020



20-22 апреля 2021 г., Москва

1-ая Международная научно-практическая конференция

НАУКА 1520 ВНИИЖТ

ЗАГЛЯНИ ЗА ГОРИЗОНТ



2021

ТЕМЫ МЕРОПРИЯТИЙ

- //// Контейнеризация перевозок
- //// Информационные технологии для пассажиров и клиентов
- //// Цифровая железная дорога и инновационные технические средства и технологии
- //// Диагностика
- //// Экономика железнодорожной отрасли
- //// Городская транспортная инфраструктура и комфортная среда

Также вас ждут

ТЕХНИЧЕСКИЕ ТУРЫ

- ||||| Экспериментальное кольцо
- ||||| Испытательные стенды
- ||||| Лаборатории ВНИИЖТ

Регистрация на сайте

www.research1520.ru



Вестник

Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта

Научно-технический журнал

Периодичность: 6 номеров в год

www.journal-vniizht.ru

Издаётся с января 1942 г.

ISSN 2223–9731 (Print)

ISSN 2713–2560 (Online)

Подписной индекс 70116

Международный редакционный совет

С. А. Виноградов (председатель, канд. техн. наук,

АО «ВНИИЖТ», Москва, Россия),

В. Е. Фортон (д-р физ.-мат. наук, проф.,

академик РАН, Москва, Россия),

Б. М. Лапидус (д-р экон. наук, проф.,

ОАО «РЖД», Москва, Россия),

К. Эсвельд (проф. железнодорожной

инженерии, Технологический университет

Делфта, Залтбommel, Нидерланды),

И. Г. Горячева (д-р физ.-мат. наук, проф.,

академик РАН, Институт проблем механики

им. А. Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия),

С. Куммер (д-р экономики, проф., Венский

экономический университет, Институт

транспорта и логистики, Вена, Австрия),

Н. А. Махутов (д-р техн. наук, проф.,

член-корреспондент РАН, Институт

машиноведения им. А. А. Благоданова РАН,

Москва, Россия),

В. И. Колесников (д-р техн. наук, проф.,

академик РАН, РГУПС, Ростов-на-Дону, Россия),

В. Ф. Ушкалов (д-р техн. наук, член-

корреспондент НАН, Институт технической

механики НАН, Днепр, Украина),

К. П. Шенфельд (д-р техн. наук, АО «ВНИИЖТ»,

Москва, Россия),

Г. С. Фокс-Рабинович (д-р техн. наук,

Университет Макмастера, Гамильтон, Канада),

Б. А. Лёвин (д-р техн. наук, проф., РУТ (МИИТ),

Москва, Россия),

Ли Сюэвей (д-р наук, проф., Пекин,

Китайская Народная Республика),

О. Н. Назаров (канд. техн. наук, ОАО «РЖД»,

Москва, Россия),

Д. А. Мачерет (д-р экон. наук, проф.,

АО «ВНИИЖТ», Москва, Россия),

Б. Е. Дынькин (д-р техн. наук, проф., РГУПС,

Ростов-на-Дону, Россия),

Е. Н. Розенберг (д-р техн. наук, проф.,

АО «НИИАС», Москва, Россия),

А. В. Смольянинов (д-р техн. наук, проф.,

УрГУПС, Екатеринбург, Россия)

Редакционная коллегия

А. Б. Косарев (председатель, д-р техн.

наук, проф.),

С. В. Фёдоров (д-р техн. наук, проф.),

Ж. Е. Бедова (секретарь),

С. М. Захаров (д-р техн. наук, проф.),

Н. Ф. Сирина (д-р техн. наук, доцент),

Г. В. Гогричани (д-р техн. наук),

А. Я. Коган (д-р техн. наук, проф.),

В. А. Кучумов (д-р техн. наук, проф.),

Л. А. Мугинштейн (д-р техн. наук, проф.),

Е. А. Шур (д-р техн. наук, проф.),

Б. Э. Глюзберг (д-р техн. наук, проф.),

О. Ф. Мирошниченко (д-р экон. наук, проф.)

Учредитель — АО «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта».

www.vniizht.ru

Свидетельство о регистрации
ПИ № ФС77-35600 от 17.03.2009.

Журнал включен в Российский индекс
научного цитирования (РИНЦ). Статьи
рецензируются.

© «Вестник научно-исследовательского
института железнодорожного транспорта»
(«Вестник ВНИИЖТ»), Москва, 2020

Вестник

Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта

Вестник ВНИИЖТ | Том 79, 6/2020
DOI: <https://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2020-79-6>

СОДЕРЖАНИЕ

Contents	318
Экономические параметры перевозок поездами «Холодный экспресс» на примере маршрута Владивосток — Москва — Санкт-Петербург С. П. Вакуленко, Д. Ю. Роменский, М. И. Мехедов, А. А. Гавриленков, А. М. Насыбуллин, В. В. Соловьев	319–326
Проверка адекватности методики генерации случайного процесса возмущения колебаний рельсовых экипажей по импульсной характеристике формирующего фильтра А. Н. Савоськин, Н. С. Лавлинская	327–336
Расчет зависимости коэффициента трения композиционных гребневых колодок для локомотивов от силы нажатия и скорости торможения А. Э. Габидуллин, Д. В. Горский, И. В. Назаров, В. А. Никитин	337–342
Комплексная оптимизация эксплуатации пассажирских поездов на базе автоматизированной системы управления рентабельностью пассажирских перевозок Г. Л. Венедиктов, В. М. Кочетков	343–350
К вопросу выбора вертикальных и горизонтальных связей в тележке для грузовых вагонов скоростных поездов Г. И. Гаджиметов, Г. И. Петров, Ю. А. Панин, И. Е. Ильин	351–359
Выбор специального транспортного средства для перевозки скоропортящихся грузов по железной дороге Т. И. Набатчикова, С. Н. Науменко, А. В. Костин, Г. Б. Гусев	360–364
Методы определения положения кривой в плане и влияние геометрии пути на показатели взаимодействия пути и подвижного состава Е. А. Сидорова, О. Н. Ваганова, А. Ю. Сластенин	365–372
К вопросу повышения эксплуатационной энергетической эффективности работы восьмиосных пассажирских электровозов постоянного тока И. Н. Никончук	373–382
Содержание журнала «Вестник ВНИИЖТ» за 2020 год	383–384

Мнение редакции может не совпадать
с мнением авторов статей.
Редакция не несет ответственности
за содержание рекламных материалов.
Адрес учредителя, издателя, редакции
журнала «Вестник ВНИИЖТ»:
129626, Москва, 3-я Мытищинская ул., 10.
Тел. (499) 260-43-19.
Цена свободная.

Главный редактор — Ж. Е. Бедова.
Подписано к печати 24.12.2020.
Дата выхода в свет 29.12.2020.
Формат бумаги 60×90 1/8.
Офсетная печать. Усл. печ. л. 8,5.
Тираж 350 экз. Заказ 4485.
Отпечатано ООО «ИПП «КУНА»,
125167, Москва, Ленинградский пр.,
д. 47, стр. 4. Тел. (495) 795-02-97.

VNIIZHT Scientific Journal

Vol. 79, 6/2020

DOI: <https://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2020-79-6>

Contents

Economic parameters of transportation by "Cold Express" trains on the example of the route Vladivostok—Moscow—St. Petersburg by S. P. Vakulenko, D. Yu. Romenskiy, M. I. Mekhedov, A. A. Gavrilin, A. M. Nasybullin, V. V. Solov'ev	319–326
Checking the adequacy of the method for generating a random process of disturbance of oscillations of rail carriages according to the impulse response of the forming filter by A. N. Savos'kin, N. S. Lavlinskaya	327–336
Calculation of the dependence of friction coefficient of locomotive composite ridge brake shoes on pressing force and braking speed by A. E. Gabidullin, D. V. Gorskiy, I. V. Nazarov, V. A. Nikitin	337–342
Comprehensive optimization of passenger trains operation based on an automated system for managing the profitability of passenger traffic by G. L. Venediktov, V. M. Kochetkov	343–350
On the issue of choosing vertical and horizontal connections in a bogie for freight cars of high-speed trains by G. I. Gadzhimetov, G. I. Petrov, Yu. A. Panin, I. E. Il'in	351–359
Selection of special vehicle for transportation of perishable freights by rail by T. I. Nabatchikova, S. N. Naumenko, A. V. Kostin, G. B. Gusev	360–364
Methods for determining the position of the curve in the plan and the influence of the geometry of the track on the indicators of interaction between the track and the rolling stock by E. A. Sidorova, O. N. Vaganova, A. Yu. Slastenin	365–372
On the issue of increasing operational energy efficiency of eight-axle passenger DC electric locomotives by I. N. Nikonchuk	373–382
General contents of the VNIIZHT Scientific Journal in 2020	383–384

Editorial Board:

Alexander B. Kosarev
(Dr. Sci. (Eng.), Prof.),
Sergey V. Fedorov
(Dr. Sci. (Eng.), Prof.),
Sergey M. Zakharov
(Dr. Sci. (Eng.), Prof.),
Nina F. Sirina
(Dr. Sci. (Eng.), Associate Prof.),

Georgiy V. Gogrichiani
(Dr. Sci. (Eng.)),
Alexander Ya. Kogan
(Dr. Sci. (Eng.), Prof.),
Vladislav A. Kuchumov
(Dr. Sci. (Eng.), Prof.),
Lev A. Muginshtein
(Dr. Sci. (Eng.), Prof.),

Evgeniy A. Shur
(Dr. Sci. (Eng.), Prof.),
Boris E. Glyuzberg
(Dr. Sci. (Eng.), Prof.),
Olga F. Miroshnichenko
(Dr. Sci. (Econ.), Prof.)

Scientific Editors — V. A. Kuchumov (Dr. Sci. (Eng.), Prof.), B. E. Glyuzberg (Dr. Sci. (Eng.), Prof.), D. A. Macheret (Dr. Sci. (Econ.), Prof.), O. F. Miroshnichenko (Dr. Sci. (Econ.), Prof.), Yu. S. Romen (Dr. Sci. (Eng.), Prof.)

Editor-in-Chief: Joan E. Bedova
E-mail: journal@vniizht.ru

Editorial office: 10, 3rd Mytischinskaya,
129626 Moscow, Russian Federation
Tel.: +7 (499) 260 4319.
Print: JSC "IPP "KUNA".
info@paradiz.ru

Passed for printing 24.12.2020.
Format 60×90 1/8. Circulation 350 copies.

VNIIZHT Scientific Journal

is published six times per year
First published in 1942
www.journal-vniizht.ru
ISSN 2223–9731 (Print)
ISSN 2713–2560 (Online)

A peer reviewed scientific and technological journal
Languages: Russian, English

Publisher:

JSC Railway Research Institute (JSC "VNIIZHT"),
Moscow, Russian Federation
www.vniizht.ru

International Advisory Board:

Sergey A. Vinogradov,

Cand. Sci. (Eng.), General Director of JSC "VNIIZHT",
Moscow, Russian Federation

Vladimir E. Fortov,

Dr. Sci. (Phys. and Math.), Professor, Academician
of the Russian Academy of Sciences, Federal state budgetary
institution — the Russian Academy of Sciences, Counselor,
Academician-Secretary of the Department of Energy,
Mechanics and Control Processes of the Russian Academy
of Sciences

Boris M. Lapidus,

Dr. Sci. (Econ.), Professor, Chairman of Joint Scientific
Council RZD, Chairman of International Board on Railway
Research (IRRB) of UIC, Guest professor of Stockholm
School of Economics, Moscow, Russian Federation

Coenraad Esvelde,

Prof., Dr. of railway engineering of Delft Technical
University, General Director of "Esvelde Consulting
Services", Zaltbommel, Netherlands

Irina G. Goryacheva,

Dr. Sci. (Phys. and Math.), Professor, Academician of
the RAS, Head of laboratory for tribology, Institute for
Problems in Mechanics of the RAS, Moscow, Russian
Federation

Sebastian Kummer,

Univ. Prof. Dr. (Econ.) of Vienna University of Economics
and Business, Head of Institute of Transport and Logistics,
Vienna, Austria

Nikolay A. Makhutov,

Dr. Sci. (Eng.), Professor, Corresponding member of the
RAS, Head of the scientific school "Safety and security
of critically and strategically important objects of
infrastructure" of Research Institute for Machine Science
named after A. A. Blagonravov of the RAS (IMASH RAS),
Moscow, Russian Federation

Vladimir I. Kolesnikov,

Dr. Sci. (Eng.), Professor, Academician of the Russian
Academy of Sciences, Rostov state university of railway
engineers (RGUPS), Rostov-on-Don, Russian Federation

Victor F. Ushkalov,

Dr. Sci. (Eng.), Professor, corresponding member of the
National Academy of Science of Ukraine, division head of
Statistics for kinetics of material system of the Institute of
Technical Mechanics, Dnepr, Ukraine

Konstantin P. Shenfeld,

Dr. Sci. (Eng.), Executive director of JSC "VNIIZHT",
Moscow, Russian Federation

Herman S. Fox-Rabinovich,

Dr. Sci. (Eng.), Chief researcher of McMaster University
Engineering, Hamilton, Ontario, Canada

Boris A. Levin,

Dr. Sci. (Eng.), Professor, President of the Russian University
of Transport (RUT (MIIT)), Moscow, Russian Federation

Li Xuewei,

Dr. Sci., Professor, Vice-President of Engineering Union
of China Transport system, Party Member of CPC group
of Ministry of Education (Peking University, China)

Oleg N. Nazarov,

Cand. Sci. (Eng.), Deputy Head of technical policy department
JSC RZD, Moscow, Russian Federation

Dmitriy A. Macheret,

Dr. Sci. (Econ.), Professor, JSC "VNIIZHT", Joint Research
Council of JSC RZD, Moscow, Russian Federation

Boris E. Dynkin,

Dr. Sci. (Eng.), Professor, Honored President of
International association of transport universities of
Asian-Pacific countries (IATU APC), Rostov state university
of railway engineers (RGUPS), Rostov-on-Don, Russian
Federation

Efim N. Rozenberg,

Dr. Sci. (Eng.), Professor, First deputy Director General
of JSC Design & Research Institute for Information
Technology, Signaling and Telecommunication on Railway
Transport (JSC NIAC), Moscow, Russian Federation

Alexander V. Smolyaninov,

Dr. Sci. (Eng.), Professor of department "Wagons" of Ural
State University of Railway Transport, Yekaterinburg,
Russian Federation

© JSC Railway Research Institute, Moscow 2020

Экономические параметры перевозок поездами «Холодный экспресс» на примере маршрута Владивосток — Москва — Санкт-Петербург

С. П. ВАКУЛЕНКО¹, Д. Ю. РОМЕНСКИЙ¹, М. И. МЕХЕДОВ², А. А. ГАВРИЛЕНКОВ¹, А. М. НАСЫБУЛЛИН¹, В. В. СОЛОВЬЕВ³

¹ Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет транспорта» (ФГАОУ ВО «РУТ» (МИИТ)), Москва, 127055, Россия

² Акционерное общество «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (АО «ВНИИЖТ»), Москва, 129626, Россия

³ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (ФГБОУ ВО «НИУ МГСУ»), Москва, 129337, Россия

Аннотация. В настоящее время в стадии проработки находится проект организации перевозок скоропортящихся грузов поездами «Холодный экспресс», представляющий собой новый транспортный продукт, нацеленный на доставку продуктов питания, сельскохозяйственного сырья и прочих высокодоходных грузов в города, до которых нецелесообразно назначение регулярных контейнерных поездов. В статье рассмотрены вопросы экономической эффективности инвестиционного проекта организации перевозок грузов в регулярных рефрижераторных контейнерных поездах на примере маршрута Владивосток—Москва—Санкт-Петербург с учетом обустройства не менее 18 контейнерных площадок, способных обрабатывать транзитные контейнерные поезда. Перевозки по проекту «Холодный экспресс» предполагают доставку грузов на маршруте Владивосток—Москва—Санкт-Петербург в попутные крупные города контейнерным поездом, загруженным рефрижераторными и изотермическими контейнерами, по разработанному расписанию с заранее известным временем прибытия и отправления. При развитии перевозок в обоих направлениях и выходе на проектную мощность емкость рынка перевозок грузов на пилотном маршруте сервиса «Холодный экспресс» составит 2,0 млн т. Грузопоток будут формировать 23 остановки на маршруте, 2 портовых узла, 2 пограничных сухопутных перехода с размерами движения 7 пар поездов в неделю. В составе проекта произведена оценка потребности в локальной реконструкции попутных станций и обустройстве на них новых или переоборудовании действующих контейнерных терминалов. При этом ввод в строй данных терминалов предполагается постепенным в течение 7 лет реализации проекта, что позволяет также постепенно наращивать грузовую базу и улучшать качество перевозок. Приведены результаты расчетов коммерческой эффективности проекта для ОАО «РЖД» как владельца инфраструктуры, перевозчика и оператора этих контейнерных терминалов, которые показывают его высокую перспективность. Даже при неполной загрузке поезда, прогнозируемой из-за неравномерной густоты грузопотока, чистый дисконтированный срок окупаемости составляет 10 лет.

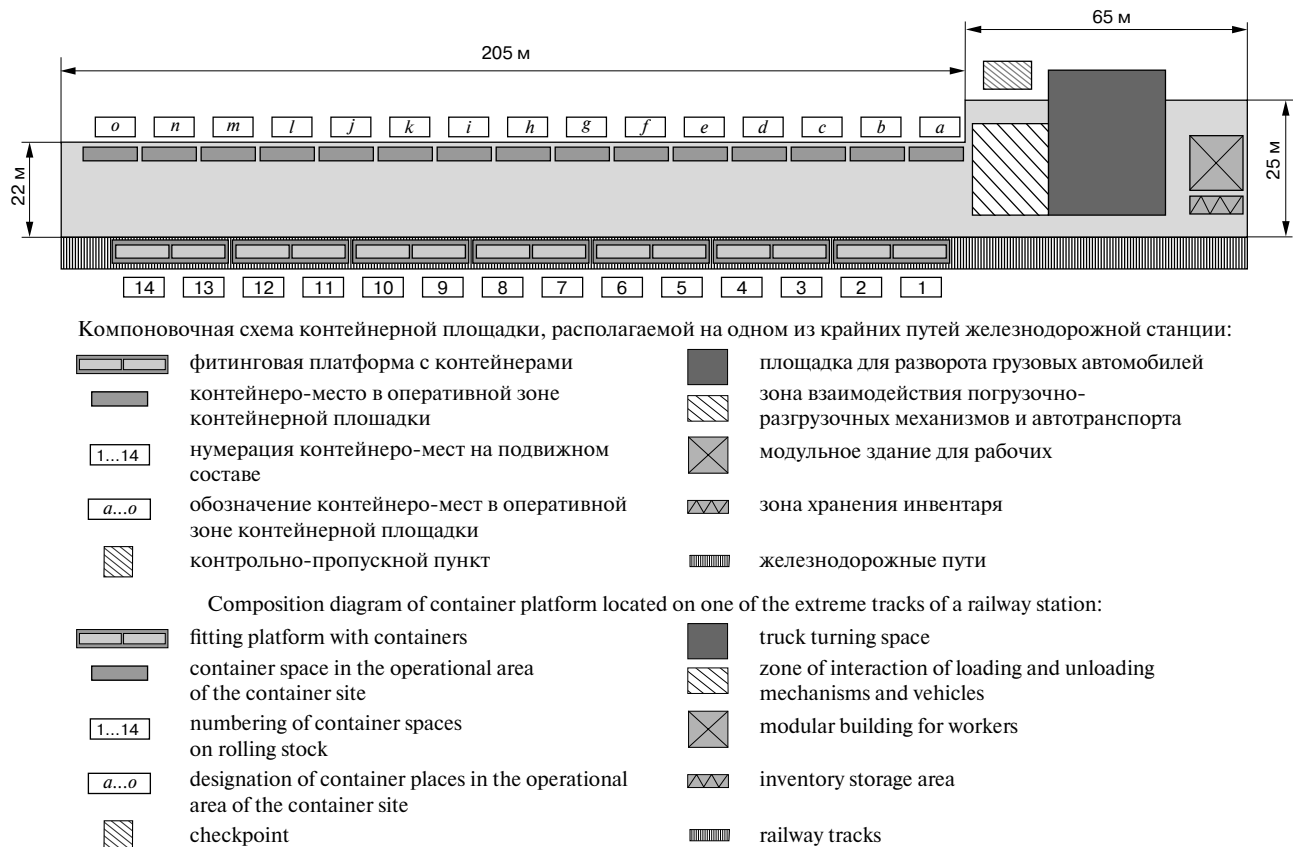
Ключевые слова: технико-экономическое обоснование; реконструкция железнодорожной инфраструктуры; логистика; контейнерные перевозки; рефрижераторный контейнер; железнодорожный транспорт; грузовые перевозки; скоропортящийся груз

Введение. Организация перевозки скоропортящихся грузов по проекту «Холодный экспресс» предполагает применение технологии [1], заключающейся в доставке груза на маршруте Владивосток—Москва—Санкт-Петербург в попутные крупные города (Хабаровск, Благовещенск, Чита, Улан-Удэ, Иркутск, Красноярск, Новосибирск и др.) в контейнерном поезде, загруженном рефрижераторными и изотермическими контейнерами, по разработанному расписанию с заранее известным временем прибытия и отправления. На попутных станциях маршрута следования поезда выгрузка и погрузка контейнеров предполагается на боковых путях за время короткой технологической стоянки (в пределах 2–3 ч) [2, 3, 4].

Актуальность исследования. Формирование грузовой базы и целесообразность развития перспективного сервиса «Холодный экспресс» зависят от следующих основных трендов:

- дальнейшее увеличение российскими предприятиями производства товаров, относящихся к категории скоропортящихся грузов;
- сохранение существующих струй перевозок скоропортящихся грузов на сети ОАО «РЖД» в условиях списания рефрижераторных секций и вагонов-термосов;
- государственная поддержка экспорта продуктов питания в Китай и на азиатские рынки при сохранении консервативного или умеренно пессимистичного сценария развития их импорта;
- развитие в восточной части России сетей магазинов компаний розничной торговли, нуждающихся в ускоренных и недорогих перевозках грузов, которые требуют температурного контроля.

Емкость рынка перевозок грузов на пилотном маршруте сервиса «Холодный экспресс» при развитии перевозок в обоих направлениях и выходе на проектную мощность составит 2,0 млн т. Грузопоток будут



формировать 23 остановки на маршруте, 2 портовых узла, 2 пограничных сухопутных перехода с размерами движения 7 пар поездов в неделю. С целью минимизации рисков и уменьшения инвестиционной нагрузки на проект следует предусматривать поэтапное наращивание частоты курсирования и поэтапное введение в строй новых и реконструированных опорных станций маршрута.

Постепенное увеличение частоты обращения «Холодного экспресса» от 1 до 7 пар поездов в неделю позволит вводить в эксплуатацию новые контейнерные площадки поэтапно в течение 7 лет. Сначала в эксплуатацию будут введены опорные станции в наиболее крупных городах, работа которых позволит уточнить очередность открытия и количество остальных контейнерных терминалов.

Поезд, состоящий из сцепов рефрижераторных и дизель-генераторных контейнеров на стандартных фитинговых вагонах-платформах, формируется на одном из контейнерных терминалов Приморья, Московского или Петербургского транспортного узла. В составе поезда находятся преимущественно изотермические контейнеры назначением в адрес попутных станций по маршруту следования, где поезд будет делать остановку. На боковых путях этих станций обустройстваются

небольшие контейнерные площадки (см. рисунок) согласно действующим нормативам и опыту эксплуатации контейнерных терминалов [5, 6, 7, 8], которые оснащаются погрузчиками на колесном ходу соответствующей грузоподъемности, такими как ричстакеры, боковые перегружатели на автомобильном ходу или мачтовые штабелеры [9, 10]. Погрузка-выгрузка контейнеров может производиться после электрического отключения контейнера и выполнения требований электробезопасности при работе на электрифицированных путях.

Постановка проблемы и пути ее решения. При выборе наиболее оптимальных станций для работы с поездами «Холодный экспресс» в границах транспортных узлов на маршруте следования поездов одним из основных требований является необходимость обеспечения возможности формирования контейнерной площадки сквозного типа, на которую может приниматься полносоставный поезд, ведомый магистральным электровозом. Учитывая отсутствие подобных терминалов на маршруте следования поезда, необходимо рассматривать компромиссные варианты развития инфраструктуры существующих грузовых станций.

Вариант 1. Для проведения погрузочно-разгрузочных работ формируется новая компактная контей-

нерная площадка на боковом приемоотправочном или прочем пути промежуточной грузовой или технической станции при условии проведения локальной реконструкции (в том числе удлинения и электрификации путей при необходимости).

Вариант 2. Для проведения погрузочно-разгрузочных работ производится реконструкция существующего контейнерного терминала, расположенного в непосредственной близости от станции, для обеспечения возможности приема и отправления полносоставного поезда «Холодный экспресс» поездным порядком непосредственно на грузовой фронт, т. е. без выполнения маневровых операций.

Погрузочно-выгрузочная площадка должна иметь минимальные технологически обоснованные размеры с подводом автодороги, а также весь необходимый набор обустройств и помещений. Строительство площадок целесообразно проводить в два этапа по мере наращивания размеров движения и развития маршрутной сети перевозок поездами «Холодный экспресс».

Первый этап (для первоочередных опорных станций) предполагает оборудование бетонной площадкой части приемоотправочного пути длиной не менее 200 м. Контейнеры назначением на данную станцию ставятся в определенную часть состава контейнерного поезда таким образом, чтобы при его остановке на пути длиной 1050 м была возможность их выгрузки на боковую площадку без маневровых передвижений и протяжки состава локомотивом. Зона длительного хранения контейнеров для такого терминала не обору­дуется.

На втором этапе площадка дооборудуется на полную длину поезда. Закупается высокопроизводительная техника и обустраивается зона хранения контейнеров. Для наиболее востребованных терминалов прорабатывается вопрос строительства второго и третьего погрузочно-выгрузочных путей.

Для маршрута Владивосток — Москва — Санкт-Петербург был проведен анализ потребности в реконструкции терминалов и обустройстве новых площадок в городах на маршруте исходя из прогнозируемых объемов перевозок. В табл. 1 приведена предлагаемая очередность ввода новых площадок в строй с учетом того, что схемы работы многофункциональных терминально-логистических центров, предполагаемых к строительству в крупных транспортных узлах по федеральной программе [11, 12], не позволяют обрабатывать транзитные контейнерные поезда без выполнения продолжительных по времени маневровых операций.

Экономический эффект от реализации проекта «Холодный экспресс» складывается из нескольких составляющих:

Таблица 1
Этапность ввода в строй станций для работы с поездами «Холодный экспресс» в соответствующих городах на маршруте

Table 1

Stages of commissioning of stations for work with “Cold Express” trains in the corresponding cities on the route

Период	Частота отправок в неделю	Вводимые в строй новые площадки	Реконструируемые контейнерные площадки
1–2 год	Пилотные отправки (не чаще 1 раза в неделю)	Пермь (Курья), Тюмень (Тюмень-пасс.), Благовещенск/Белогорск (ст. Украина), Чита (Кадала)	–
3 год	2	Омск (Пламя), Хабаровск (Хабаровск-2), Иркутск (Батарейная), Красноярск (Злобино), Новосибирск (Мочище)	Улан-Удэ (Тальцы), Екатеринбург (Гипсовая), Нижний Новгород (Горький-Сортировочный)
4 год	3	Сковородино (Бамовская)	Москва (Электроугли)
5 год	4	Томск/Кемерово (Анжерская), Киров (Полой)	–
6 год	5	Биробиджан (Икура)	–
7 год	6	Владимир (Юрьевец)	–
8 год и далее	7	–	–

- экономическая целесообразность обращения ускоренного грузового поезда между начальной и конечной станцией маршрута (эффекты для ОАО «РЖД»);
- целесообразность осуществления инвестиций в развитие существующих и сооружение новых контейнерных площадок на маршруте поезда (эффекты для ОАО «РЖД» или владельцев терминалов);
- рентабельность эксплуатации контейнеров и вагонов, а также экспедирование перевозок (эффекты для экспедиторов, вагонных операторов и операторов контейнерного парка).

Эффективность проекта для экспедиторов, вагонных операторов и операторов контейнерного парка подтверждается применением в расчетах действующих рыночных ставок на аренду подвижного состава.

Ниже приведены результаты расчета общих эффектов, учитывающих покрытие инвестиций на развитие терминальных мощностей доходами от высокорентабельных перевозок по действующим ставкам [13].

Целесообразность назначения ускоренного грузового поезда (в том числе поезда «Холодный экспресс») в зависимости от ряда исходных данных может быть

оценена для любого перспективного маршрута по следующей формуле:

$$P = (D_i - r_j^{\text{всего}}) 100 / r_j^{\text{всего}},$$

где D_i — доходы перевозчика (включая сборы); $r_j^{\text{всего}}$ — всего эксплуатационных расходов ОАО «РЖД» по проекту «Холодный экспресс».

Предлагаемая методика позволяет оценить перспективное назначение поезда на этапе предварительной оценки без учета местных условий, которые могут как улучшить, так и ухудшить общий результат.

Доходы перевозчика (включая сборы) определяются на основании действующих тарифных ставок по Прейскуранту № 10-01. Расчетная финансовая модель реализована в двух вариантах: на состав «Холодный экспресс», включающий в себя 36 длиннобазных 80-футовых платформ с 72 контейнерами и 3 дизель-генераторными вагонами, а также на 24 платформы с 48 контейнерами и 2 дизель-генераторными вагонами. При этом в доходную модель закладывается неполная загрузка поезда контейнерами, т. е. частично порожний пробег контейнеро-мест.

Расходы, понесенные ОАО «РЖД» в результате выполнения перевозок, определены на основе Методики расчета себестоимости перевозок грузов ОАО «РЖД» для тарифных целей, разработанной

АО «ВНИИЖТ». Данная методика подготовлена с учетом Порядка определения себестоимости грузовых перевозок для тарифных целей в соответствии с Номенклатурой доходов и расходов по видам деятельности ОАО «РЖД» в условиях совместной работы парка инвентарных и частных вагонов («совместного пула») (утв. распоряжением ОАО «РЖД» 18 декабря 2009 г. № 21853), а также других исследований АО «ВНИИЖТ». Вычисления производились по программе расчета себестоимости для тарифных целей, построенной по параметрическим моделям, созданным в рамках упомянутого исследования АО «ВНИИЖТ», с индексацией по отчетности за 1 полугодие 2019 г. Для расчетов были использованы параметры, приведенные в табл. 2.

Выполненные расчеты показывают, что при полной загрузке платформ на всех направлениях следования «Холодного экспресса» отмечается существенное превышение платы за перевозку над себестоимостью. В случае перевозки полностью загруженного экспресса по маршруту Шушары (Октябрьская железная дорога) — Угольная (Дальневосточная железная дорога) доход составит 12 307 536 руб. (с учетом промежуточных струй грузопотоков в адрес попутных станций), а себестоимость — 8 476 929 руб. В случае загрузки поезда на $\frac{2}{3}$ и наличия 2 дизель-генераторных вагонов доход составит 8 205 024 руб., а себестоимость — 7 917 769 руб.

Денежные потоки по проекту определены на основании вышеуказанных расчетов с учетом доли условно-переменных расходов в себестоимости — 41 %, по данным АО «ВНИИЖТ», (табл. 3).

Отдельной задачей в экономическом обосновании проектов подобного рода является достоверное определение объемов капитальных вложений в создание инфраструктурной составляющей (в данном случае — типовых контейнерных площадок для проекта «Холодный экспресс»). В соответствии с практикой современного ценообразования в строительстве, изложенной в [14], наиболее приемлемым является метод оценки величины сметной стоимости на основе укрупненных показателей [15]. Метод позволяет избежать на предпроектной стадии излишней детализации проектных решений, а также обеспечивает формирование затратной части проекта с необходимой точностью [16]. При этом неизбежно возникает проблема недостатка укрупненных нормативов, так как на отраслевом уровне их номенклатура ограничена новым строительством наиболее массовых типовых сооружений. Опираясь на опыт разработки и применения укрупненных нормативов в транспортном строительстве [17], при экономических изысканиях по проекту «Холодный экспресс» был применен комбинированный метод, в соответствии с которым

Таблица 2

Значения параметров перевозки, принятые в расчетах

Table 2

Values of transportation parameters used in calculations

Наименование параметра	Значение параметра
Средняя статическая нагрузка груженого контейнера, т	23,8
Вес тары контейнера, т	4
Масса тары фитинговой платформы, т	22
Длина фитинговой платформы, м	25,5
Масса дизель-генераторного вагона, т	60
Длина дизель-генераторного вагона, м	18
Количество контейнеров в составе поезда, шт.	72
Грузоподъемность контейнера, т	34
Средневзвешенный коэффициент использования контейнеро-мест в поезде	0,66
Расстояние перевозки, км, по дорогам:	
Октябрьская	715
Московская	247
Горьковская	1000
Свердловская	1373
Западно-Сибирская	1153
Красноярская	742
Восточно-Сибирская	1332
Забайкальская	2298
Дальневосточная	1205

Таблица 3

Прогноз денежных потоков при организации курсирования поездов «Холодный экспресс»
на рассматриваемом маршруте при наращивании частоты курсирования

Table 3

Forecast of money flows when organizing the running of “Cold Express” trains
on the route under consideration when increasing the running frequency

Наименование показателя	Значение показателя						
	1	2	3	4	5	6	7
Количество пар поездов в неделю							
Доходы при полной загрузке, млн руб.*	1 279,98	2 559,97	3 839,95	5 119,93	6 399,92	7 679,90	8 959,89
Доходы при частичной (½) загрузке, млн руб.	853,32	1 706,64	2 559,97	3 413,29	4 266,61	5 119,93	5 973,26
Расходы (без условно-постоянных), млн руб.*	361,46	722,91	1 084,37	1 445,83	1 807,28	2 168,74	2 530,19
Прибыль от перевозок при полной загрузке, млн руб.	918,53	1 837,05	2 755,58	3 674,11	4 592,64	5 511,16	6 429,69
Прибыль при частичной (½) загрузке, млн руб.	491,87	983,73	1 475,60	1 967,46	2 459,33	2 951,20	3 443,06
Количество операций с контейнерами, шт.**	47 958	72 233	98 503	123 268	148 121	165 226	174 931
Доходы от операций с контейнерами, млн руб.***	62,35	93,90	128,05	160,25	192,56	214,79	227,41
Расходы от операций с контейнерами, млн руб.****	42,97	64,72	88,26	110,45	132,72	148,04	156,74
Прибыль от операций с контейнерами при полной загрузке, млн руб.	19,38	29,18	39,80	49,80	59,84	66,75	70,67
Прибыль от операций с контейнерами при частичной (½) загрузке, млн руб.	12,92	19,45	26,53	33,20	39,89	44,50	47,11
Доходы всего при частичной (½) загрузке, млн руб.	894,89	1 769,25	2 645,34	3 520,12	4 394,98	5 263,13	6 124,86
Расходы всего при частичной (½) загрузке, млн руб.	390,10	766,06	1 143,21	1 519,46	1 895,76	2 267,43	2 634,69
Совокупная прибыль при полной загрузке, млн руб.	937,90	1 866,24	2 795,38	3 723,91	4 652,48	5 577,92	6 500,36
Совокупная прибыль при частичной (½) загрузке, млн руб.	504,78	1 003,19	1 502,13	2 000,67	2 499,23	2 995,70	3 490,18

* Рассчитаны отдельно.

** Рассчитаны отдельно исходя из прогноза перевозок.

*** Средний расход на одну операцию с контейнерами по данным Центральной дирекции по управлению терминально-складским комплексом (1300 руб.).

**** Средний расход на одну операцию по хозяйству Центральной дирекции по управлению терминально-складским комплексом (896 руб.).

недостающие показатели сметной стоимости моделировались на основе обобщения статистики по уже построенным проектам. В соответствии с этим, а также учитывая фактор качества и безопасности при реализации проекта с высоким уровнем ответственности [18], были определены основные показатели затрат для строительства новых и развития существующих 18 контейнерных площадок на маршруте Владивосток — Москва — Санкт-Петербург: инвестиции объемом 8,94 млрд руб. сроком на 6 лет. Кроме того, начиная с 10-го года реализации проекта в финансовой модели учтены затраты на обновление рабочего парка погрузчиков ввиду их амортизации [19]: 2029 г. — 313,6 млн руб., 2030 г. — 243,9 млн руб., 2031 г. — 139,4 млн руб.

Для оценки коммерческой эффективности инвестиционного проекта в соответствии с использованными методиками были применены следующие основные показатели:

1) Чистая приведенная стоимость, или чистый дисконтированный доход (Net Present Value, NPV).

Для признания инвестиционного проекта эффективным с точки зрения инвестора необходимо, чтобы NPV был неотрицательным;

2) Внутренняя норма доходности (Internal Rate of Return, IRR).

Показывает такую ставку дисконтирования, при которой NPV обращается в ноль. Для оценки эффективности инвестиционного проекта с помощью показателя IRR его значение для проекта необходимо сопоставить с нормой дисконта. Если IRR больше альтернативной доходности, то проект может быть принят;

3) Срок окупаемости (Payback Period, PP).

Простым сроком окупаемости называется продолжительность периода от начального момента до момента окупаемости. Моментом окупаемости называется тот момент времени в расчетном периоде, после которого текущий NPV становится положительным и в дальнейшем остается таким же.

Сроком окупаемости с учетом дисконтирования называется продолжительность периода от начального момента до момента, после которого текущий NPV становится положительным и в дальнейшем остается таким же.

Результаты. Расчет вышеперечисленных показателей коммерческой эффективности для ОАО «РЖД»

Таблица 4

Основные показатели коммерческой эффективности
инвестиций в проект для ОАО «РЖД»

Table 4

Key indicators of the commercial efficiency
of project investments for the Russian Railways

Наименование показателя	Значение показателя
Чистый дисконтированный доход (NPV), млн руб.	4 864,74
Внутренняя норма доходности (IRR), %	20,1
Срок окупаемости (PP), лет	7,3
Дисконтированный срок окупаемости (Discounted payback period, DPP), лет	10,5
Ставка дисконтирования, %	12,8

от реализации проекта «Холодный экспресс» выполнен с использованием программного продукта «Альт-Инвест». Результаты расчета данных показателей представлены в табл. 4. NPV становится положительным уже на 10-й год реализации проекта при весьма консервативных оценках перспектив наращивания объемов перевозок. Это позволяет сделать вывод о высокой эффективности вложений в реализацию проекта «Холодный экспресс».

Выводы. Полученные результаты оценки эффективности реализации проекта «Холодный экспресс» при принятых в расчете условиях свидетельствуют о его высокой коммерческой рентабельности для ОАО «РЖД». Задачей прочих участников проекта (экспедиторов, перевозчиков) будет в том числе управление загрузкой поезда по маршруту следования, аналогично тому, как это происходит в пассажирских поездах дальнего следования. Значение финансового результата будет зависеть напрямую именно от этого параметра. Для улучшения показателей работы проекта следует предусмотреть механизмы привлечения дополнительных грузопотоков, перевозимых в том числе в универсальных контейнерах.

Потребность в организации ускоренных перевозок малых и средних партий груза существует не только на маршруте Владивосток — Москва — Санкт-Петербург, но и на многих направлениях транспортной сети России и сопредельных государств. Приведенные расчеты показывают, что при реализации проекта «Холодный экспресс» силами ОАО «РЖД» (как владельца инфраструктуры и перевозчика) он имеет привлекательные параметры коммерческой эффективности, так как используется преимущественно существующая железнодорожная инфраструктура и достигается синергетический эффект.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Типовая технология перевозки грузов поездами «Холодный экспресс»: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 5 марта 2020 г. № 493/р. Екатеринбург: УралЮрИздат, 2020. 24 с.
2. Скачков А.А., Мехедов М.И., Петров В.В. Перевозка скоропортящихся грузов по технологии «Холодный экспресс» // Железнодорожный транспорт. 2018. № 9. С. 51–54.
3. Вакуленко С.П. «Холодный экспресс» отправляется: [беседа с директором Института управления и информационных технологий (ИУИТ) Российского университета транспорта РУТ (МИИТ)] / беседовал В. Горелкин // Гудок. 2019. 19 июня (Вып. № 105). С. 7.
4. РЖД хотят пустить «Холодный экспресс» с остановками для ускорения перевозки скоропорта [Электронный ресурс] // Интернет-портал ОАО «РЖД». URL: https://press.rzd.ru/smi/public/ru/json?STRUCTURE_ID=2&layer_id=5050&refererLayerId=5049&id=311882 (дата обращения: 16.03.2020 г.).
5. СП 262.1325800.2016. Контейнерные площадки и терминальные устройства на предприятиях промышленности и транспорта. Правила проектирования и строительства: утв. приказом Минстроя России от 3 дек. 2016 г. № 886/пр. М.: Стандартинформ, 2017. 32 с.
6. Маликов О.Б., Коровяковский Е.К., Коровяковская Ю.В. Проектирование контейнерных терминалов: учеб. пособие. СПб.: ПГУПС, 2015. 52 с.
7. Васильев Ю.И., Слищан А.Е. Современные тенденции развития контейнерных терминалов // Эксплуатация морского транспорта. 2007. № 3 (49). С. 10–12.
8. Оптимизация взаимодействия автомобильного и железнодорожного транспорта в контейнерных терминалах / В.Д. Шепелев [и др.] // Вестник Южно-Уральского гос. ун-та. Серия: Экономика и менеджмент. 2018. № 2. С. 185–192.
9. Каталог техники компании CVS Ferrari [Электронный ресурс]. URL: <http://cvsferrari.ru/katalog> (дата обращения: 24.04.2020 г.).
10. Container handling solutions [Электронный ресурс]. URL: <https://www.steelbro.com> (дата обращения: 24.04.2020 г.).
11. Долгосрочная программа развития ОАО «Российские железные дороги» до 2025 года [Электронный ресурс]: распоряжение Правительства Российской Федерации от 19 марта 2019 г. № 466-р. URL: https://doc.rzd.ru/doc/public/ru?STRUCTURE_ID=704&layer_id=5104&id=7017 (дата обращения: 24.04.2020 г.).
12. Баскаков П.В. Проблемы организации контейнерных перевозок // Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО «РЖД». 2017. № 5–6. С. 53–59.
13. Об утверждении Прейскуранта № 10-01 «Тарифы на перевозки грузов и услуги инфраструктуры, выполняемые российскими железными дорогами»: тарифное руководство № 1. Ч. 1, 2: постановление Федеральной энергетической комиссии Российской Федерации от 17 июня 2003 г. № 47-т/5 // Российская газета. 2003. № 30 (Ст. 164 с изм. и допол. в ред. от 1 янв. 2019 г.).
14. Соловьев В.В. Отраслевые особенности определения укрупненных показателей стоимости строительства // Экономика железных дорог. 2016. № 6. С. 46–53.
15. Об утверждении укрупненных нормативов цены строительства [Электронный ресурс]: приказ Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 30 дек. 2019 г. № 917/пр. URL: <http://docs.cntd.ru/document/564222092> (дата обращения: 24.04.2020 г.).
16. Соловьев В.В., Кузнецова А.Э. Моделирование стоимостных нормативов для объектов железнодорожного строительства // Экономика железных дорог. 2016. № 12. С. 44–51.
17. Соловьев В.В., Корчагин А.П., Абу-Хайдар С.Б. Направления актуализации сметных норм в транспортном строительстве // Мир транспорта. 2018. Т. 16. № 2 (75). С. 116–127.

18. Корчагин А. П., Полтава А. В., Соловьев В. В. Факторы безопасности как показатели качества работы транспортной инфраструктуры // Устойчивое развитие: общество, экология, экономика: материалы XV Междунар. науч. конф. (Москва, 28 марта 2019 г.). В 4 ч. Ч. 1 / под ред. А. В. Семенова, Н. Г. Малышева; Московский ун-т им. С. Ю. Витте. М., 2019. С. 369–376.

19. Повышение эффективности инвестиционной деятельности на железнодорожном транспорте: монография / А. В. Марцинковская [и др.]; под ред. Д. А. Мачерета и А. В. Марцинковской. М.: МИИТ, 2015. 172 с.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

ВАКУЛЕНКО Сергей Петрович,

канд. техн. наук, профессор, директор Института управления и цифровых технологий, ФГАОУ ВО «РУТ» (МИИТ)

РОМЕНСКИЙ Дмитрий Юрьевич,

старший преподаватель, кафедра «Управление транспортным бизнесом и интеллектуальные системы», ФГАОУ ВО «РУТ» (МИИТ)

МЕХЕДОВ Михаил Иванович,

канд. техн. наук, заместитель Генерального директора — директор научного центра «Цифровые модели перевозок и технологии энергосбережения» (НЦ «ЦМПЭ»), АО «ВНИИЖТ»

ГАВРИЛЕНКО Анатолий Александрович,

канд. экон. наук, заведующий лабораторией «Технико-экономическая оценка научно-технических проектов», ФГАОУ ВО «РУТ» (МИИТ)

НАСЫБУЛЛИН Айрат Марсович,

ассистент, кафедра «Управление транспортным бизнесом и интеллектуальные системы», ФГАОУ ВО «РУТ» (МИИТ)

СОЛОВЬЕВ Вячеслав Владимирович,

канд. экон. наук, доцент, кафедра «Экономика и управление в строительстве», ФГБОУ ВО «НИУ МГСУ»

Статья поступила в редакцию 12.05.2020 г., принята к публикации 20.07.2020 г.

Для цитирования: Экономические параметры перевозок поездами «Холодный экспресс» на примере маршрута Владивосток—Москва—Санкт-Петербург / С. П. Вакуленко [и др.] // Вестник ВНИИЖТ. 2020. Т. 79. № 6. С. 319–326. DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2020-79-6-319-326>.

Economic parameters of transportation by “Cold Express” trains on the example of the route Vladivostok—Moscow—St. Petersburg

S. P. VAKULENKO¹, D. Yu. ROMENSKIY¹, M. I. MEKHEDOV², A. A. GAVRILENKOV¹, A. M. NASYBULLIN¹, V. V. SOLOV'EV³

¹Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education “Russian University of Transport” (FGAOU VO “RUT”) (MIIT), Moscow, 127055, Russia

²Joint Stock Company “Railway Research Institute” (JSC “VNIIZHT”), Moscow, 129626, Russia

³Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “National Research Moscow State University of Civil Engineering” (FGBOU VO “NIU MGSU”), Moscow, 129337, Russia

Abstract. Currently, a project for organizing the transportation of perishable freights by “Cold Express” trains is under development, which is a new transport product aimed at delivering food, agricultural raw materials and other highly profitable goods to cities where regular container trains are impractical. The article discusses the economic efficiency of the investment project for organizing the transportation of freights in regular refrigerated container trains on the example of the Vladivostok—Moscow—St. Petersburg route, taking into account the arrangement of at least 18 container sites capable of handling transit container trains. Transportation according to the “Cold Express” concept involves the delivery of freights on the Vladivostok—Moscow—St. Petersburg route to associated large cities by container train loaded with refrigerated and insulated containers, according to a developed schedule with a known arrival and departure time. Capacity of the freight transportation market on the pilot route of the “Cold Express” is 2.0 million tons with the development of transportation in both directions when reaching the design capacity. Freight traffic will be formed by 23 stops on the route, 2 port hubs, 2 border land crossings with a traffic size of 7 pairs of trains per week. As part of the project, an assessment was made of the need for the local reconstruction of passing stations and equipping them with new ones or refurbishing existing container terminals. At the same time, the commissioning of these terminals is supposed to be gradual within 7 years of the project, which also allows gradually increasing the freight base and improving the quality of transportation. The article presents the results of cal-

culations of the commercial efficiency of the project for the Russian Railways as the owner of the infrastructure, carrier and operator of these container terminals, which show its high prospects. Even with an incomplete train load predicted due to uneven density of freight traffic, the net discounted payback period is 10 years.

Keywords: feasibility study; reconstruction of the railway infrastructure; logistics; container transporting; reefer container; railway transport; freight transportation; perishable freights

DOI: <https://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2020-79-6-319-326>

REFERENCES

1. *Typical technology for the transportation of freights by trains “Cold Express”*. Approved by order of the JSC “Russian Railways” dated March 5, 2020 No. 493/r. Yekaterinburg, UralYurizdat Publ., 2020, 24 p. (in Russ.).
2. Skachkov A. A., Mekhedov M. I., Petrov V. V. *Perevozka skoporyashchikhsya gruzov po tekhnologii “Kholodnyy ekspress”* [Transportation of perishable freights using the “Cold Express” technology]. *Zheleznodorozhnyy transport*, 2018, no. 9, pp. 51–54.
3. Vakulenko S. P. *“Kholodnyy ekspress” otpravlyayetsya: [beseda s direktorom Instituta upravleniya i informatsionnykh tekhnologiy (IUIT) Rossiyskogo universiteta transporta RUT (MIIT)] / besedoval V. Gorelkin* [“Cold Express” departs: conversation with the Director of the Institute of Management and Information Technologies (IUIT) of the Russian University of Transport RUT (MIIT), interviewed by V. Gorelkin]. *Gudok*, 2019, June 19 (no. 105), p. 7. (in Russ.).

4. Russian Railways wants to launch a "Cold Express" with stops to speed up the transportation of perishable freights. Internet portal of Russian Railways. URL: https://press.rzd.ru/smi/public/ru/json?STRUCTURE_ID=2&layer_id=5050&refererLayerId=5049&id=311882 (retrieved on 16.03.2020) (in Russ.).

5. SP 262.1325800.2016. Set of rules. Container platforms and terminal devices at industrial and transport enterprises. Design and construction rules. Approved by order of the Ministry of Construction of Russia dated December 3, 2016 No. 886/pr. Moscow, Standartinform Publ., 2017, 32 p. (in Russ.).

6. Malikov O. B., Korovyakovskiy E. K., Korovyakovskaya Yu. V. *Proektirovaniye konteynernykh terminalov. Ucheb. posobie* [Design of container terminals. Tutorial]. St. Petersburg, PGUPS Publ., 2015, 52 p.

7. Vasil'ev Yu. I., Slitsan A. E. *Sovremennyye tendentsii razvitiya konteynernykh terminalov* [Modern trends in the development of container terminals]. *Eksploatatsiya morskogo transporta* [Operation of sea transport], 2007, no. 3 (49), pp. 10–12.

8. Shepelev V. D., Zverev L. A., Al'metova Z. M., Geraskina O. V. *Optimizatsiya vzaimodeystviya avtomobil'nogo i zheleznodorozhnogo transporta v konteynernykh terminalakh* [Optimization of interaction of road and rail transport in container terminals]. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gos. un-ta* [Bulletin of the South Ural State University], Seriya: Ekonomika i menedzhment [Series: Economics and Management], 2018, no. 2, pp. 185–192.

9. *Catalog of equipment of the CVS Ferrari*. URL: <http://cvsferrarius.ru/katalog> (retrieved on 24.04.2020) (in Russ.).

10. *Container handling solutions*. URL: <https://www.steelbro.com> (retrieved on 24.04.2020).

11. *Long-term development program of the JSC "Russian Railways" until 2025*. Order of the Government of the Russian Federation dated March 19, 2019 No. 466-r. URL: https://doc.rzd.ru/doc/public/ru?STRUCTURE_ID=704&layer_id=5104&id=7017 (retrieved on 24.04.2020) (in Russ.).

12. Baskakov P. V. *Problemy organizatsii konteynernykh perevozok* [Problems of organizing container transportation]. *Byulleten' Ob"edinennogo uchenogo soveta OAO "RZHD"* [Bulletin of the Joint Scientific Council of the JSC "Russian Railways"], 2017, no. 5–6, pp. 53–59.

13. *On approval of Pricelist No. 10-01 "Tariffs for the transport of freights and infrastructure services performed by the Russian Railways": tariff guidelines No. 1. Parts 1, 2*. Resolution of the Federal Energy Commission of the Russian Federation dated June 17, 2003 No. 47- t/ 5. Russian Newspaper, 2003, no. 30 (Art. 164 as amended and supplemented as amended on January 1, 2019) (in Russ.).

14. Solov'ev V. V. *Otraslevye osobennosti opredeleniya ukрупnennykh pokazateley stoimosti stroitel'stva* [Industry specific features of the definition of enlarged indicators of the cost of construction]. *Railway Economy*, 2016, no. 6, pp. 46–53.

15. *On the approval of the enlarged standards for the price of construction*. Order of the Ministry of construction and housing and communal services of the Russian Federation from December 30, 2019 No. 917/pr. URL: <http://docs.cntd.ru/document/564222092> (retrieved on 24.04.2020) (in Russ.).

■ E-mail: Mekhedov.Mikhail@vniizht.ru (M. I. Mekhedov)

16. Solov'ev V. V., Kuznetsova A. E. *Modelirovaniye stoimostnykh normativov dlya ob"ektov zheleznodorozhnogo stroitel'stva* [Modeling cost standards for railway construction objects]. *Railway Economy*, 2016, no. 12, pp. 44–51.

17. Solov'ev V. V., Korchagin A. P., Abu-Khaydar S. B. *Napravleniya aktualizatsii smetnykh norm v transportnom stroitel'stve* [Directions of updating estimate norms in transport construction]. *World of Transport and Transportation*, 2018, Vol. 16, no. 2 (75), pp. 116–127.

18. Korchagin A. P., Poltava A. V., Solov'ev V. V. *Faktory bezopasnosti kak pokazateli kachestva raboty transportnoy infrastruktury* [Safety factors as indicators of the quality of the transport infrastructure]. *Ustoychivoe razvitiye: obshchestvo, ekologiya, ekonomika*. Materialy XV Mezhdunar. nauch. konf. (Moskva, 28 marta 2019 g.). V 4 ch. Ch. 1 [Sustainable development: society, ecology, economy. Materials of the XV International scientific conference (Moscow, March 28, 2019). In 4 parts. Part 1]. Moscow, Moskovskiy un-t im. S. Yu. Vitte [Moscow University named after S. Yu. Vitte] Publ., 2019, pp. 369–376.

19. Macheret D. A., Martsinkovskaya A. V., Gavrilentov A. A. *Povysheniye effektivnosti investitsionnoi deyatel'nosti na zheleznodorozhnom transporte: monografiya* [Increasing the efficiency of investment activity in railway transport: monograph]. Moscow, MIIT, 2015, 172 p.

ABOUT THE AUTHORS

Sergey P. VAKULENKO,

Cand. Sci. (Eng.), Professor, Director of the Institute of Management and Digital Technologies, FGAOU VO "RUT" (MIIT)

Dmitriy Yu. ROMENSKIY,

Senior Lecturer, Department "Transport Business Management and Intelligent Systems", FGAOU VO "RUT" (MIIT)

Mikhail I. MEKHEDOV,

Cand. Sci. (Eng.), Deputy General Director — Director of the Scientific Center "Digital Transportation Models and Energy Saving Technologies" (NTs "CMPE"), JSC "VNIIZHT"

Anatoliy A. GAVRILENKOV,

Cand. Sci. (Econ.), Head of the Laboratory "Technical and Economic Assessment of Scientific and Technical Projects", FGAOU VO "RUT" (MIIT)

Ayrat M. NASYBULLIN,

Assistant, Department "Transport Business Management and Intelligent Systems", FGAOU VO "RUT" (MIIT)

Vyacheslav V. SOLOV'EV,

Cand. Sci. (Econ.), Associate Professor, Department "Economics and Management in Construction", FGBOU VO "NIU MGSU"

Received 12.05.2020

Accepted 20.07.2020

For citation: Vakulenko S. P., Romenskiy D. Yu., Mekhedov M. I., Gavrilentov A. A., Nasybullin A. M., Solov'ev V. V. Economic parameters of transportation by "Cold Express" trains on the example of the route Vladivostok—Moscow—St. Petersburg // VNIIZHT Scientific Journal. 2020. 79 (6): 319–326 (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2020-79-6-319-326>.

Проверка адекватности методики генерации случайного процесса возмущения колебаний рельсовых экипажей по импульсной характеристике формирующего фильтра

А. Н. САВОСЬКИН, Н. С. ЛАВЛИНСКАЯ

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет транспорта» (ФГАОУ ВО «РУТ» (МИИТ)), Москва, 127994, Россия

Аннотация. Обычно для исследования колебаний рельсовых экипажей в качестве возмущения принимают эквивалентную геометрическую неровность пути, полученную в результате обработки записей путеизмерительного вагона. Такая запись содержит определенный набор длин волн неровностей, например: 50, 25 и 12,5 м. Однако при ее использовании для имитации возмущений при различных скоростях движения этим длинам волн будут соответствовать частоты, зависящие от заданной скорости движения, что недопустимо, так как для возбуждения колебаний всех тел, входящих в состав экипажа, необходим стабильный диапазон частот от 0,2 до 10 Гц. Для исключения этого недостатка в ранее опубликованных работах предлагалось выполнять генерацию случайного процесса геометрической неровности для заданной скорости движения, изменяя набор длин волн, входящих в состав неровности.

В настоящей работе на основе исследования случайных колебаний упрощенной модели рельсового экипажа как системы с одной степенью свободы произведена проверка адекватности методики генерации случайного процесса возмущения, выполненная двумя способами. В первом способе установлено, что характеристики случайных колебаний такой модели, полученные во временной области на основе численного интегрирования уравнения движения при задании сгенерированного возмущения, имеют удовлетворительную сходимость с аналогичными характеристиками, найденными частотным методом по формуле Шеннона. Во втором способе проверки по сгенерированной реализации возмущения и полученной численным интегрированием реализации процесса колебаний были определены взаимная корреляционная функция и взаимная спектральная плотность между возмущением и колебаниями подпрыгивания. Затем по методике идентификации динамической системы были найдены экспериментальные амплитудная и фазовая частотные характеристики, которые показали удовлетворительную сходимость с соответствующими расчетными характеристиками, полученными при численном решении уравнения колебаний исследуемой модели.

На основе полученных результатов был сделан вывод о достаточной адекватности рассмотренной методики генерации случайного процесса возмущения и возможности ее применения для решения задач динамики рельсовых экипажей.

Ключевые слова: генерация случайного процесса возмущения; динамика рельсовых экипажей; корреляционные функции; спектральные плотности; частотные характеристики

Введение. При выполнении расчетов колебаний рельсовых экипажей в качестве функции для за-

дания возмущения, как правило, используют зависимости $\|\vec{\eta}_k(x = vt)\|$ (η_k — кинематическое возмущение, x — координата пути, v — скорость движения, t — время), полученные в результате обработки записей путеизмерительных вагонов (элементы зависят от координаты пути x). Зависимости $\|\vec{\eta}_k(x = vt)\|$ можно рассматривать как четырехмерный дифференцируемый гауссовский эргодический стационарный случайный процесс эквивалентных геометрических вертикальных и горизонтальных неровностей левого и правого рельсов [1, 2]. Для вероятностного описания такого процесса достаточно определить одномерные законы распределения Гаусса $f(\eta_k)$ и корреляционные функции $R_{\eta_k}(\tau)$ или спектральные плотности $G_{\eta_k}(f)$, для которых в [3] обосновано применение следующих аналитических выражений:

$$R_{\eta_k}(\tau) = S_{\eta_k}^2 \sum_{i=1}^p a_i e^{-\alpha_i^2 \tau^2} \cos \beta_i \tau; \quad (1)$$

$$G_{\eta_k}(f) = 2S_{\eta_k}^2 \sqrt{\pi} \sum_{i=1}^p \frac{a_i}{\alpha_i} \left\{ \exp \left[-\frac{(f - \beta_i)^2}{4\alpha_i^2} \right] + \exp \left[-\frac{(f + \beta_i)^2}{4\alpha_i^2} \right] \right\}, \quad (2)$$

где $S_{\eta_k}^2$ — дисперсия k -го процесса неровности; $i = 1, 2, \dots, p$ — количество слагаемых; a_i — доля дисперсии, приходящаяся на i -е слагаемое; α_i — степень затухания; β_i — частота максимума i -й составляющей; τ — сдвиг по времени между ординатами случайного процесса; f — частота возмущения.

Для примера в таблице приведены значения параметров a_i , α_i и β_i [1, табл. 2.1], соответствующие вертикальной эквивалентной геометрической неровности правого рельса $\eta(x)$ и $\eta(t = x/v)$ при скорости движения $v = 50$ м/с (180 км/ч). Кроме того, для частоты β_i указана через дробь и соответствующая длина волны неровности $L_i = 1/\beta_i$. Значения α_i и β_i в Гц вычислены для скорости движения $v = 50$ м/с по формулам

$$\alpha_i = v\alpha_i \text{ и } \beta_i = v\beta_i. \quad (3)$$

Параметры аналитического выражения импульсной характеристики
Parameters of the analytical expression of the impulse response

Номер составляющей i	Доля дисперсии a_i	Процесс $\eta(x)$		Процесс $\eta(t = x/v)$ при $v = 50$ м/с	
		Нормированный коэффициент затухания $\alpha_i, \text{м}^{-1}$	Нормированная частота $\beta_i, \text{м}^{-1}/L, \text{м}$	Нормированный коэффициент затухания $v\alpha_i, \text{Гц}$	Нормированная частота $v\beta_i, \text{Гц}/L, \text{м}$
1	0,010	0,0064	0,0/0,0	0,32	0,0
2	0,200	0,0016	0,02/50,0	0,08	1,0/50,0
3	0,750	0,0056	0,04/25,0	0,28	2,0/25,0
4	0,040	0,0034	0,08/12,5	0,17	4,0/12,5

Как видно из таблицы, в составе корреляционной функции и спектральной плотности процесса $\eta(x)$ присутствуют слагаемые с частотами 0,02; 0,04 и 0,08 м^{-1} , которым соответствуют длины волн 50, 25 и 12,5 м. При скорости движения $v = 50$ м/с этим частотам соответствуют частоты, вычисленные по (3) и равные 1, 2 и 4 Гц, а также те же значения длин волн. Частотный диапазон при $v = 50$ м/с составляет от 1 до 4 Гц, в то время как для исследования колебаний рельсовых экипажей необходим более широкий диапазон от 0,2 до 10 Гц. Такому широкому диапазону соответствуют длины волн $L = v/f$ от 250 до 5 м. Вместе с тем при скорости движения, например, $v = 10$ м/с, диапазону частот от 0,2 до 10 Гц соответствуют длины волн от 50 до 1 м. Таким образом, для исследования колебаний рельсовых экипажей необходимо иметь набор записей $\|\vec{\eta}_k(x = vt)\|$ для различных скоростей движения.

Проще всего данный набор можно получить, генерируя на ЭВМ процессы $\|\vec{\eta}_k(x = vt)\|$ для заданных скоростей движения. Методика такой генерации предложена в [1, 2, 4–7] на основе использования импульсной характеристики формирующего фильтра и интеграла свертки. В этих работах были приведены примеры генерации четырехмерного стационарного случайного процесса возмущения и показана сходимость корреляционных функций и спектральных плотностей исходного и сгенерированного четырехмерного случайного процесса неровностей.

Постановка задачи. В настоящей работе выполнено обоснование адекватности предложенной в [1, 2, 4–7] методики генерации возмущения двумя способами на основе сравнения результатов решения задачи о случайных колебаниях упрощенной одномассовой модели рельсового экипажа во временной и частотных областях.

Во временной области выполнялось численное решение дифференциального уравнения колебаний упрощенной модели рельсового экипажа как системы с одной степенью свободы. При этом в качестве возмущения задавалась реализация вертикальной неровности $\eta(x = vt)$ со спектральной плотностью $G_\eta(f)$

по выражению (2) для скорости движения $v = 50$ м/с со значениями параметров, приведенными в таблице. В результате численного решения была получена реализация процесса колебаний подпрыгивания $z(t)$, по которой определялась односторонняя спектральная плотность $G_z(f)$, а также двухсторонняя взаимная спектральная плотность $\Phi_{z-\eta}(jf)$ между возмущением $\eta(t = x/v)$ и колебаниями $z(t)$ [3]. В частотной области выполнялось определение спектральной плотности колебаний подпрыгивания $G_z(f)$ по частотной характеристике системы и спектральной плотности возмущения $G_\eta(f)$.

Первый способ проверки адекватности рассматриваемой методики генерации случайного процесса возмущения состоял в оценке степени сходимости спектральных плотностей $G_z(f)$, полученных по результатам решения во временной и в частотной областях. В отличие от этого, второй способ проверки адекватности состоял в оценке сходимости амплитудной и фазовой частотных характеристик исследуемой системы, найденных по результатам численного решения дифференциального уравнения колебаний из графиков взаимной двухсторонней спектральной плотности $\Phi_{z-\eta}(jf)$, а также полученных непосредственно из дифференциального уравнения колебаний, записанного в частотной области.

Задание параметров модели и генерация случайного процесса возмущения. Уравнения колебаний упрощенной модели как системы с одной степенью свободы (рис. 1) при действии кинематического возмущения $\eta(x = vt)$ можно записать в виде [3, 8]:

$$m\ddot{z} + \beta\dot{z} + \kappa z = \beta\dot{\eta} + \kappa\eta. \quad (4)$$

Исследование колебаний подпрыгивания $z(t)$ выполнялось для скорости движения $v = 50$ м/с при следующих значениях параметров: масса $m = 23\,000 \text{ Н} \cdot \text{с}^2/\text{м}$, жесткость $\kappa = 2\,200\,000 \text{ Н/м}$ и коэффициент затухания гидравлического гасителя колебаний $\beta = 30\,000 \text{ Н} \cdot \text{с}/\text{м}$.

При этом кинематическое возмущение $\eta(t = x/v)$ задавалось в виде одномерного стационарного случайного процесса, сгенерированного с помощью формирующего механизма (рис. 2). Эту схему можно рассматривать как упрощенный вариант схемы формирующего фильтра, приведенной в [1, 2, 4] для генерации многомерного случайного процесса.

В соответствии с рис. 2 генератор белого шума (ГШ) формирует последовательность дискретных случайных чисел $y(lT)$, распределенных по нормальному закону с нулевым математическим ожиданием. (Здесь $T = 0,01 \text{ с}$ — шаг временной дискретизации для скорости движения $v = 50$ м/с; $l = 0, 1, 2, \dots, N$ ($N = 8000$) — количество шагов.) Каждое число этой последовательности в следующем звене умножается на импульсную характеристику формирующего фильтра $k_\Phi(\tau)$,

и в результате имеем подынтегральное выражение $u(IT) = y(IT) \times k_\phi(IT)$. При этом $k_\phi(IT)$ определяется [1, 2] по формуле, аналогичной (1), со значениями коэффициентов a_i , α_i и β , приведенными в таблице:

$$k_\phi\{IT\} = S_\phi \sum_i a_i \exp[-\alpha_i^2(IT)^2] \cos(\beta_i IT); \quad (5)$$

$$(l = 1, 2, \dots, N).$$

где S_ϕ — среднеквадратическое отклонение генерируемого случайного процесса возмущения.

После замены переменных произведение $u(t, \tau) = k_\phi[(l - l_\tau)T]y(l_\tau T)$ поступает на блок, вычисляющий значения случайного процесса возмущения $\eta(IT)$ на основе интеграла свертки:

$$\eta(IT) = \int_0^\infty k_\phi[(l - l_\tau)T]y(l_\tau T)dl_\tau, \quad (6)$$

где l_τ — сдвиг между значениями аргументов.

$$l_\tau = 0, 1, 2, \dots, (0, 1 - 0, 25N).$$

График импульсной характеристики формирующего фильтра $k_\phi(\tau)$, рассчитанный для $v = 50$ м/с (рис. 3, кривая 1), имеет ряд составляющих, его значение ($k_\phi(0) = 1,9$ мм) равно принятой величине среднеквадратического отклонения случайного процесса возмущения $\eta(IT)$, а время затухания этой функции составляет 4 с. Реализация случайного процесса возмущения $\eta(IT)$, сгенерированная рассмотренным способом (рис. 2), показывает (рис. 4), что этот процесс отличается стабильным разбросом своих мгновенных значений относительно нулевого среднего значения, что свидетельствует о его стационарности [9]. Полученная реализация была использована в качестве возмущения для исследования вертикальных колебаний упрощенной модели экипажа, описываемых уравнением (4), при его движении по рельсовому пути со скоростью $v = 50$ м/с.

Первый способ проверки адекватности методики генерации случайного процесса возмущения. Этот способ основан на сравнении решений дифференциального уравнения колебаний во временной и частотной областях. Решение уравнения (4) было выполнено в программном пакете MatLab—Simulink [10, 11]. Для этого уравнение (4) было преобразовано к виду

$$\ddot{z} = \frac{1}{m}(-\beta\dot{z} - \kappa z + \beta\dot{\eta} + \kappa\eta) \quad (7)$$

и представлено в виде блок-схемы программы решения этой задачи (рис. 5).

Сгенерированный процесс возмущения поступает из блока From Workspace непосредственно из тела программы MatLab. На вход модели стационарный случайный процесс возмущения подается в виде суммы $\beta\dot{\eta} + \kappa\eta$, для чего неровность и найденная в блоке $\Delta u / \Delta t$ ее производная умножаются на соответствующие значения κ и β в блоках-усилителях K5 и K4

Рис. 1. Модель экипажа как системы с одной степенью свободы:

m — масса; κ — жесткость; β — коэффициент затухания гидравлического гасителя колебаний; v — скорость; η — кинематическое возмущение

Fig. 1. Model of the carriage as a system with single degree of freedom:

m — mass; κ — rigidity; β — damping coefficient of the hydraulic vibration damper; v — speed; η — kinematic disturbance

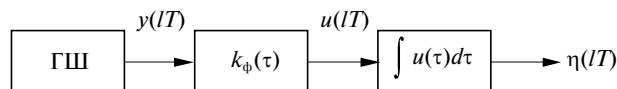
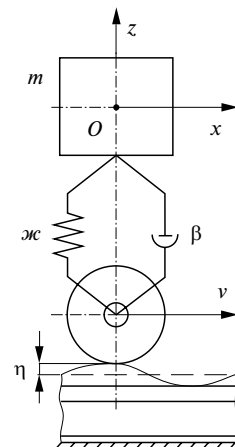


Рис. 2. Структурная схема формирующего механизма для генерации одномерного стационарного случайного процесса во временной области:

ГШ — генератор белого шума; $y(IT)$ — последовательность дискретных случайных чисел; $k_\phi(\tau)$ — импульсная характеристика формирующего фильтра; $u(IT)$ — произведение последовательности дискретных случайных чисел и импульсной характеристики формирующего фильтра; $\int u(\tau)d\tau$ — интеграл свертки; $\eta(IT)$ — случайный процесс возмущения

Fig. 2. Block diagram of the forming mechanism for generating a one-dimensional stationary random process in the time domain: ГШ — white noise generator; $y(IT)$ — sequence of discrete random numbers; $k_\phi(\tau)$ — impulse response of the shaping filter; $u(IT)$ — product of a sequence of discrete random numbers and the impulse response of the shaping filter; $\int u(\tau)d\tau$ — convolution integral; $\eta(IT)$ — random process of indignation

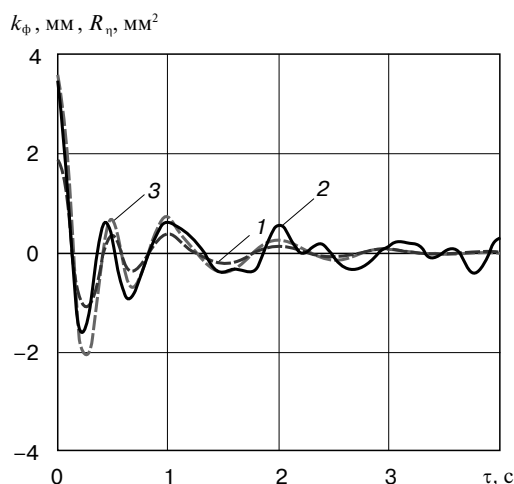


Рис. 3. Импульсная характеристика формирующего фильтра $k_\phi(\tau)$ (кривая 1) и корреляционные функции неровностей $R_\eta(\tau)$, вычисленные по формуле (8) (кривая 2) и по аналитическому выражению (1) для скорости 50 м/с (кривая 3)

Fig. 3. Impulse response of the shaping filter $k_\phi(\tau)$ (curve 1) and the correlation functions of irregularities $R_\eta(\tau)$, calculated by the formula (8) (curve 2) and by the analytical expression (1) for a speed of 50 m/s (curve 3)

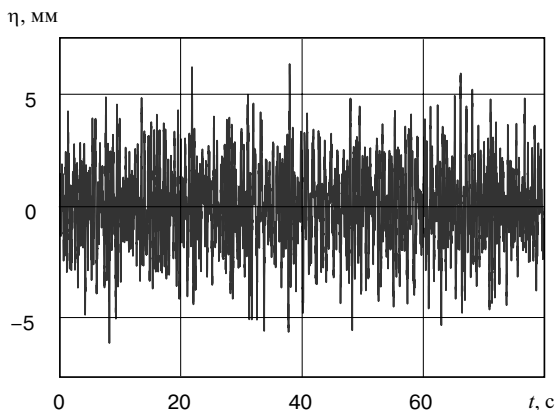


Рис. 4. Сгенерированная реализация вертикальных неровностей $\eta(t)$ для системы с одной степенью свободы при скорости движения 50 м/с
Fig. 4. Generated realization of vertical irregularities $\eta(t)$ for a system with single degree of freedom at a speed of 50 m/s

соответственно. Сигнал на выходе сумматора представляет собой ускорение $\ddot{z}$. После первого интегрирования этого сигнала в блоке И1 получаем скорость $\dot{z}$, а после второго интегрирования в блоке И2 получаем координату z , которые умножаются на соответствующие значения α и β в блоках К2 и К3 для добавления в сумматор Сумм1 слагаемых $-\alpha z$ и $-\beta \dot{z}$. Начальные условия можно задать в блоке НУ. В данном случае начальные условия были приняты нулевыми.

Решение дифференциального уравнения (7) в соответствии с блок-схемой рис. 5 по заданной реализации стационарного случайного процесса возмущения $\eta(IT)$ (рис. 4) было выполнено численным интегрированием с помощью метода Рунге—Кутты IV порядка. В результате такого решения была получена реализация случайного процесса вертикальных колебаний $z(IT)$ (рис. 6), которая тоже отличается стабильным

разбросом мгновенных значений относительно нулевого среднего значения, что также свидетельствует о его стационарности.

Для полученных реализаций стационарных случайных процессов $\eta(IT)$ и $z(IT)$ был выполнен их корреляционный и спектральный анализ [12–15] в предположении об эргодичности этих процессов. При этом автокорреляционные функции этих процессов $R_\eta(\tau)$ и $R_z(\tau)$ определялись по формулам

$$R_x[kT] = \frac{1}{(N-s)T} \sum_{k=1}^{N-s} x[lT]x[(l+k)T], \quad (8)$$

где $kT = \tau$ — сдвиг по времени между значениями реализации; N — количество значений неровностей; s — максимальный сдвиг; $sT = (0,1 \div 0,25)NT$ — максимально допустимая величина этого сдвига.

Спектральные плотности $G_\eta(f)$ и $G_z(f)$ вычислялись через автокорреляционные функции на основе формулы

$$G_x(f) = 2 \int_0^{\tau_6} R_x(\tau) \cos 2\pi f \tau d\tau \text{ по способу трапеций:} \\ G_x(f) = 2T \left[\frac{R_x(\tau_0) \cos(2\pi f \tau_0) + R_x(\tau_6) \cos(2\pi f \tau_6)}{2} + \right. \\ \left. + \sum_{i=1}^{\tau_6/T-1} R_x(\tau_i) \cos(2\pi f \tau_i) \right], \quad (9)$$

где τ_6, τ_i — наибольший и текущий сдвиг соответственно; $R_x(\tau_0)$ равно дисперсии: $R_x(\tau_0) = R_x(0) = S_x^2$.

Графики $R_\eta(\tau)$ (рис. 3, кривая 2) и $G_\eta(f)$ (рис. 7) показывают, что эти характеристики содержат ряд слагаемых, определяемых аналитическим выражением импульсной характеристики (5).

В нуле автокорреляционная функция (рис. 3, кривая 2) равна дисперсии случайного процесса и квадрату значения импульсной характеристики в нуле

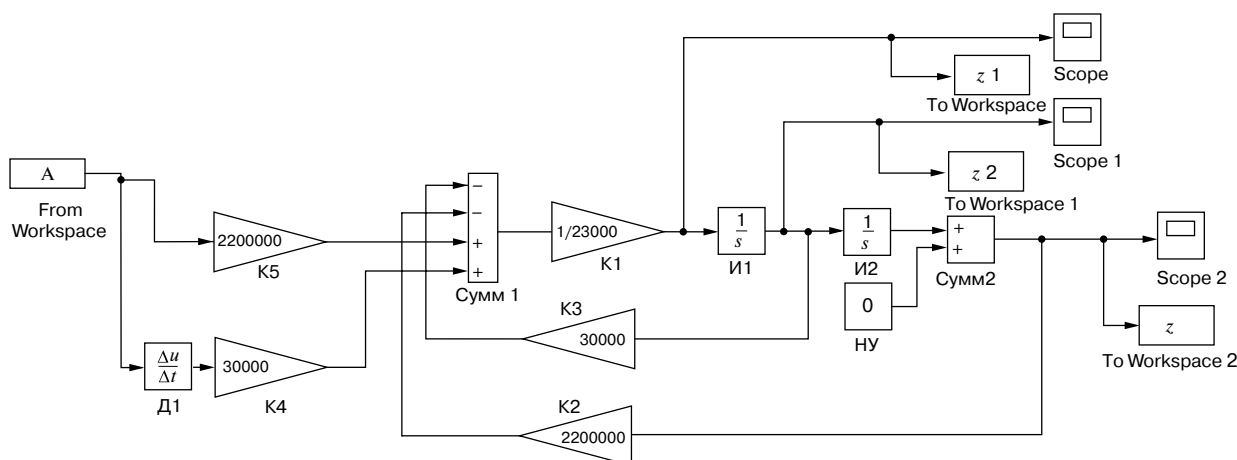


Рис. 5. Блок-схема программы решения уравнения (3) в пакете MatLab—Simulink:
K1–K5 — усилители; И1 и И2 — интеграторы; Сумм1 и Сумм2 — сумматоры; Д1 — дифференциатор; НУ — начальные условия
Fig. 5. Block diagram of the program for solving equation (3) in the MatLab package — Simulink:
K1–K5 — amplifiers; И1 и И2 — integrators; Сумм1 и Сумм2 — adders; Д1 — differentiator; НУ — initial conditions

$R_{\eta}(0) = k_{\phi}^2(0) = 3,61 \text{ мм}^2$. Отметим также, что автокорреляционная функция быстро затухает; это обеспечивает выполнение условия эргодичности:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |R_x(\tau)| d\tau < \infty. \quad (10)$$

Кроме того, $R_{\eta}(\tau)$ на этом рисунке отличается некоторой изрезанностью, вызванной погрешностями решения, а также обработки результатов, но практически повторяет график квадрата импульсной характеристики.

На графике спектральной плотности (рис. 7, кривая 1) наглядно видны все три слагаемых импульсной характеристики $k_{\phi}(\tau)$, которым соответствуют максимумы $G_{\eta}(f)$ на частотах $f_1 = 0,96 \text{ Гц}$, $f_2 = 2,0 \text{ Гц}$ и $f_3 = 4,0 \text{ Гц}$ или на длинах волн $L_{\text{в}1} = v/f_1$, равных $L_{\text{в}1} \sim 50 \text{ м}$, $L_{\text{в}2} = 25 \text{ м}$ и $L_{\text{в}3} = 12,5 \text{ м}$. Остальные максимумы в графике $G_z(f)$ являются следствием погрешностей спектрального анализа и могут быть устранены фильтрацией спектральной плотности — см., например, [13].

Графики $R_{\eta}(\tau)$ и $G_{\eta}(f)$ можно аппроксимировать аналитическими выражениями (1) и (2), соответствующими дифференцируемыми случайным процессам со значениями параметров a_i , α_i и β_i , приведенными в таблице.

Графики аналитических выражений (1) и (2), приведенные на рис. 3 (кривая 3) и рис. 7 (кривая 2), показывают удовлетворительную сходимость с графиками, построенными по формулам (8) и (9) для сгенерированной реализации случайного процесса $\eta(IT)$. Кроме того, график $R_{\eta}(\tau)$, построенный по (1), в точности равен квадрату импульсной характеристики.

По реализации случайного процесса $z(IT)$ также были найдены автокорреляционная функция $R_z(\tau)$ и спектральная плотность $G_z(f)$ (рис. 8). Как видно из этого рисунка, на графике $G_z(f)$ имеются три максимума на частотах $f_1 = 0,98 \text{ Гц}$, $f_2 = 1,6 \text{ Гц}$ и $f_3 = 2,0 \text{ Гц}$. Первый и третий из них соответствуют максимумам возмущения, приходящимся на такие же частоты или длины волн возмущения $L_{\text{в}1} \sim 50 \text{ м}$ и $L_{\text{в}2} = 25 \text{ м}$. Второй максимум при $f_2 = 1,6 \text{ Гц}$ приходится на собственную частоту колебаний системы $f_c = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mathcal{M}}{m}} \approx 1,6 \text{ Гц}$.

Отметим также, что максимум на частоте возмущения $4,0 \text{ Гц}$ в спектральной плотности колебаний $G_z(f)$ не проявился из-за «фильтрующих» свойств системы.

Проверка адекватности данного решения во временной области была выполнена на основе сравнения полученных результатов с результатами решения уравнения (4) в частотной области. Для этого была использована формула Шеннона, позволяющая найти спектральную плотность $G_z(f)$ решения уравнения (4) по амплитудной частотной характеристике (АЧХ) системы $A_{z-\eta}(f)$ и спектральной плотности возмущения $G_{\eta}(f)$:

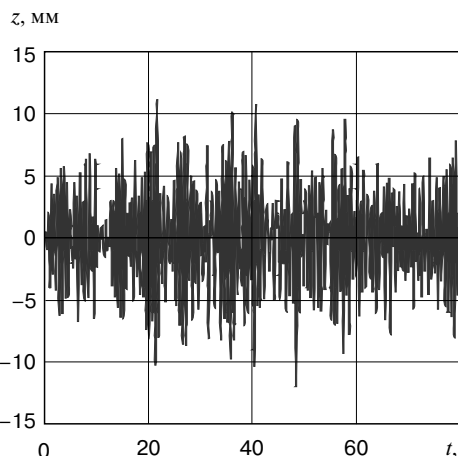


Рис. 6. Реализация случайного процесса колебаний подпрыгивания $z(t)$ упрощенной модели рельсового экипажа
Fig. 6. Realization of random process of bouncing oscillations $z(t)$ of simplified model of rail carriage

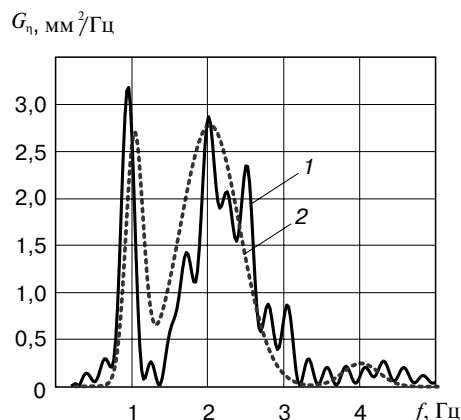


Рис. 7. Спектральная плотность стационарного случайного процесса возмущения $G_{\eta}(f)$: 1 — для сгенерированного процесса; 2 — по аналитическому выражению (2)
Fig. 7. Spectral density of a stationary random process of disturbance $G_{\eta}(f)$: 1 — for the generated process; 2 — by analytical expression (2)

$$G_z(f) = A_{z-\eta}^2(f) G_{\eta}(f). \quad (11)$$

Вывод аналитического выражения для АЧХ системы приведен ниже — см. формулу (12).

График спектральной плотности $G_z(f)$, построенный по формуле (11) (рис. 8, б, кривая 2), имеет удовлетворительную сходимость с аналогичным графиком, построенным по результатам численного интегрирования (рис. 8, б, кривая 1). На этом графике, полученном по результатам расчетов в частотной области, максимумы приходятся на те же частоты $f_1 = 0,98 \text{ Гц}$, $f_2 = 1,6 \text{ Гц}$ и $f_3 = 2,0 \text{ Гц}$, что были отмечены в графике $G_z(f)$, полученном по результатам численного интегрирования.

Это свидетельствует об адекватности предложенной методики генерации стационарного случайного

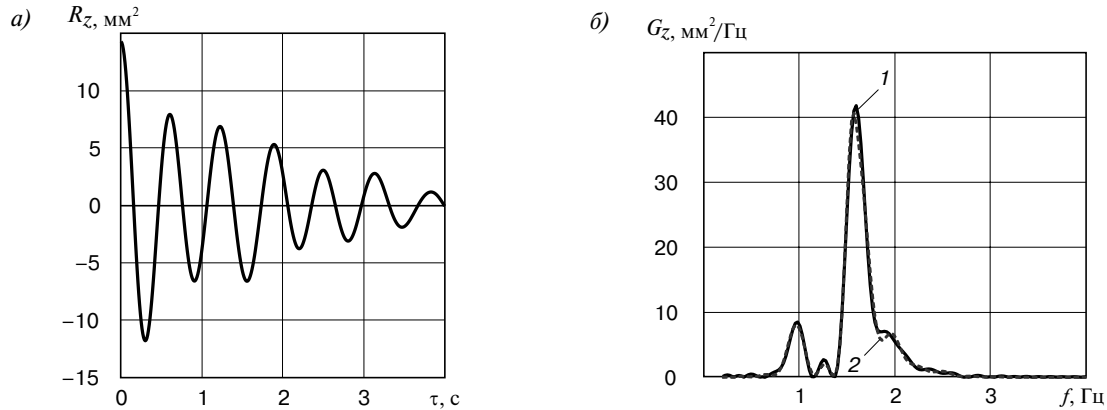


Рис. 8. Автокорреляционная функция $R_z(\tau)$ (а) и спектральная плотность $G_z(f)$ (б) стационарного случайного процесса колебаний подпрыгивания упрощенной модели: 1 — по результатам численного интегрирования; 2 — по результатам расчета в частотной области
Fig. 8. Autocorrelation function $R_z(\tau)$ (a) and spectral density $G_z(f)$ (b) of the stationary random process of bouncing oscillations of the simplified model: 1 — based on the results of numerical integration; 2 — according to the results of the calculation in the frequency domain

процесса с помощью формирующего механизма (рис. 2), использующего импульсную характеристику (5).

Второй способ проверки адекватности методики генерации случайного процесса возмущения. Выполним проверку адекватности используемой методики генерации случайного процесса вторым способом, найдя «экспериментальные» амплитудную (АЧХ) и фазовую (ФЧХ) частотные характеристики исследуемой системы по результатам численного интегрирования и сравним их с расчетными, полученными из уравнения (4).

Для получения аналитических выражений расчетных АЧХ и ФЧХ запишем уравнение колебаний подпрыгивания (4) в частотной области:

$$(-\omega^2 m + j\omega\beta + \kappa)z(j\omega) = (j\omega\beta + \kappa)\eta(j\omega),$$

где ω — круговая частота, $\omega = 2\pi f$.

Отсюда частотную характеристику $W_{z-\eta}(j\omega)$ определяют как отношение изображений координаты системы к воздействию:

$$W_{z-\eta}(j\omega) = \frac{z(j\omega)}{\eta(j\omega)} = \frac{j\beta\omega + \kappa}{\kappa - \omega^2 m + j\beta\omega}.$$

Разделив это выражение на 2π и на m , преобразуем его к виду

$$W_{z-\eta}(jf) = \frac{j2nff_c + f_c^2}{f_c^2 - f^2 + j2nff_c} = A_{z-\eta}(f)e^{j\varphi_{z-\eta}(f)},$$

где n — относительный коэффициент затухания,

$$n = \frac{\beta}{2\sqrt{m\kappa}}.$$

$A_{z-\eta}(f)$ и $\varphi_{z-\eta}(f)$ — АЧХ и ФЧХ, определяемые по формулам

$$A_{z-\eta}(f) = |W_{z-\eta}(jf)| = \frac{\sqrt{f_c^2 + 4n^2 f_c^2 f^2}}{\sqrt{(f_c^2 - f^2)^2 + 4n^2 f_c^2 f^2}}, \quad (12)$$

$$\varphi_{z-\eta}(f) = \begin{cases} -\arctg \frac{2nf^3}{f_c(f_c^2 - f^2 + 4n^2 f^2)} & \text{при } f < f_c; \\ -\arctg \frac{2nf^3}{f_c(f_c^2 - f^2 + 4n^2 f^2)} - \pi & \text{при } f > f_c. \end{cases} \quad (13)$$

Для того чтобы найти экспериментальные АЧХ и ФЧХ, определим дополнительно взаимные корреляционную функцию $R_{z-\eta}(\tau)$ и двухстороннюю спектральную плотность $\Phi_{z-\eta}(jf)$ между сгенерированной реализацией возмущения $\eta(nT)$ (рис. 4) и реализацией колебаний подпрыгивания $z(nT)$ (рис. 6), характеризующие взаимосвязи между этими координатами.

Взаимная корреляционная функция $R_{z-\eta}(\tau)$ аналогично автокорреляционной $R_x(\tau)$ (8) определяется по формуле

$$R_{z-\eta}[kT] = \frac{1}{(N-s)T} \sum_{k=1}^{N-s} \eta[lT]z[(l+k)T]. \quad (14)$$

График $R_{z-\eta}(\tau)$ (рис. 9), где $\tau = kT$, показывает, что эта функция содержит ряд затухающих слагаемых. Ее максимум, равный произведению $S_z S_\eta$, сдвинут относительно $\tau = 0$ на величину $\tau_c = 0,5$ с (S_z, S_η — среднеквадратические отклонения колебаний подпрыгивания и возмущения соответственно).

Взаимная спектральная плотность $\Phi_{z-\eta}(jf)$ является комплексной функцией частоты и определяется в диапазоне частот от $-\infty$ до $+\infty$ как

$$\begin{aligned} \Phi_{z-\eta}(jf) &= \int_{-\infty}^{+\infty} R_{z-\eta}(\tau) \cos(2\pi f\tau) d\tau - \\ &- j \int_{-\infty}^{+\infty} R_{z-\eta}(\tau) \sin(2\pi f\tau) d\tau = \text{Re} \Phi_{z-\eta}(jf) + \\ &+ j \text{Im} \Phi_{z-\eta}(jf) = \Phi_{z-\eta}^A(f) \exp[j\Phi_{z-\eta}^p(f)]. \end{aligned} \quad (15)$$

В это выражение входят следующие составляющие:

- вещественная (синфазная)

$$\operatorname{Re} \Phi_{z-\eta}(jf) = \int_{-\infty}^{+\infty} R_{z-\eta}(\tau) \cos(2\pi f \tau) d\tau,$$

характеризующая взаимосвязь между процессами возмущения и колебаний в фазе между ними;

- мнимая (квадратурная)

$$\operatorname{Im} \Phi_{z-\eta}(jf) = \int_{-\infty}^{+\infty} R_{z-\eta}(\tau) \sin(2\pi f \tau) d\tau,$$

характеризующая взаимосвязь между процессами возмущения и колебаний в противофазе между ними;

- амплитудная

$$\Phi_{z-\eta}^A(f) = \sqrt{\operatorname{Re}^2 \Phi_{z-\eta}(jf) + \operatorname{Im}^2 \Phi_{z-\eta}(jf)};$$

- фазовая

$$\Phi_{z-\eta}^\varphi(f) = \arctg[\operatorname{Im} \Phi_{z-\eta}(jf) / \operatorname{Re} \Phi_{z-\eta}(jf)],$$

характеризующие связи между амплитудами и фазами рассматриваемых процессов.

Графики этих составляющих (рис. 10) также имеют ряд особенностей. Так, например, в графике амплитудной спектральной плотности $\Phi_{z-\eta}^A(f)$ имеются явно

$R_{z-\eta}$, мм²

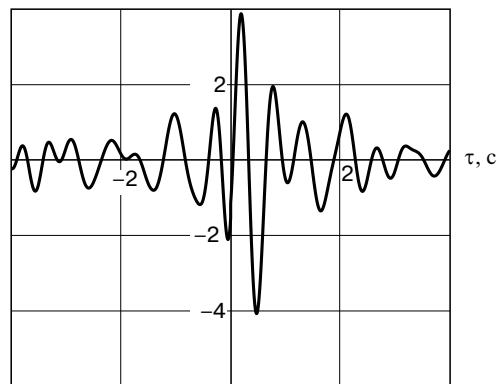


Рис. 9. Взаимная корреляционная функция между возмущением и колебаниями подпрыгивания $R_{z-\eta}(\tau)$ упрощенной модели экипажа
Fig. 9. Cross-correlation function between disturbance and bouncing oscillations $R_{z-\eta}(\tau)$ of the simplified carriage model

выраженные максимумы, приходящиеся на частоты $f_1 = 0,98$ Гц, $f_2 = 1,6$ Гц и $f_3 = 2,0$ Гц.

График фазовой составляющей $\Phi_{z-\eta}^\varphi(f)$ изменяется в пределах от 180° до -180° с резкими переходами вблизи собственной частоты колебаний $f_c \approx 1,6$ Гц и отличается более значительной изрезанностью, чем графики других составляющих $\Phi_{z-\eta}(jf)$.

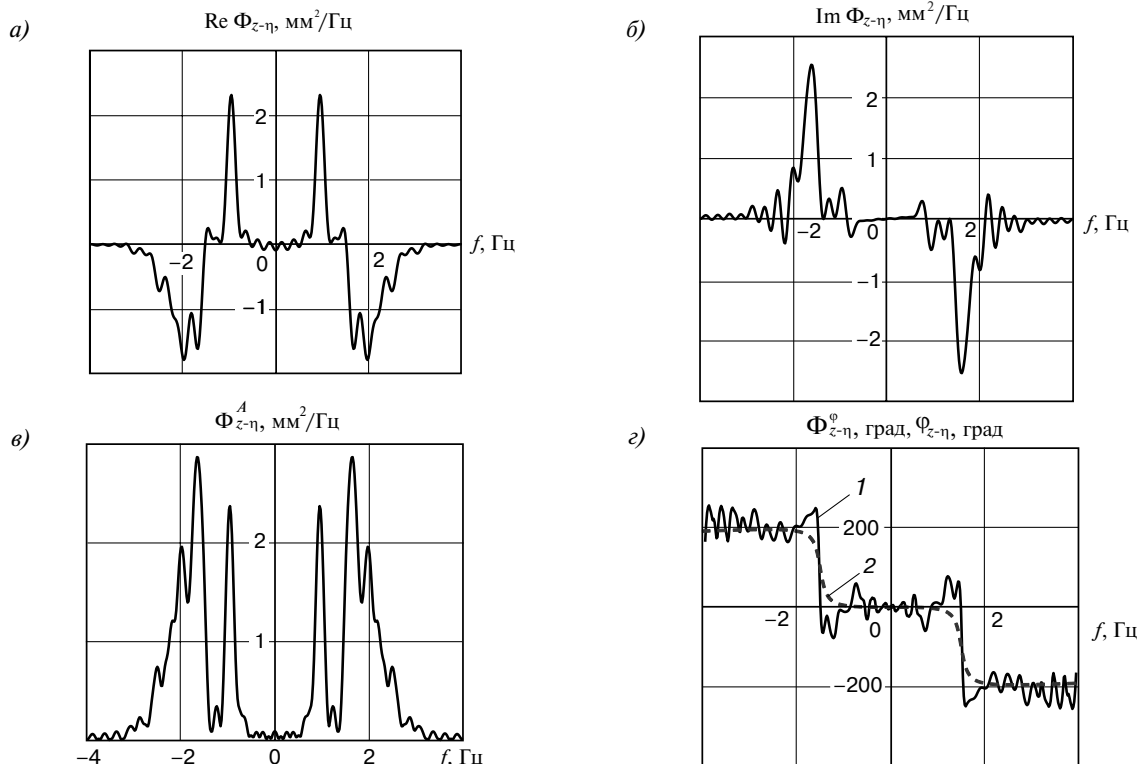


Рис. 10. Составляющие взаимной спектральной плотности между возмущением и колебаниями подпрыгивания упрощенной модели: а — вещественная $\operatorname{Re} \Phi_{z-\eta}(f)$; б — мнимая $\operatorname{Im} \Phi_{z-\eta}(f)$; в — амплитудная $\Phi_{z-\eta}^A(f)$; з — фазовая $\Phi_{z-\eta}^\varphi(f)$ (кривая 1) и расчетный график ФЧХ $\varphi_{z-\eta}(f)$ (кривая 2)

Fig. 10. Components of the mutual spectral density between the disturbance and the bouncing oscillations of the simplified model: а — real $\operatorname{Re} \Phi_{z-\eta}(f)$; б — imaginary $\operatorname{Im} \Phi_{z-\eta}(f)$; в — amplitude $\Phi_{z-\eta}^A(f)$; з — phase $\Phi_{z-\eta}^\varphi(f)$ (curve 1) and calculated phase-frequency characteristic $\varphi_{z-\eta}(f)$ (curve 2)

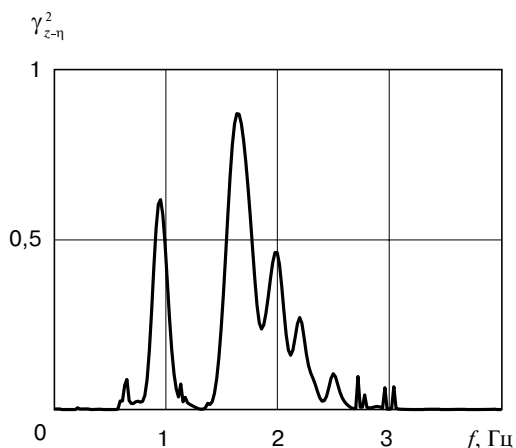


Рис. 11. Функция когерентности возмущения и колебаний $\gamma_{z-\eta}^2(f)$ системы с одной степенью свободы
Fig. 11. Coherence function of disturbance and oscillations $\gamma_{z-\eta}^2(f)$ of a system with single degree of freedom

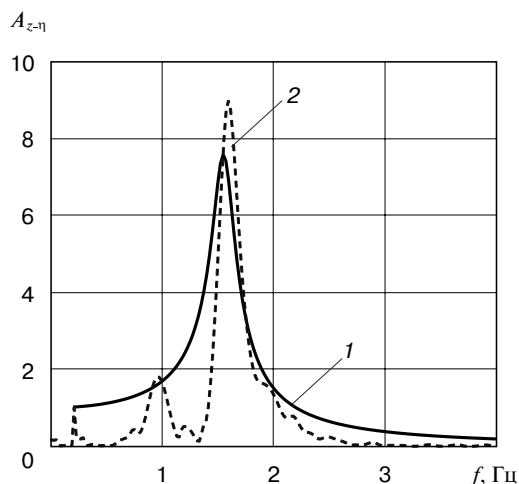


Рис. 12. АЧХ колебаний подпрыгивания $A_{z-\eta}(f)$ рельсового экипажа как системы с одной степенью свободы:
1 — расчетный график по формуле (12); 2 — экспериментальный график по формуле (19)
Fig. 12. Amplitude-frequency characteristic of bouncing oscillations $A_{z-\eta}(f)$ of a rail vehicle as a system with single degree of freedom:
1 — calculated graph according to formula (12); 2 — experimental graph according to the formula (19)

По нормированной амплитудной составляющей взаимной спектральной плотности, называемой функция когерентности $\gamma_{z-\eta}^2(f)$, можно оценить степень взаимосвязи между процессами возмущений и колебаний [3, с. 59–60]:

$$\gamma_{z-\eta}^2(f) = [G_{z-\eta}^A(f)]^2 / [G_z(f)G_\eta(f)]. \quad (16)$$

Функция $\gamma_{z-\eta}^2(f)$ изменяется в пределах от 0 до 1. При $0,5 < \gamma_{z-\eta}^2(f) < 1$ связь между координатами $\eta(t)$ и $z(t)$ будет достаточно тесной в соответствующем диапазоне частот. Если при каком-либо значении частоты $\gamma_{z-\eta}^2(f) = 1$, то колебания координаты $z(t)$ полностью определяются процессом $\eta(t)$. Отметим также, что од-

носторонняя спектральная плотность $G_{z-\eta}^A(f)$, входящая в (16), выражается через двухстороннюю $\Phi_{z-\eta}^A(f)$ как

$$G_{z-\eta}^A(f) = 4\Phi_{z-\eta}^A(f). \quad (17)$$

График функции когерентности (рис. 11) показывает, что значение $\gamma_{z-\eta}^2(f) > 0,5$ лежит в диапазонах частот 0,9–1 Гц и 1,55–1,8 Гц. Близкой к выполнению этого условия является и частота 2 Гц. Следовательно, связь между координатами $\eta(t)$ и $z(t)$ в этих диапазонах частот является достаточно тесной, т. е. можно считать, что колебания подпрыгивания массы m в этих диапазонах частот полностью вызываются действующим возмущением.

Колебания на частотах свыше 2 Гц интенсивно «подавляются» системой (рис. 8, б), а низкий уровень $\gamma_{z-\eta}^2(f)$ на частотах $f < 1$ Гц объясняется недостаточным уровнем возмущения в первом диапазоне частот, так как этому диапазону соответствует доля дисперсии $a_1 = 0,010$.

По взаимной спектральной плотности (15) можно найти комплексно-сопряженную частотную характеристику (ЧХ) линейной динамической системы $W_{z-\eta}(-jf)$, т. е. выполнить процедуру идентификации этой системы:

$$W_{z-\eta}(-jf) = \frac{\Phi_{z-\eta}(jf)}{\Phi_\eta(f)}. \quad (18)$$

Представим в этом выражении ЧХ через расчетные амплитудную $A_{z-\eta}(f)$ (12) и фазовую $\varphi_{z-\eta}(f)$ (13) ЧХ, а взаимную спектральную плотность через амплитудную $\Phi_{z-\eta}^A(f)$ и фазовую $\Phi_{z-\eta}^\varphi(f)$ взаимные спектральные плотности, тогда

$$A_{z-\eta}(f)e^{-j\varphi_{z-\eta}(f)} = \frac{\Phi_{z-\eta}^A(f)\exp[j\Phi_{z-\eta}^\varphi(f)]}{\Phi_\eta(f)}.$$

Отсюда можно записать

$$A_{z-\eta}(f) = \frac{\Phi_{z-\eta}^A(f)}{\Phi_\eta(f)} \text{ и } \varphi_{z-\eta}(f) = -\Phi_{z-\eta}^\varphi(f) \quad (19)$$

или

$$A_{z-\eta}(f) = A_\eta(f) \text{ и } \varphi_{z-\eta}(f) = \varphi_\eta(f),$$

где $A_\eta(f)$ и $\varphi_\eta(f)$ — экспериментальные АЧХ и ФЧХ, определяемые из (19) по амплитудной и фазовой составляющим взаимной спектральной плотности между $\eta(t)$ и $z(t)$.

Графики $A_\eta(f)$ и $\varphi_\eta(f)$ (рис. 10, а и рис. 12) были сопоставлены с расчетными графиками АЧХ и ФЧХ обобщенных координат динамической системы $A_p(f) = A_{z-\eta}(f)$ и $\varphi_p(f) = \varphi_{z-\eta}(f)$, построенными по формулам (12) и (13).

Расчетный график $A_p(f)$ (рис. 12, кривая 1) имеет один максимум на частоте, близкой к собственной частоте колебаний $f_c \approx 1,6$ Гц.

При частотах $f > 1,5$ Гц сходимость экспериментального графика $A_\eta(f)$ (рис. 12, кривая 2) с расчетным

$A_p(f)$ можно считать удовлетворительной. Вместе с тем при частотах $f < 1,5$ Гц экспериментальный график $A_s(f)$ имеет значительную изрезанность, и удовлетворительная сходимость с расчетным $A_p(f)$ обеспечивается только в диапазоне частот 1,0–2 Гц. Это объясняется тем, что функция когерентности $\gamma_{z-\eta}^2(f)$ только при частотах, близких к 1,0 и к 1,6 Гц, больше чем 0,5.

График расчетной фазовой частотной характеристики системы $\varphi_p(f)$, построенный по формуле (13), является кососимметричным (рис. 10, з, кривая 2) и изменяется в пределах от 180 до -180° , проходя через ноль. Экспериментальный график $\varphi_s(f)$ (рис. 10, з, кривая 1) отличается некоторой изрезанностью, но в целом имеет удовлетворительную сходимость с расчетным графиком (кривая 2).

Выводы. 1. Для исследования колебаний рельсовых экипажей необходимо иметь набор реализаций случайного процесса эквивалентных геометрических неровностей пути $\|\tilde{\eta}_k(x=vt)\|$ для различных скоростей движения. Проще всего такой набор можно получить, генерируя на ЭВМ процессы для заданных скоростей движения. Методика такой генерации предложена на основе использования импульсной характеристики формирующего фильтра и интеграла свертки.

2. Установлено, что характеристики случайных колебаний упрощенной модели, полученные во временной области на основе численного интегрирования уравнения движения при задании сгенерированного возмущения, имеют удовлетворительную сходимость с аналогичными характеристиками, найденными частотным методом по формуле Шеннона.

3. На основе методики идентификации динамической системы были найдены экспериментальные амплитудная и фазовая частотные характеристики, которые показали удовлетворительную сходимость с соответствующими расчетными характеристиками, полученными на основе уравнения колебаний исследуемой модели.

4. Предложенная методика генерации стационарного дифференцируемого случайного процесса эквивалентных геометрических неровностей пути обеспечивает достаточную адекватность получаемых результатов и может быть рекомендована для генерации одномерных и многомерных случайных процессов возмущения в задачах динамики рельсовых экипажей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акишин А.А. Горизонтальные колебания и движение в кривых моторного вагона электропоезда на четырех одноосных тележках с пневмоподвешиванием: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07. М., 2015. 355 с.

Для цитирования: Савоськин А. Н., Лавлинская Н. С. Проверка адекватности способа генерации случайного процесса возмущения колебаний рельсовых экипажей по импульсной характеристике формирующего фильтра // Вестник ВНИИЖТ. 2020. Т. 79. № 6. С. 327–336. DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2020-79-6-327-336>.

2. Савоськин А.Н., Ромен Ю.С., Акишин А.А. Характеристики возмущений, вызывающих колебания рельсовых экипажей // Вестник ВНИИЖТ. 2013. № 6. С. 21–30.

3. Механическая часть тягового подвижного состава: учеб. для вузов ж.-д. транспорта / И.В. Бирюков [и др.]; под ред. И.В. Бирюкова. Репр. воспроизведение издания 1992 г. М.: Альянс, 2013. 440 с.

4. Savoskin A.N., Akishin A.A. The generation of multi-dimensional stochastic process of perturbation in the problems of railways rolling stock dynamics // Computer Modeling and Simulation: тр. Междунар. науч.-техн. конф. (Санкт-Петербург, 2–4 июля 2014 г.). СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2014. С. 135–141.

5. Savoskin A., Akishin A., Yurchenko D. Design of a New Two-Axle Bogie for a High Speed Train Design of a New Two-Axle Bogie for a High Speed Train // Proceedings of the Third International Conference on Railway Technology: Research, Development and Maintenance / J. Pombo (Editor). Stirlingshire (UK): Civil-Comp Press, 2016. P. 85. DOI:10.4203/ccp.110.85.

6. Матвеев И., Шилханек Я. Генератор случайных процессов с заданной матрицей спектральных плотностей // Автоматика и телемеханика. 1960. Т. 21. № 1. С. 29–35.

7. Савоськин А.Н., Поляков А.И. Моделирование эквивалентных неровностей пути для исследования колебаний подвижного состава // Соискатель. 2005. № 1. С. 106–118.

8. Вершинский С.В., Данилов В.Н., Челноков И.И. Динамика вагона: [учеб. для вузов ж.-д. трансп.]. М.: Транспорт, 1978. 352 с.

9. Конспект лекций по дисциплине «Динамика э. п. с.». Глава 3. Случайные колебания / А.Н. Савоськин [и др.]; под ред. А.Н. Савоськина. М.: МИИТ, 2002. 74 с.

10. Потемкин В.Г. Вычисления в среде MATLAB. М.: Диалог-МИФИ, 2004. 714 с.

11. Акишин А.А. Применение пакета Matlab—Simulink для моделирования механических колебаний в программно-аппаратном комплексе реального времени // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2013. № 4. С. 145–149.

12. Савоськин А.Н., Ромен Ю.С., Акишин А.А. Случайные процессы возмущения в динамике рельсовых экипажей // Мир транспорта. 2015. № 1. С. 6–15.

13. Бендат Дж., Пирсол А. Измерение и анализ случайных процессов. М.: Мир, 1974. 463 с.

14. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. М.: Высшая школа, 1999. 576 с.

15. Особенности вероятностных характеристик случайных колебаний рельсовых экипажей / А.Н. Савоськин [и др.] // Повышение энергетической эффективности наземных транспортных систем: материалы Междунар. науч.-практ. конф. (Омск, 11–12 дек. 2014 г.) / Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск: ОмГУПС, 2014. С. 314–339.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

САВОСЬКИН Анатолий Николаевич,
д-р техн. наук, профессор, кафедра «Электропоезда и локомотивы», ФГАОУ ВО «РУТ» (МИИТ)

ЛАВЛИНСКАЯ Наталия Сергеевна,
аспирант, кафедра «Электропоезда и локомотивы»,
ФГАОУ ВО «РУТ» (МИИТ)

Статья поступила в редакцию 15.09.2020 г., принята к публикации 09.11.2020 г.

Checking the adequacy of the method for generating a random process of disturbance of oscillations of rail carriages according to the impulse response of the forming filter

A. N. SAVOS'KIN, N. S. LAVLINSKAYA

Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Russian University of Transport" (FGAOU VO "RUT" (MIIT)), Moscow, 127994, Russia

Abstract. Usually, to study the vibrations of rail carriages, the equivalent geometric unevenness of the track obtained as a result of processing the records of the track measuring car is taken as a disturbance. Such a record contains a certain set of irregularity wavelengths, for example, 50, 25 and 12.5 m. However, when it is used to simulate disturbances at different operation speeds, these wavelengths will correspond to frequencies depending on the given speed of motion, which is not permissible, since a stable frequency range from 0.2 to 10 Hz is required to excite the vibrations of all the bodies included in the carriage. To eliminate this drawback, in the previously performed works it was proposed to generate a random process of geometric irregularities for a given operation speed by changing the set of wavelengths included in the irregularities. In this paper, based on the study of random oscillations of a simplified model of a rail carriage, as a system with one degree of freedom, the adequacy of the method for generating a random disturbance process is verified in two ways. In the first method, it was found that the characteristics of random oscillations of such a model, obtained in the time domain on the basis of numerical integration of the equation of motion when specifying the generated disturbance, have satisfactory convergence with similar characteristics found by the frequency method using Shannon's formula. In the second verification method, the cross-correlation function and the mutual spectral density between the disturbance and the bouncing oscillations were determined from the generated disturbance realization and obtained by numerical integration of the vibration process realization. Then, using the method of identifying the dynamic system, experimental amplitude and phase frequency characteristics were found, which showed satisfactory convergence with the corresponding calculated characteristics obtained by numerically solving the equation of oscillations of the model under study. On the basis of the results obtained, it was concluded that the considered method of generating a random process of disturbance is sufficiently adequate and that it can be applied to solve problems of the dynamics of rail carriages.

Keywords: generation of a random process of disturbance; dynamics of rail carriages; correlation functions; spectral densities; frequency characteristics

DOI: <https://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2020-79-6-327-336>

REFERENCES

1. Akishin A. A. *Horizontal vibrations and motion in curves of a motor car of an electric train on four uniaxial bogies with pneumatic suspension*. Cand. tech. sci. diss. Moscow, 2015, 355 p.
2. Savos'kin A. N., Romen Yu. S., Akishin A. A. *Characteristics of disturbances causing oscillations of rail carriages*. Vestnik of the Railway Research Institute, 2013, no. 6, pp. 21–30.
3. Biryukov I. V., Savos'kin A. N., Burchak G. P. et al. *Mechanical part of traction rolling stock*. Textbook for universities of railway transport. Reprintnoe vosproizvedenie izdaniya 1992 g. Moscow, Al'yans Publ., 2013, 440 p.
4. Savos'kin A. N., Akishin A. A. *Generation of multidimensional stochastic process of perturbation in the problems of rail-*

ways rolling stock dynamics. Computer Modeling and Simulation: proc. of the International Scientific and Technical Conference (St. Petersburg, July 2–4, 2014). St. Petersburg, Publishing house of the Polytechnic University, 2014, pp. 135–141.

5. Savos'kin A., Akishin A., Yurchenko D. *Design of a New Two-Axle Bogie for a High Speed Train Design of a New Two-Axle Bogie for a High Speed Train*. Proceedings of the Third International Conference on Railway Technology: Research, Development and Maintenance. Stirlingshire (UK), Civil-Comp Press, 2016, p. 85. DOI:10.4203/ccp.110.85.

6. Matyash I., Shilkhanev Ya. *Generator of random processes with a given matrix of spectral densities*. Avtomatika i telemekhanika, 1960, Vol. 21, no. 1, pp. 29–35.

7. Savos'kin A. N., Polyakov A. I. *Modeling equivalent irregularities of the track for the study of vibrations of rolling stock*. Soiskatel', 2005, no. 1, pp. 106–118.

8. Vershinskiy S. V., Danilov V. N., Chelnokov I. I. *Dynamics of the car*. Textbook for universities of railway transport. Moscow, Transport Publ., 1978, 352 p.

9. Savos'kin A. N., Burchak G. P., Vasil'ev A. P. *Lecture notes for the discipline "Dynamics of EMP". Chapter 3. Random fluctuations*. Moscow, MIIT Publ., 2002, 74 p.

10. Potemkin V. G. *Calculations in the MATLAB environment*. Moscow, Dialog-MIFI Publ., 2004, 714 p.

11. Akishin A. A. *Application of the Matlab—Simulink package for modeling mechanical vibrations in the real-time hardware and software complex*. Scientific and technical statements of the St. Petersburg State Polytechnic University. Computer science. Telecommunications. Management, 2013, no. 4, pp. 145–149.

12. Savos'kin A. N., Romen Yu. S., Akishin A. A. *Random processes of disturbance in the dynamics of rail carriages*. World of Transport and Transportation, 2015, no. 1, pp. 6–15.

13. Bendat Dzh., Pirsol A. *Measurement and analysis of stochastic processes*. Moscow, Mir Publ., 1974, 463 p.

14. Venttsel' E. S. *Probability theory*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1999, 576 p.

15. Savos'kin A. N., Burchak G. P., Nasyrov R. K., Akishin A. A. *Features of the probabilistic characteristics of random oscillations of rail carriages*. Increasing the energy efficiency of ground transport systems: materials of the International Scientific and Practical Conference (Omsk, December 11–12, 2014). Omsk State University of Railway Transport. Omsk, OmGUPS Publ., 2014, pp. 314–339.

ABOUT THE AUTHORS

Anatoliy N. SAVOS'KIN,

Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department "Electric Trains and Locomotives", FGAOU VO "RUT" (MIIT)

Nataliya S. LAVLINSKAYA,

Post-graduate, Department "Electric Trains and Locomotives", FGAOU VO "RUT" (MIIT)

Received 15.09.2020

Accepted 09.11.2020

■ E-mail: lav.nata@mail.ru (N. S. Lavlinskaya)

For citation: Savos'kin A. N., Lavlinskaya N. S. Checking the adequacy of the method for generating a random process of disturbance of oscillations of rail carriages according to the impulse response of the forming filter // VNIIZHT Scientific Journal. 2020. 79 (6): 327–336 (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2020-79-6-327-336>.

Расчет зависимости коэффициента трения композиционных гребневых колодок для локомотивов от силы нажатия и скорости торможения

А.Э. ГАБИДУЛЛИН¹, Д.В. ГОРСКИЙ², И.В. НАЗАРОВ², В.А. НИКИТИН³

¹Общество с ограниченной ответственностью «Локомотивные технологии» (ООО «ЛокоТех»), Москва, 109004, Россия

²Акционерное общество «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (АО «ВНИИЖТ»), Москва, 129626, Россия

³Акционерное общество «Завод фрикционных и термостойких материалов» (АО «ФРИТЕКС»), Ярославль, 150003, Россия

Аннотация. АО «ФРИТЕКС» разработаны безасбестовые гребневые тормозные композиционные колодки UR 01-01 с пониженным коэффициентом трения, которые в отличие от применяемых в настоящее время на локомотивах чугунных гребневых тормозных колодок обладают высокой износостойкостью и более стабильными фрикционными свойствами на высоких скоростях. Они намного легче традиционных чугунных колодок, что обеспечивает уменьшение затрат на логистику и облегчает их замену сервисными подразделениями.

Однако новые материалы, применяемые для производства колодки, а также ее инновационная конструкция, в которой сочетаются два типа материалов, требуют детального исследования ее фрикционных свойств. Для этого было выполнено моделирование режимов торможения локомотива, оборудованного колодками UR 01-01, в натурном узле тормозного механизма на инерционном стенде при фиксированных нажатиях и скоростях. По результатам экспериментов были определены величины коэффициентов трения тормозной колодки и установлена зависимость коэффициента трения колодок от силы нажатия и скорости торможения. Полученные данные использованы в тормозных расчетах для электровоза серии ВЛ80, включающих определение тормозного пути, удержание одиночного локомотива на уклоне стояночным тормозом и обеспечение безюзового торможения в связи с более высокими значениями коэффициента трения колодки UR 01-01 на высоких скоростях. Композиционная гребневая колодка обеспечивает соответствие нормативным значениям показателей длины тормозного пути, безюзового торможения и удержания на уклоне для электровоза серии ВЛ80. При этом применение этих композиционных колодок возможно без изменений в устройстве рычажной передачи электровоза.

Для апробации полученной эмпирической зависимости коэффициента трения новых колодок от силы нажатия и скорости торможения локомотива и ее повсеместного применения в расчетах тормозных систем необходимо проведение ходовых тормозных испытаний.

Ключевые слова: тормозная колодка; трение; эффективность торможения; тормозная композиционная колодка UR 01-01

Состояние вопроса. Применяемые в настоящее время на локомотивах чугунные гребневые тормозные колодки имеют ряд существенных недостатков,

таких как нестабильность коэффициента трения в зависимости от скорости движения, низкая износостойкость и негативное влияние на поверхность катания колес, особенно с увеличением скорости и силы нажатия [1]. С целью устранения указанных недостатков АО «ФРИТЕКС» разработало безасбестовые гребневые тормозные композиционные колодки UR 01-01 с пониженным коэффициентом трения. Данные колодки можно использовать без переделки существующей рычажной передачи.

Действующие нормативные документы устанавливают общие требования к диапазону реализуемого тормозными колодками коэффициента трения пары «колодка—колесо», при этом разброс значений коэффициента достаточно широк [2, 3]. Основные тезисы по проблемам внедрения инновационных фрикционных пар в узле трения «колодка—колесо» приведены в [4].

При выполнении конструкторских работ для всех единиц железнодорожного подвижного состава проводят расчет тормозной системы на эффективность торможения, удержание на уклоне стояночным тормозом и отсутствие юза колесных пар при торможении. Расчет проводят с использованием эмпирических формул, приведенных в правилах тяговых расчетов и определяющих порядок расчета тормозных систем в зависимости от материала колодки, скорости движения и силы нажатия [5, 6]:

$$\varphi_{рч} = 0,6 \frac{1,6K + 100}{8,0K + 100} \frac{v + 100}{5v + 100}; \quad (1)$$

$$\varphi_{рч.в} = 0,52 \frac{1,6K + 20}{5,2K + 20} \frac{v + 100}{5v + 100}; \quad (2)$$

$$\varphi_{рк} = 0,44 \frac{0,1K + 20}{0,4K + 20} \frac{v + 150}{2v + 150}; \quad (3)$$

где $\varphi_{рч}$ — расчетный коэффициент трения для стандартных чугунных колодок; $\varphi_{рч.в}$ — расчетный

коэффициент трения для чугунных колодок с содержанием фосфора 1,0–1,4%; $\varphi_{\text{рк}}$ — расчетный коэффициент трения для композиционных колодок; K — сила нажатия, кН; v — текущая скорость, км/ч.

Следует отметить, что формулы (1), (2), (3) являются эмпирическими, полученными по результатам испытаний, и могут некорректно описывать тормозные свойства колодок, произведенных с использованием новых материалов. Это подтверждает опыт эксплуатации, когда характеристики колодок не всегда обеспечивают требуемые показатели работы тормозной системы железнодорожного подвижного состава (безюзовое торможение, удержание на уклоне и длина тормозного пути [6]), несмотря на соответствие коэффициен-

тов трения нормативной документации [2, 3]. Для решения задачи определения расчетной зависимости коэффициента трения колодки UR 01-01 исследуется трехфакторная модель, т. е. зависимость от материала, мгновенных значений скорости торможения и силы нажатия в процессе торможения.

Постановка задачи. Согласно требованиям нормативно-технической документации, а также в силу установившейся практики, локомотивы, как магистральные, так и маневровые, на пространстве колеи 1520 мм оборудуют чугунными тормозными колодками по ГОСТ 30249–97 [7] с известными свойствами и зависимостью коэффициента трения, приведенной в [5]. Недостатки применения чугунных колодок показаны в [8]. В целях повышения экономической эффективности эксплуатации локомотивного парка в настоящее время активно ведутся работы по внедрению композиционных тормозных колодок с низким коэффициентом трения (как у чугунных колодок), обладающих в 4–5 раз более высокой износостойкостью [9] и значительно более стабильными фрикционными свойствами на высоких скоростях. Кроме того, снижение в 3 раза массы колодки обеспечивает уменьшение затрат на логистику и облегчает замену колодок сервисными подразделениями. При этом колодки должны соответствовать нормативным требованиям и заявляемым характеристикам в широком диапазоне условий эксплуатации: при скорости движения до 160 км/ч, при применении затяжных торможений на спусках и силы нажатия на колодку до 70 кН.

В качестве опытного образца АО «ФРИТЕКС» разработало безасбестовые гребневые тормозные композиционные колодки UR 01-01, состоящие из специальной композиции и твердой вставки из стандартного чугуна и обладающие низким коэффициентом трения, близким к стандартному серому чугуну [10]. Общий вид колодки UR 01-01 приведен на рис. 1 и 2.

В целях определения расчетной зависимости коэффициента трения композиционной колодки UR 01-01 от скорости движения и силы нажатия и для оценки возможности применения этих колодок на локомотивах были проведены следующие работы:

1. Моделирование режимов торможения локомотива, оборудованного колодками UR 01-01, в натурном узле тормозного механизма на инерционном стенде при фиксированных нажатиях и скоростях.
2. Определение расчетной зависимости коэффициента трения колодок UR 01-01 от силы нажатия и скорости торможения.
3. Сопоставление расчетных коэффициентов трения для композиционной колодки UR 01-01 и стандартной чугунной колодки.
4. Оценка возможности применения композиционной колодки UR 01-01 на магистральном локомотиве (выбран электровоз серии ВЛ80).



Рис. 1. Общий вид гребневой тормозной композиционной колодки UR 01-01 с чугунной вставкой
Fig. 1. General view of the ridge composite brake shoe UR 01-01 with a cast iron insert

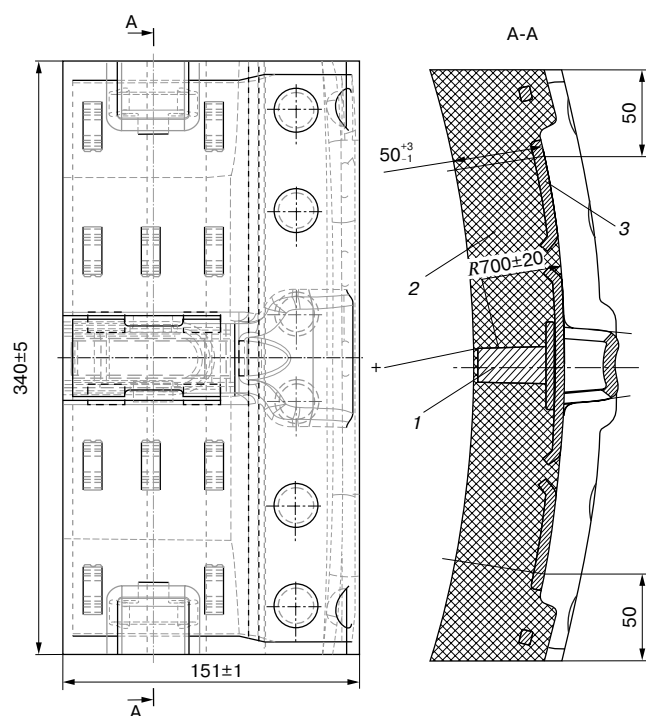


Рис. 2. Колодка UR 01-01:
1 — вставка из стандартного серого чугуна; 2 — композиционный фрикционный материал; 3 — металлический каркас
Fig. 2. UR 01-01 brake shoe:
1 — insert made of standard gray cast iron; 2 — composite friction material; 3 — metal frame

Условия проведения испытаний. Определение коэффициентов трения на стенде выполнено при следующих условиях:

1. Момент инерции вращающихся масс стенда $J = 2759,5 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, что соответствует нагрузке на ось локомотива, равной 245 кН.

2. На стенде испытывались две колодки одновременно. Сила нажатия на каждую колодку составляла 20, 30 и 35 кН. Цикл испытаний при каждом нажатии содержал 8 полных остановочных служебных торможений с начальных скоростей 5, 10, 30, 50, 90, 120, 140, 160 км/ч.

3. Температура от 21,3 до 23,5 °С, относительная влажность от 45,2 до 66,4 %, атмосферное давление от 99,5 до 100,5 кПа.

4. Испытания проведены с цельнокатаным колесом диаметром 950 мм.

5. Набор начальных скоростей при стендовых испытаниях соответствовал стандартной программе.

Регулировка основных параметров испытаний (скорости, давления в тормозном цилиндре) на стенде проводилась с помощью микропроцессорной системы управления. Проверка силы нажатия колодок на колесо осуществлялась при тарировке с помощью образцового динамометра. При каждом торможении фиксировались скорость вращения колесной пары (км/ч), момент вращения колесной пары (Н·м), время торможения (с), сила нажатия тормозных колодок (кН).

Значения фактического коэффициента трения $\varphi_{\text{фк}}$ для каждого опыта подбирались из уравнения движения поезда при торможении (4) методом итерации:

$$S_{\text{т}} = (1 + \gamma) \int_0^{v_{\text{нач}}} \frac{v dv}{(K_{\text{д}} m \varphi_{\text{фк}}) / g + M_{\text{лок}}}, \quad (4)$$

где $S_{\text{т}}$ — значение тормозного пути, определенное на стенде, м; γ — безразмерный коэффициент, учитывающий инерцию вращающихся масс (для стенда принят равным 0,04); $v_{\text{нач}}$ — начальная скорость, км/ч; $K_{\text{д}}$ — сила нажатия колодок на стенде, кН; m — количество колодок, воздействующих на одно колесо (2 шт.); $M_{\text{лок}}$ — масса локомотива, приведенная к одному колесу, т; g — ускорение свободного падения, м/с².

Распределение опытных значений коэффициента трения композиционных колодок UR 01-01 с чугунными вставками в зависимости от начальной скорости торможения, полученных в ходе стендовых испытаний, приведено на рис. 3.

Анализ экспериментальных данных. Исходя из уравнений (1), (2) и (3) для композиционных колодок UR 01-01 был предложен следующий вид зависимости коэффициента трения от скорости начала торможения и силы нажатия на колодку:

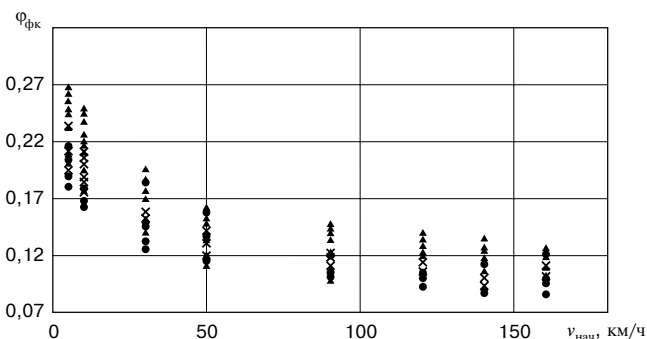


Рис. 3. Поле распределения опытных значений коэффициента трения $\varphi_{\text{фк}}$ в зависимости от начальной скорости торможения $v_{\text{нач}}$ и силы нажатия колодок $K_{\text{д}}$:
▲ — 20 кН; × — 30 кН; ● — 35 кН

Fig. 3. Distribution field of experimental values of the friction coefficient $\varphi_{\text{фк}}$ depending on the initial braking speed $v_{\text{нач}}$ and pressing force of the shoes $K_{\text{д}}$:
▲ — 20 кН; × — 30 кН; ● — 35 кН

$$\varphi_{\text{рк}} = 0,6 \frac{a_1 K + a_3}{a_2 K + a_3} \frac{a_4 v + a_6}{a_5 v + a_6}, \quad (5)$$

где $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6$ — эмпирические коэффициенты.

Используя стандартные численные методы [11], были определены коэффициенты уравнения (5). Минимизируемая функция представляла сумму дисперсий расчетных и фактически измеренных коэффициентов трения пары «колодка—колесо» (6); также при определении коэффициентов $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6$ принято ограничение $1 \leq a_k \leq 100$.

$$f(a_k) = \sum_{i=1}^8 \sum_{j=1}^3 \left(\varphi_{\text{рк}}(v_i K_j) - \varphi_{\text{фк}}(v_i K_j) \right)^2. \quad (6)$$

Рассчитанные коэффициенты уравнения $a_1 = 0,65$; $a_2 = 4,67$; $a_3 = 65,7$; $a_4 = 1,0$; $a_5 = 3,1$; $a_6 = 64,5$ были округлены, полученная зависимость коэффициента трения колодок UR 01-01 от текущих сил нажатия и скоростей торможения представлена следующим выражением:

$$\varphi_{\text{рк}} = 0,6 \frac{0,6K + 66}{4,7K + 66} \frac{v + 64}{3v + 64}. \quad (7)$$

На рис. 4 показаны зависимости расчетных коэффициентов трения при силе нажатия на колодку 30 кН. Как видно из представленных графиков, коэффициенты трения чугунной колодки и колодки UR 01-01 в области скоростей до 25 км/ч достаточно близки, следовательно, торможения при использовании колодки UR 01-01 будут выполняться с той же эффективностью, что и с обычной чугунной колодкой. При скоростях свыше 45 км/ч значения коэффициентов трения композиционной колодки UR 01-01 выше, чем у обычной чугунной, на 20 %, что будет способствовать сокращению длины тормозного пути.

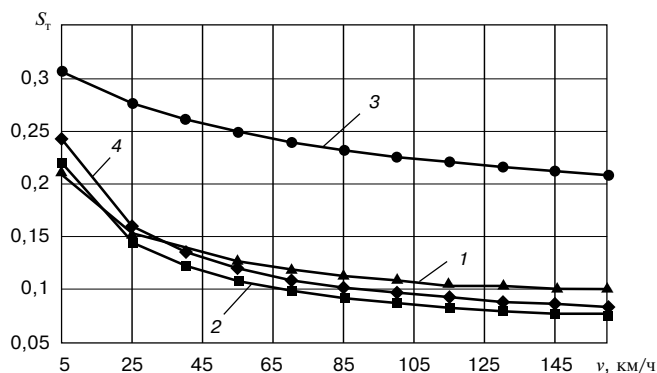


Рис. 4. Зависимость коэффициента трения от скорости торможения при усилии нажатия 30 кН для колодки:
1 — UR 01-01; 2 — стандартной чугуновой;
3 — стандартной композиционной;
4 — чугуновой высокофосфорной

Fig. 4. Dependence of the coefficient of friction on the braking speed with a pressing force of 30 kN for the shoe:
1 — UR 01-01; 2 — standard cast iron;
3 — standard compositional;
4 — high-phosphoric cast iron

В отличие от коэффициентов трения колодки UR 01-01 коэффициент трения стандартной вагонной композиционной колодки (с высоким коэффициентом трения) в 2–2,5 раза выше, чем у чугуновой, практически при всех скоростях начала торможения. Анализ рис. 4 демонстрирует невозможность эксплуатации на локомотиве стандартных композиционных колодок при существующей рычажной передаче.

Для оценки возможности применения новых композиционных колодок UR 01-01 с чугуновыми вставками на локомотивах без изменения рычажной передачи выполнены тормозные расчеты для электровоза серии ВЛ80, включающие определение тормозного пути, удержание одиночного локомотива на уклоне стояночным тормозом и обеспечение безюзового торможения в связи с более высокими значениями коэффициента трения колодки UR 01-01 на высоких скоростях (по сравнению с обычной чугуновой колодкой).

При определении длины тормозного пути рабочее давление в тормозном цилиндре принято 0,4 МПа, для проверки отсутствия юза — 0,45 МПа. Для указанных рабочих давлений исходя из конструктивных характеристик электровоза серии ВЛ80 (диаметр тормозного цилиндра, КПД и передаточное отношение рычажной передачи) рассчитаны силы нажатия на колодку, которые составили 41,1 и 49,1 кН соответственно.

Тормозной путь одиночного локомотива определяется по формуле [5, 6]:

$$S_d = \sum \frac{500(v_n^2 - v_k^2)}{\xi(b_t + w_{0x})}, \quad (8)$$

где v_n , v_k — начальная и конечная скорость интервала торможения, км/ч; ξ — замедление поезда, км/ч²; b_t —

удельная тормозная сила одиночного локомотива, Н/т, $b_t = 1000\varphi_{pk}g_p$; w_{0x} — удельное сопротивление движению одиночного локомотива, Н/т.

Рассчитанный по формуле (8) тормозной путь электровоза серии ВЛ80, оборудованного колодками UR 01-01, составляет 681 м, что соответствует требованиям ГОСТ Р 55364–2012 [12], следовательно, композиционная колодка UR 01-01 с чугуновой вставкой обеспечивает необходимую длину тормозного пути.

Максимальная сила нажатия колодок не должна вызывать юза колесной пары при торможении. Проверкой безюзового торможения является выполнение условий надежности сцепления колеса с рельсом [5, 6]:

$$\delta_p \varphi_{pk} < \psi_k, \quad (9)$$

где δ_p — расчетный коэффициент усилия нажатия колодок на колесо; ψ_k — коэффициент сцепления колеса с рельсом.

Выполненные расчеты для скоростей 20 и 100 км/ч ($\delta_p \varphi_{pk}(20) = 0,077 < 0,106$, $\delta_p \varphi_{pk}(100) = 0,051 < 0,077$) показывают, что условия безюзового торможения для колодки UR 01-01 выполняются.

Действительная сила нажатия с учетом ручного привода стояночного тормоза определена исходя из конструктивных особенностей локомотива и составляет 50 кН. Минимальный уклон пути, при котором произойдет страгивание одиночного локомотива с места, составил 42,5‰ (10), что выше регламентированного значения в 30‰ [12].

$$i \leq \frac{B + W_{tp}}{P_c} = 42,5, \quad (10)$$

где B — тормозная сила стояночного тормоза, кН, $B = mK_d \varphi_{pk}$; W_{tp} — сила сопротивления при трогании с места, кН, $W_{tp} = w_{0x} P_c$; P_c — служебный вес локомотива, кН.

Выводы. 1. Показана необходимость определения аналитической зависимости коэффициента трения колодок с новыми физико-механическими и трибологическими характеристиками от силы нажатия и скорости торможения. Тормозные показатели подвижного состава с такими колодками (тормозной путь, отсутствие юза колесных пар, удержание на уклоне) должны соответствовать нормативной документации и оценочным показателям по возможности применения колодок на эксплуатируемом подвижном составе.

2. Приведена последовательность нахождения эмпирической формулы коэффициента трения тормозных колодок UR 01-01 по результатам стендовых испытаний.

3. Определена зависимость коэффициента трения композиционных колодок UR 01-01 из безасбестового материала с твердыми чугуновыми вставками от силы нажатия и скорости торможения.

4. Композиционная колодка UR 01-01 обеспечивает соответствие нормативным значениям показателей длины тормозного пути, безюзового торможения и удержания на уклоне для электровоза серии ВЛ80.

5. На примере электровоза ВЛ80 показана возможность применения композиционных колодок UR 01-01 без изменения его рычажной передачи.

6. Для апробации полученной расчетной эмпирической зависимости коэффициента трения колодок UR 01-01 с целью внесения ее в Правила тяговых расчетов для поездной работы [5] необходимо проведение ходовых тормозных испытаний локомотивов, оборудованных данными колодками. Окончательно вопрос применимости колодок UR 01-01 для локомотивов должен быть решен после их комплексных испытаний на износостойкость и проведения технико-экономических исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Исследование изнашивания и его предотвращение в системе «тормозная колодка—колесо—рельс» / А. В. Шакина [и др.] // Известия Самарского научного центра РАН. 2012. Том 14. № 4 (5). С. 1335–1337.
2. ГОСТ 33421–2015. Колодки тормозные композиционные и металлокерамические для железнодорожного подвижного состава. Общие технические условия: межгос. стандарт: введен в действие в качестве нац. стандарта Российской Федерации приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 24 сент. 2019 г. № 747-ст: дата введения 2020-02-01. М.: Стандартинформ, 2019. 34 с.
3. ГОСТ 33695–2015. Колодки тормозные чугунные для железнодорожного подвижного состава: межгос. стандарт: принят Евразийским советом по стандартизации, метрологии и сертификации протоколом от 10 дек. 2015 г. № 48-2015. Минск, [2017]. 45 с.
4. Жаров И. А., Воронин И. Н. Перспективные показатели оценки работоспособности тормозных фрикционных пар // Вестник ВНИИЖТ. 2012. № 5. С. 36–39.
5. Правила тяговых расчетов для поездной работы: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 12 мая 2016 г. № 867р. М.: ОАО «РЖД», 2016. 515 с.

6. Гребенюк П. Т., Долганов А. Н., Скворцова А. И. Тяговые расчеты: справочник. М.: Транспорт, 1987. 272 с.

7. ГОСТ 30249–97. Колодки тормозные чугунные для локомотивов. Технические условия: межгос. стандарт: введен в действие в качестве гос. стандарта Российской Федерации постановлением Государственного комитета Российской Федерации по стандартизации, метрологии и сертификации от 10 июня 1998 г. № 246: дата введения 1999-07-01. М.: Стандартинформ, 2005. 11 с.

8. Жаров И. А. Проблемы триботехнических инноваций на железнодорожном транспорте // Вестник ВНИИЖТ. 2007. № 5. С. 8–11.

9. Павлюков А. Э., Черепов О. В., Шалупина П. И. Тормозные колодки грузовых вагонов: анализ повреждаемости и факторов, влияющих на создание тормозной силы // Вестник Уральского гос. ун-та путей сообщения. 2017. № 4. С. 4–11.

10. Тормозная колодка железнодорожного транспортного средства: пат. 83817 Рос. Федерация: МПК В61Н 7/02 F16D 65/04 / А. И. Ворончихин, И. А. Налев, В. Н. Бычков. № 2009101264/22; заявл. 16.01.2009; опубл. 20.06.2009, Бюл. № 17. 6 с.

11. Химмельблау Д. М. Прикладное нелинейное программирование. М.: Мир, 1975. 536 с.

12. ГОСТ Р 55364–2012. Электровозы. Общие технические требования: нац. стандарт Российской Федерации: введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 19 дек. 2012 г. № 1916-ст: дата введения 2014-01-01. М.: Стандартинформ, 2013. 36 с.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

ГАБИДУЛЛИН Алексей Эрнестович, канд. техн. наук, руководитель проекта, ООО «ЛокоТех»

ГОРСКИЙ Дмитрий Вячеславович, руководитель группы, НЦ «НПСАП», АО «ВНИИЖТ»

НАЗАРОВ Игорь Викторович, заместитель директора НЦ «НПСАП» — начальник отдела «Нетяговый подвижной состав», АО «ВНИИЖТ»

НИКИТИН Владислав Альбертович, директор по развитию, АО «ФРИТЕКС»,

Статья поступила в редакцию 22.05.2020 г., принята к публикации 24.08.2020 г.

Для цитирования: Расчет зависимости коэффициента трения композиционных гребневых колодок для локомотивов от силы нажатия и скорости торможения / А. Э. Габидуллин [и др.] // Вестник ВНИИЖТ. 2020. Т. 79. № 6. С. 337–342. DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2020-79-6-337-342>.

Calculation of the dependence of friction coefficient of locomotive composite ridge brake shoes on pressing force and braking speed

A. E. GABIDULLIN¹, D. V. GORSKIY², I. V. NAZAROV², V. A. NIKITIN³

¹Limited Liability Company "Lokomotivnye Tekhnologii" (LLC "LokoTech"), Moscow, 109004, Russia

²Joint Stock Company "Railway Research Institute" (JSC "VNIIZHT"), Moscow, 129626, Russia

³Joint Stock Company "Plant of Friction and Heat Resistant Materials" (JSC "FRITEX"), Yaroslavl, 150003, Russia

Abstract. JSC "FRITEX" has developed non-asbestos ridge composite brake shoes UR 01-01 with a reduced coefficient of friction, which, in contrast to the cast iron ridge brake shoes currently used on locomotives, have high wear resistance and more stable frictional properties at high speeds. They are much lighter than tra-

ditional cast iron shoes, resulting in lower logistics costs and easier replacement by service departments.

However, the new materials used for the production of the shoe, as well as its innovative design, which combines the two types of materials, require a detailed study of its frictional properties. For

this, the braking modes of a locomotive equipped with UR 01-01 shoes were simulated in a full-scale unit of a brake mechanism on an inertial stand at fixed pressures and speeds. Based on the results of the experiments, the values of the friction coefficients of the brake shoes were determined and the dependence of the friction coefficient of the shoes on the pressing force and braking speed was established.

The data obtained were used in braking calculations for an electric locomotive of the VL80 series, including the determination of the braking distance, holding a single locomotive by the parking brake on a slope, and ensuring the antiskid braking due to higher values of the friction coefficient of the UR 01-01 shoe at high speeds. The composite ridge brake shoe ensures compliance with the standard values of the braking distance, antiskid braking and slope parking for the VL80 series electric locomotive. In this case, the use of these composite shoes is possible without changes in the device of the lever transmission of the electric locomotive.

It is necessary to conduct running brake tests to make approbation of obtained empirical dependence of the friction coefficient of new shoes on the pressing force and the braking speed of the locomotive and its widespread use in the calculation of brake systems.

Keywords: brake shoe; friction; braking efficiency; composite brake shoe UR 01-01

DOI: <https://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2020-79-6-337-342>

REFERENCES

1. Shagina A. V., Bilenko S. V., Fadeev V. S., Shtanov O. V. *Issledovanie iznashivaniya i ego predotvrashchenie v sisteme "tormoznaya kolodka—koleso—rel's"* [Investigation of wear and its prevention in the system "brake shoe—wheel—rail"]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN* [Bulletin of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2012, Vol. 14, no. 4 (5), pp. 1335–1337.
2. GOST 33421–2015. *Composite and metal-ceramic brake shoes for railway rolling stock. General technical conditions*. Interstate standard, put into effect as national standard of the Russian Federation by order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology dated September 24, 2019 No. 747-st. Moscow, Standartinform Publ., 2019, 34 p. (in Russ.).
3. GOST 33695–2015. *Cast iron brake shoes for railway rolling stock*. Interstate standard, adopted by the Eurasian Council for Standardization, Metrology and Certification by the Protocol dated December 10, 2015 No. 48-2015. Minsk, [2017]. 45 p.
4. Zharov I. A., Voronin I. N. *Perspektivnye pokazateli otsenki rabotosposobnosti tormoznykh friktsionnykh par* [Perspective indicators for assessing the performance of brake friction pairs]. *Vestnik VNIIZhT* [Vestnik of the Railway Research Institute], 2012, no. 5, pp. 36–39.

5. *Rules for traction calculations for train operation*. Approved by order of the JSC "Russian Railways" dated May 12, 2016 No. 867r. Moscow, JSC "Russian Railways", 2016, 515 p. (in Russ.).

6. Grebenyuk P. T., Dolganov A. N., Skvortsova A. I. *Tyagovye raschety: spravochnik* [Traction calculations: reference book]. Moscow, Transport Publ., 1987, 272 p.

7. GOST 30249–97. *Cast iron brake blocks for locomotives. Specifications*. Interstate standard, put into effect as state standard of the Russian Federation by the resolution of the State Committee of the Russian Federation for standardization, metrology and certification dated June 10, 1998 No. 246. Moscow, Standartinform Publ., 2005, 11 p. (in Russ.).

8. Zharov I. A. *Problemy tribotekhnicheskikh innovatsiy na zheleznodorozhnom transporte* [Problems of tribotechnical innovations in railway transport]. *Vestnik VNIIZhT* [Vestnik of the Railway Research Institute], 2007, no. 5, pp. 8–11.

9. Pavlyukov A. E., Cherepov O. V., Shalupina P. I. *Tormoznye kolodki gruzovykh vagonov: analiz povrezhdaemosti i faktorov, vliyayushchikh na sozdanie tormoznoy sily* [Brake shoes of freight cars: analysis of damage and factors affecting the creation of braking force]. *Vestnik Ural'skogo gos. un-ta putey soobshcheniya* [Bulletin of the Ural State University of Railways], 2017, no. 4, pp. 4–11.

10. Voronchikhin A. I., Nalev I. A., Bychkov V. N. *Tormoznaya kolodka zheleznodorozhnogo transportnogo sredstva. Patent 83817 Rossiyskaya Federatsiya* [Brake shoe of a railway vehicle. Patent 83817 Russian Federation]. No. 2009101264/22, publ. June 20, 2009, Bull. no. 17, 6 p. (in Russ.).

11. Khimmel'blau D. M. *Prikladnoe nelineynoe programmirovaniye* [Applied nonlinear programming]. Moscow, Mir Publ., 1975, 536 p.

12. GOST R 55364–2012. *Electric locomotives. General technical requirements*. National standard of the Russian Federation, entered into force by order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology dated December 19, 2012 No. 1916-st. Moscow, Standartinform Publ., 2013, 36 p. (in Russ.).

ABOUT THE AUTHORS

Aleksey E. GABIDULLIN,
Cand. Sci. (Eng.), Project Manager, LLC "LokoTech"

Dmitriy V. GORSKIY,
Head of the Group, SC "NPSAP", JSC "VNIIZHT"

Igor' V. NAZAROV,
Deputy Director of the SC "NPSAP" — Head of the Department "Non-Traction Rolling Stock", JSC "VNIIZHT"

Vladislav A. NIKITIN,
Development Director, JSC "FRITEX"

Received 22.05.2020

Accepted 24.08.2020

■ E-mail: gorskiy.dmitry@vniizht.ru (D. V. Gorskiy)

For citation: Gabidullin A. E., Gorskiy D. V., Nazarov I. V., Nikitin V. A. Calculation of the dependence of friction coefficient of locomotive composite ridge brake shoes on pressing force and braking speed // VNIIZHT Scientific Journal. 2020. 79 (6): 337–342 (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2020-79-6-337-342>.

ВЫШЛИ В СВЕТ ТРУДЫ ВНИИЖТ

Максимов И. Н., Кондрашов В. М. Альтернативные методы исследования динамики железнодорожных экипажей. М.: РАС, 2019. 108 с.

В книге подробно изложена методика исследования динамики железнодорожных экипажей, в основе которой лежит оригинальный подход к моделированию движения колесных пар железнодорожных экипажей в рельсовой колее, позволяющий реализовывать движение экипажей любой осности в прямых и кривых участках пути в режимах выбега, тяги и торможения.

Книга рассчитана на научных и инженерно-технических работников железнодорожного транспорта, также может быть полезна преподавателям и студентам транспортных вузов.

По вопросам приобретения книги обращаться по адресу: 129626, г. Москва, 3-я Мытищинская ул., д. 10, редакционно-издательский отдел АО «ВНИИЖТ».

Тел.: (499) 260-43-20, e-mail: rio@vniizht.ru, www.vniizht.ru.

Комплексная оптимизация эксплуатации пассажирских поездов на базе автоматизированной системы управления рентабельностью пассажирских перевозок

Г. Л. ВЕНЕДИКТОВ, В. М. КОЧЕТКОВ

Общество с ограниченной ответственностью «Экспресс-Л» (ООО «Экспресс-Л»), Санкт-Петербург, 194291, Россия

Аннотация. Статья посвящена решению актуальной для пассажирского комплекса задачи оптимизации тарифной политики при наиболее рациональном использовании подвижного состава. Излагаются принципы экономико-математического моделирования с целью определения оптимального количества вагонов в составах пассажирских поездов и цен на проезд в едином расчетном процессе, названном комплексной оптимизацией. Разработанные модели позволяют формировать оптимальные схемы составов в соответствии с прогнозируемым спросом, уравнивая спрос и предложение на перевозки, что, в свою очередь, радикально повышает их экономическую эффективность. Одновременно с нахождением оптимальных схем методом комплексной оптимизации определяются такие цены на проезд, при которых баланс спроса и предложения достигается при максимально возможном экономическом эффекте. В статье рассматриваются аналитические модели пассажирского спроса, принципы реализации процедуры комплексной оптимизации, проблемы прогнозирования пассажирского спроса и особенности расчетов прогноза спроса на примере поезда № 17/18 «Карелия» на направлении Петрозаводск—Москва, а также предлагается решение задачи определения оптимальных цен и схем составов. На примере реальных данных эксплуатации этого поезда произведена оценка эффективности автоматизированной системы управления рентабельностью пассажирских перевозок, созданной на базе алгоритмов комплексной оптимизации. Показано, что разработанные аналитические модели пассажирского спроса позволяют решать оптимизационные задачи, повышающие эффективность автоматизированных систем управления экономическими показателями перевозочного процесса, а мультимодельная система прогнозирования обеспечивает удовлетворительную точность при высоком уровне детализации прогнозов. В связи с тем, что уровень расходов на рейсы поездов радикально влияет на результат оптимизации перевозочного процесса при переменных схемах составов, принятый критерий оптимизации учитывает как доходы, так и расходы на перевозку. Приведены данные расчетов, показывающих, что процедура комплексной оптимизации для поезда «Карелия» могла бы дать значительный дополнительный финансовый результат.

Ключевые слова: пассажирские железнодорожные перевозки; спрос; экономико-математическое моделирование; комплексная оптимизация; прогнозирование; управление рентабельностью; автоматизированная система; АСУРПП

Введение. Пассажирский комплекс железных дорог России начиная с 2013 г. применяет динамическое

ценообразование на перевозки в системе управления доходностью. Эта система исторически строилась так, что ее эффективная работа возможна только при постоянном объеме предложения [1]. Применительно к пассажирским железнодорожным перевозкам предложение постоянного объема мест в поездах означает их эксплуатацию с постоянными схемами составов. В то же время маневр количеством вагонов по классам в зависимости от спроса является важнейшим преимуществом, повышающим эффективность пассажирских перевозок [2].

Так как спрос и предложение оказываются сбалансированными лишь при определенных ценах на проезд, востребованными являются принципы моделирования, позволяющие определять потребные количества вагонов в составах и цены в едином расчетном процессе. Авторами настоящей статьи разработаны и опубликованы теоретические основы моделирования пассажирского спроса и созданы алгоритмы такого процесса, названного комплексной оптимизацией (КО) [2–4].

Важным этапом КО является выбор критерия оптимизации. При изменении схем составов меняются расходы на их рейсы. Поскольку в этом случае использование в качестве критерия только дохода приводит к грубым ошибкам, оптимизация должна производиться по финансовому результату от перевозок, учитывающему как доходы D , так и расходы R по каждому рейсу. Особо отметим, что эффективность КО обусловлена созданной аналитической моделью спроса на пассажирские перевозки [2, 3].

На разработанных теоретических принципах реализован программный комплекс OPTIMUM-T [2, 5, 6], составивший основу автоматизированной системы управления рентабельностью пассажирских перевозок (АСУРПП). В соответствии с требованиями производственных процессов по перевозке пассажиров АСУРПП включает в себя системы мониторинга (непрерывного контроля параметров перевозок), прогнозирования, комплексной оптимизации и технико-экономического анализа.

■ E-mail: gennady@konsalt.net (Г.Л. Венедиктов)

Целью настоящей статьи стала оценка эффективности АСУРПП применительно к конкретному пассажирскому направлению, имеющему существенный спрос на перевозки как в регулируемом, так и дерегулируемом секторе при достаточно большом числе остановочных пунктов. Алгоритм КО позволяет оптимизировать процесс эксплуатации групп поездов. Так как при этом результаты расчетов имеют большой объем, в настоящей работе для наглядности приведен пример КО только одного поезда № 17/18 «Карелия» сообщением Петрозаводск—Москва.

Аналитические модели пассажирского спроса. Представленные оптимизационные задачи решаются методами экономико-математического моделирования [2, 3, 7, 8], причем основной является модель, задающая зависимость спроса от цены. При построении ценовой модели пассажирского спроса приняты во внимание два очевидных постулата: 1) с увеличением стоимости билета спрос падает, а с уменьшением — растет; 2) число предлагаемых к продаже мест ограничено предельным количеством мест в вагонах.

Здесь и далее под пассажирским спросом S понимается количество пассажиров в некотором классе поезда. Это количество либо определяется по истории продаж, либо приближенно находится по алгоритмам прогноза спроса. Следует, однако, иметь в виду, что пассажирский спрос является, по сути, случайным процессом с довольно высокой дисперсией. Поэтому приводимые далее ценовые зависимости описывают влияние цены на средний спрос с некоторым приближением.

Если в поезде имеется M мест в определенном классе, то при низкой цене зависимость спроса S от цены p находится в зоне насыщения ($S=M$), но, начиная от некоторой граничной цены $p_{гр}$, спрос снижается с ее увеличением. При достижении предельной цены $p_{пр}$ спрос фактически обнуляется. На практике граничную и предельную цены можно определить: 1) по динамике истории продаж, если цена варьируется в заметных пределах; 2) по анкетным опросам пассажиров — в этом случае ценовые предпочтения пассажиров могут определяться по методу Вестендорпа [5, 9].

Практические расчеты показали, что наиболее удачными являются модели на основе степенной и экспоненциальной аппроксимаций [2–4], определяемые соответственно формулами (1) и (2):

$$S(p) = \begin{cases} M, & p \leq p_{гр}; \\ M \left[1 - \left(\frac{p - p_{гр}}{p_{пр} - p_{гр}} \right)^\alpha \right], & p_{гр} < p < p_{пр}; \\ 0, & p \geq p_{пр}, \end{cases} \quad (1)$$

где M — количество мест; p — цена; $p_{гр}$ — граничная цена; $p_{пр}$ — предельная цена.

$$S(p) = M \exp \left(- \left[\frac{p}{p_0} \right]^q \right), \quad (2)$$

где p_0 — параметр, определяемый по формуле (3).

Параметр α в формуле (1), задающий скорость спада спроса с ростом цены, как правило, находится в пределах $1,8 \leq \alpha \leq 2$.

В формуле (2) спрос задается параметрами p_0 и q , которые находятся, если определены граничная $p_{гр}$ и предельная $p_{пр}$ цены. Здесь для граничной цены разумно принять значение $p = p_{гр}$, при котором спрос $S(p)$ равен $S_{гр} = 0,99 M$, а для предельной цены — $S_{пр} = 0,05 M$.

Тогда параметры q и p_0 находятся по формулам

$$q = \ln \left[\frac{\ln(S_{пр} / M)}{\ln(S_{гр} / M)} \right] \left[\ln \left(\frac{p_{пр}}{p_{гр}} \right) \right]^{-1}; \quad p_0 = p^* \left[\ln \left(\frac{M}{S^*} \right) \right]^{-1/q}, \quad (3)$$

где $S_{пр}$ — предельный спрос; $S_{гр}$ — граничный спрос.

Величинам p^* и S^* в выражении для параметра p_0 отвечают согласованные между собой цена и спрос, которые могут находиться по истории продаж.

С учетом принятых выше выражений для параметров $S_{пр}$ и $S_{гр}$ формула для величины q может быть записана в виде

$$q = 5,697 / \ln(\beta), \quad (4)$$

где β — принимаемое модельное отношение предельной цены к граничной.

Обе ценовые модели — степенная и экспоненциальная — представлены на рис. 1. На оси абсцисс отмечены граничная и предельная цены. Применимость обеих моделей подтверждена на значительном объеме практических расчетов.

На рис. 2 помимо ценовой зависимости спроса показана штрихпунктирной линией зависимость от цены величины дохода $D = pS(p)$. Доход D , как видно из рис. 2, достигает максимума при некоторой оптимальной цене $p_{опт}$. Для модели (2) она выражается через параметры p_0 и q

$$p_{опт} = p_0 \left[\frac{1}{q} \right]^{1/q}. \quad (5)$$

Из рис. 2 видно также, что при оптимальной цене коэффициент использования вместимости S/M , для краткости далее называемый населенностью, становится менее единицы и на практике составляет $0,87–0,90$.

Принципы реализации процедуры КО. При выполнении расчетов, связанных с процедурой КО, более удобно использовать экспоненциальную модель (2).

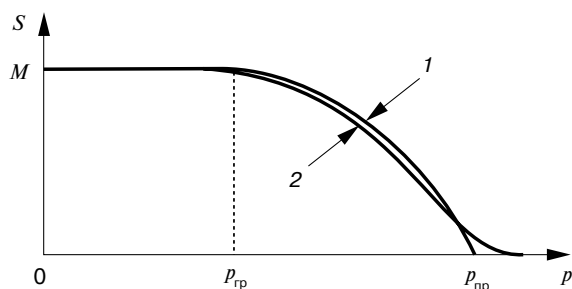


Рис. 1. Модели ценовой зависимости спроса S от цены p :
1 – степенная (1); 2 – экспоненциальная (2); M – количество мест; $p_{гр}$ – граничная цена; $p_{пр}$ – предельная цена
Fig. 1. Models of price dependence of demand S on price p :
1 – power (1); 2 – exponential (2); M – number of seats;
 $p_{гр}$ – boundary price; $p_{пр}$ – marginal price

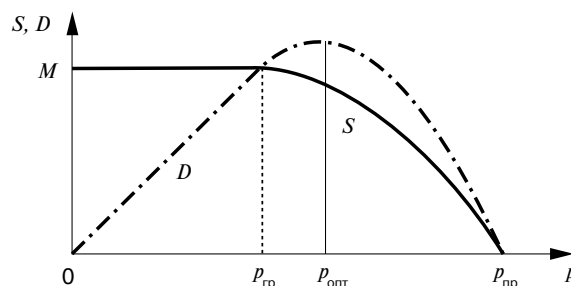


Рис. 2. Зависимость спроса S и дохода D от цены p :
 $p_{опт}$ – оптимальная цена
Fig. 2. Dependence of demand S and income D on price p :
 $p_{опт}$ – optimal price

Процедура КО выполняется в следующем порядке. Исходя из истории продаж, применительно к каждому рейсу на соответствующую дату определяют прогнозные значения спроса S и базовые цены p для всех классов обслуживания. Далее находят соответствующее спросу S число вагонов каждого класса и, таким образом, определяют исходные населенности S/M .

После этого по величинам S/M и p находят модельные параметры p_0 и q , а затем осуществляют перебор возможного количества вагонов v_i для всех классов и рассчитывают по формуле (5) оптимальные цены применительно к каждому возможному варианту. В итоге находят такое оптимальное соотношение количества вагонов по классам и цены на проезд, которое дает наибольшую величину финансового результата $D-R$. Отметим, что величина расходов R представляет собой ту часть, которая относится непосредственно на рейсы вагонов. Постоянная составляющая расходов, которая не зависит от того, находится ли вагон в рейсе или в отстое, в данный расчет не принимается.

На рис. 3 проиллюстрирован один из шагов такого расчетного процесса, когда осуществляется проверка, может ли увеличиться финансовый результат, если к трем вагонам какого-то класса добавить четвертый.

Получаемые результаты имеют особенно наглядную форму, если ввести систему относительных единиц. В качестве единиц измерения спроса, цен и дохода примем величины, относящиеся к исходному варианту. Для данного случая исходное число вагонов равно трем. При этом в качестве ценовой единицы для абсциссы выберем граничную цену $p_{гр3}$, а спрос и доход вдоль ординаты будем измерять соответственно в единицах спроса $S_{гр3}$ и дохода $D_{гр3}$, имеющих место при граничной цене $p_{гр3}$. Относительные величины цены, спроса и дохода для трех вагонов при этой граничной цене принимают единичное значение.

На рис. 3 кривая S_3 отображает ценовую зависимость спроса (2) при трех вагонах, а S_4 – при четы-

рех. Ценовые зависимости доходов D_3 и D_4 обозначены пунктирными линиями. Оптимальные цены, для которых эти доходы максимальны, обозначены вдоль абсциссы соответственно как $p_{опт3}$ и $p_{опт4}$. Там же символами $p_{гр3}$ и $p_{гр4}$ обозначены соответствующие граничные цены. Как видно из рис. 3, при увеличении предложения с трех вагонов до четырех оптимальная и граничная цены уменьшаются для поддержания реализуемого пассажирского спроса на необходимом уровне.

В отношении расчетного способа перехода от трех вагонов к четырем, демонстрируемого на рис. 3, отметим следующее.

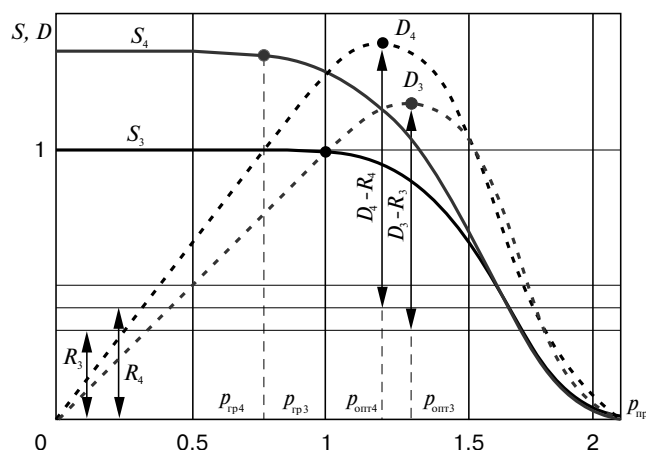


Рис. 3. Сравнение финансовых результатов в относительных величинах при изменении числа вагонов в составе:
 S_3, S_4 – кривые спроса при трех и четырех вагонах соответственно;
 D_3, D_4 – величины доходов; R_3, R_4 – величины расходов;
 $p_{гр3}, p_{гр4}$ – граничные цены; $p_{опт3}, p_{опт4}$ – оптимальные цены;
 D_3-R_3, D_4-R_4 – финансовые результаты
Fig. 3. Comparison of financial results in relative terms when changing the number of cars in the scheme:
 S_3, S_4 – demand curves for three and four cars, respectively;
 D_3, D_4 – income values; R_3, R_4 – cost values; $p_{гр3}, p_{гр4}$ – boundary prices; $p_{опт3}, p_{опт4}$ – optimal prices;
 D_3-R_3, D_4-R_4 – financial results

Очевидно, что в окрестности предельно высоких цен пассажирский спрос является малым вне зависимости от числа предлагаемых вагонов. Этот факт должен учитываться при перестроении ценовой модели, т. е. при переходе на рис. 3 от кривой спроса S_3 к линии S_4 . В силу сказанного при таком перестроении следует использовать автомодельный подход, для которого при высокой цене спрос, оставаясь низким, практически не зависит от выбираемой составности. Одним из удобных автомодельных преобразований такого рода является привязка обеих кривых на рис. 3 к точке перегиба для модели (2) — т. е. к ценовой координате, для которой вторая производная спроса по цене равна нулю. Совмещение точек перегиба для обоих чисел вагонов и задание суммарного числа мест в вагонах для измененной составности однозначно определяет ценовую зависимость спроса при новом количестве вагонов — с надлежащим изменением граничной и оптимальной цен.

Основания для выбора оптимальной схемы путем сравнения значений финансовых результатов $D_4 - R_4$ и $D_3 - R_3$ наглядно демонстрирует рис. 3. Доход D_4 выше дохода D_3 , однако при переходе к четырем вагонам пропорционально возрастают расходы $R_4 = (4/3)R_3$. При относительно низких расходах, показанных на рисунке, $D_4 - R_4 > D_3 - R_3$, и по этой причине увеличение числа вагонов в данном случае экономически целесообразно. Очевидно также, что уровень расходов влияет на принятие решения об изменении числа вагонов, и при больших расходах на вагон за рейс добавление вагона становится невыгодным.

Описанные выше сравнительные оценки выполняются для всех классов. В итоге находят схему состава и набор оптимальных цен, обеспечивающих наибольший финансовый результат. Если рассматривается группа поездов, то в расчет берется суммарный доход от всех рассматриваемых составов.

Следует, однако, отметить, что при числе поездов 4–5 и более количество возможных комбинаций чисел вагонов для всей совокупности поездов превышает величину 10^{12} и такое количество комбинаций делает практически невозможным выполнение сравнительных оценок. С целью сокращения объемов расчетов в АСУРПП для подобных случаев применяются алгоритмы на базе выпуклого программирования и градиентного поиска максимума целевой функции [3]. Это позволило радикально уменьшить число итераций, сделав расчет доступным для персональных компьютеров.

Проблемы прогнозирования пассажирского спроса и особенности расчетов прогноза спроса для поезда «Карелия». Высокая точность прогнозов является необходимым условием эффективности КО. Однако временные ряды пассажирского спроса на железнодорожном транспорте обладают характерными

свойствами, затрудняющими достижение удовлетворительной точности. К таким свойствам относятся: слабая автокорреляция, выраженные сезонные изменения и внутринедельные колебания, аномалии спроса в праздничные и каникулярные периоды, высокий уровень дисперсии вследствие действия случайных факторов, влияние макроэкономической и конкурентной сред.

По указанной причине авторами был предварительно выполнен значительный объем пробных расчетов с целью отбора методов прогнозирования, дающих наилучшую точность применительно к условиям пассажирского железнодорожного сообщения. Эти расчеты позволили выявить ряд методов, обеспечивающих наименьшую среднюю ошибку прогноза, а именно:

- экспоненциального сглаживания (Хольта—Винтерса);
- декомпозиции;
- авторегрессии и скользящего среднего (ARIMA, ARIMAX — AutoRegressive Integrated Moving Average).

Вследствие перечисленных выше особенностей временных рядов была произведена существенная модификация этих алгоритмов при интеграции их в АСУРПП.

Точность прогноза, реализуемая каждым из указанных методов, может зависеть от свойств конкретного временного ряда [10–14]. Поэтому в АСУРПП реализован алгоритм мультимодельного прогнозирования, при котором по анализу имеющихся статистических свойств временного ряда наиболее точный метод выбирается автоматически.

Мультимодельная система обеспечивает удовлетворительную точность при высокой детализации прогнозов, вплоть до отдельных рейсов поездов. Это дает возможность осуществлять прогнозирование «снизу вверх», т. е. от прогнозов объемов перевозок отдельными поездами до агрегированных по направлениям и филиалам [4]. Именно наличие детализированного прогноза позволяет разрабатывать практические мероприятия по формированию оптимального предложения.

Проблемам прогнозирования пассажирского спроса посвящена опубликованная авторами работа [4], поэтому в настоящей статье подробный анализ и методы решения этих проблем не приводятся. Применительно к поезду «Карелия» система прогнозирования АСУРПП обеспечила хороший уровень точности. Абсолютная средняя ошибка (MAPE) при различных уровнях детализации составила: месяц $\leq 7\%$, неделя $\leq 13\%$, сутки $\leq 23\%$.

Определение оптимальных цен и схем составов для поезда «Карелия». Маршрут курсирования поезда на направлении Петрозаводск—Москва длиной 922 км

имеет 9 промежуточных станций. В составы включаются 4 класса вагонов: мягкие М (люкс), спальные Л, купейные К и плацкартные П. Комплексная оптимизация в полном объеме выполнялась для вагонов классов К, Л и М. Класс П относится к регулируемому сектору с фиксированной ценой, поэтому здесь оптимизировалось только количество вагонов.

Изменение схем составов по ходу движения является экстремальной ситуацией, поэтому находится неизменная по пути следования схема состава. В качестве исходной для расчета принимаются средневзвешенные значения населенности по классам вагонов. Такие значения рассчитываются как сумма произведений населенностей на перегонах на длину каждого перегона, поделенная на длину всего маршрута.

Используя историю продаж, содержащую данные о пассажирском спросе по некоторую дату d_1 включительно, для последующего временного интервала $[d_1 + 1, d_2]$ АСУРПП выполняет прогнозный расчет спроса, а затем методами КО рассчитывает оптимальные цены для каждого класса и наиболее экономичные варианты схем составов на каждый рейс.

Результаты расчетов годового технико-экономического эффекта от КО за 2018 г. представлены в табл. 1 и 2 — соответственно для коэффициентов расхода 0,6 и 0,3. Под коэффициентом расхода понимается уровень расходов на рейс, выраженный в относительных единицах. В столбцах «Результат КО» приведена разность данных между «После КО» и «До КО».

Применительно к табл. 1 и 2 предполагалось, что составы переформируются по обоим концам маршрута. Однако в большинстве случаев изменение схем составов осуществляется лишь на станциях формирования поездов. Тогда схемы следует оптимизировать по показателям, усредненным за рейсы туда и обратно, финансовый результат при этом несколько снижается. В приведенном примере это снижение составило 5,6 %. В подавляющем большинстве случаев для достаточно длительного периода снижение не превышает 10 %. Суммарный экономический эффект от КО остается высоким.

В табл. 3 дан практический пример оптимального формирования схем составов поезда «Карелия» как при формировании составов на каждый рейс, так и при одинаковых схемах туда и обратно. Именно такие детальные рекомендации позволяют оптимизировать эксплуатацию подвижного состава линейными предприятиями.

Подчеркнем, что методом КО на годовой период предварительно определяются оптимальные схемы составов и базовые цены на каждый рейс. Система технико-экономического анализа в реальном времени регистрирует результаты перевозок и передает их в систему мониторинга. В случае отклонения реаль-

Таблица 1

Комплексная оптимизация поезда «Карелия».
Коэффициент расходов $\lambda = 0,6$

Table 1

Complex optimization of the Karelia train.
Cost coefficient $\lambda = 0,6$

Наименование показателей	Значение показателей		
	До КО	После КО	Результат КО
Доходы, тыс. руб.	877 856	906 280	28 424 (3,14 %)
Расходы, тыс. руб.	789 445	589 409	–200 036 (–25,34 %)
Финансовый результат, тыс. руб.	91 417	317 870	226 453 (35,07 %)
Финансовый результат, в % от дохода до КО	10,38	36,21	25,80
Объемы перевозок, чел.	216 087	216 355	268 (0,12 %)
Населенность, %	62	89	27 (43,55 %)
Средняя составность поезда, вагонов/состав/рейс	12,05	8,99	–3,06 (–25,39 %)

Таблица 2

Комплексная оптимизация поезда «Карелия».
Коэффициент расходов $\lambda = 0,3$

Table 2

Complex optimization of the Karelia train.
Cost coefficient $\lambda = 0,3$

Наименование показателей	Значение показателей		
	До КО	После КО	Результат КО
Доходы, тыс. руб.	877 856	1 202 572	324 716 (36,99 %)
Расходы, тыс. руб.	394 723	489 344	94 621 (23,97 %)
Финансовый результат, тыс. руб.	483 133	713 229	230 096 (47,63 %)
Финансовый результат, в % от дохода до КО	55,04	81,25	26,21
Объемы перевозок, чел.	216 087	312 601	96 514 (44,66 %)
Населенность, %	62	84	22 (35,48 %)
Средняя составность поезда, вагонов/состав/рейс	12,05	14,94	2,89 (23,98 %)

ных данных от прогнозных АСУРПП корректирует прогнозы на краткосрочный период, соответствующий глубине продаж. При этом на всю глубину продаж на каждую дату схемы составов остаются неизменными, хотя эти схемы различны для разных дат. Таким образом, сохраняется как возможность маневра объемом предложения в зависимости от спроса, так и постоянство предложения в процессе продаж, что значительно повышает эффективность систем динамического ценообразования.

Таблица 3

Оптимальное формирование схем составов поезда № 17/18 при коэффициенте расходов $\lambda = 0,6$ (2018 г.)

Table 3

Optimal formation of train schemes for train No. 17/18 with cost coefficient $\lambda = 0.6$ (2018)

Число, месяц	Исходные схемы								КО для пары поездов				КО отдельно по рейсам туда и обратно							
	17				18				17/18				17				18			
	К	Л	М	П	К	Л	М	П	К	Л	М	П	К	Л	М	П	К	Л	М	П
19.07–20.07	5	1	1	7	6	1	1	7	4	1	1	5	3	1	1	5	4	2	1	5
20.07–21.07	6	1	1	7	6	1	1	7	4	1	1	5	3	1	1	5	4	2	1	5
21.07–22.07	6	1	1	7	6	1	1	7	4	1	1	6	3	1	1	4	5	2	1	6
22.07–23.07	6	1	1	7	6	1	1	7	4	1	1	7	4	1	1	5	6	1	1	7
23.07–24.07	6	1	1	6	6	1	1	6	4	2	2	6	4	2	1	5	5	2	2	6
24.07–25.07	6	1	1	7	6	1	1	7	4	1	1	6	3	2	2	5	5	1	1	6
25.07–26.07	6	1	1	7	6	1	1	7	4	1	1	6	4	1	1	6	4	1	1	5

Заключение. Представленные в настоящей статье принципы комплексной оптимизации, заложенные в основу построения автоматизированной системы управления рентабельностью пассажирских перевозок, и результаты оптимизации эксплуатации поезда «Карелия» посредством АСУРПП позволяют сформулировать следующее:

1. Пассажирский спрос на железнодорожном транспорте, а также технология перевозок обладают рядом особенностей, не позволяющих применять методы оптимизации перевозочного процесса, принятые для других видов транспорта.

2. Разработанные аналитические модели пассажирского спроса позволяют решать оптимизационные задачи, повышающие эффективность автоматизированных систем управления экономическими показателями перевозочного процесса.

3. Динамика пассажирского спроса на железнодорожном транспорте отличается особыми свойствами. С учетом этих свойств мультимодельная система прогнозирования АСУРПП на основе оценок характеристик соответствующих временных рядов автоматически осуществляет выбор наиболее подходящего метода прогноза, обеспечивая удовлетворительную точность при высоком уровне детализации прогнозов.

4. Уровень расходов на рейсы поездов радикально влияет на результат оптимизации перевозочного процесса при переменных схемах составов, поэтому критерий оптимизации в алгоритме КО учитывает как доходы, так и расходы на перевозку.

5. При относительно высоких расходах на рейсы оптимизация приводит к сокращению средней составности поездов и объемов перевозок при некотором повышении цен. Снижение расходов при тех же

исходных данных приводит к увеличению средней составности, снижению цен и росту объемов перевозок.

6. КО позволяет планировать формирование составов по оптимальным схемам на заданные периоды времени вплоть до года. Схемы составов остаются неизменными для каждой даты на всю глубину продажи, хотя для различных и даже соседних дат они могут отличаться в зависимости от прогнозного спроса. Это позволяет повысить эффективность динамического ценообразования в системе управления доходностью, которая удовлетворительно работает только при постоянном объеме предложения.

7. Прогнозирование вместе с последующей процедурой КО для поезда № 17/18 «Карелия» могло бы дать дополнительный финансовый результат за 2018-й год в размере свыше 200 млн руб., что составляет около 25 % от валового дохода, полученного без применения КО.

8. Возможный дополнительный финансовый результат по дерегулируемому сектору ОАО «ФПК» составляет не менее 10 млрд руб. в год.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Talluri K.T., van Ryzin G.J. The Theory and Practice of Revenue Management. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2004. 713 p.
2. Венедиктов Г.Л., Кочетков В.М. Повышение рентабельности пассажирских железнодорожных перевозок методом комплексной оптимизации // Экономика железных дорог. 2013. № 11. С. 12–24.
3. Венедиктов Г.Л., Кочетков В.М. Экономические модели повышения доходности при жестком ограничении предложения // Экономика и математические методы. 2012. Т. 48. № 1. С. 111–118.
4. Венедиктов Г.Л., Кочетков В.М. Эффективные методы прогнозирования пассажирского спроса на железнодорожном транспорте // Экономика железных дорог. 2016. № 6. С. 36–45.

5. Реализация экономико-математических моделей в автоматизированных системах управления рентабельностью пассажирских перевозок / О.Ф. Мирошниченко [и др.] // Вестник ВНИИЖТ. 2011. № 4. С. 33–39.

6. Повышение эффективности железнодорожных перевозок на базе автоматизированной системы управления рентабельностью / О.Ф. Мирошниченко [и др.] // Железнодорожный транспорт. 2011. № 12. С. 56–60.

7. Айвазян С.А., Мхитарян В.С. Прикладная статистика и основы эконометрики. М.: Юнити, 1998. 1022 с.

8. Ефимов С.М. Методика анализа факторов, определяющих спрос на пассажирские перевозки // Мир транспорта. 2015. Т. 13. № 2. С. 114–120.

9. Van Westendorp P. NSS-Price Sensitivity Meter (PSM) – A new approach to study consumer perception of price // Proceedings of the ESOMAR Congress (Venice, 5–9 September 1976). Venice, 1976. P. 139–167.

10. Time Series Analysis: Forecasting and Control / G. Box [et al.]. Fifth edition. New York: Wiley, 2015. 712 p.

11. Brockwell P.J., Davis R.A. Introduction to Time Series and Forecasting. New York: Springer, 2002. 434 p.

12. Канторович Г.Г. Анализ временных рядов // Экономический журнал Высшей школы экономики. 2002. Т. 6. № 2. С. 251–269.

13. Diebold F.X. Elements of Forecasting. [S. l.]: South-Western College Pub, 2007. P. 129–384.

14. Минашкин В.Г., Садовникова Н.А., Шмойлова Р.А. Оценка точности и надежности прогнозов [Электронный ресурс] // Бизнес-статистика и прогнозирование: учеб.-практ. пособие / Московский гос. ун-т экономики, статистики и информатики. М., 2008. Гл. 16. URL: <https://studfiles.net/preview/3490105/page:44> (дата обращения: 06.02.2020 г.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

ВЕНЕДИКТОВ Геннадий Львович,

канд. техн. наук, генеральный директор ООО «Экспресс-Л»

КОЧЕТКОВ Валерий Михайлович,

канд. физ.-мат. наук, руководитель проекта, ООО «Экспресс-Л»

Статья поступила в редакцию 29.07.2020 г., принята к публикации 21.09.2020 г.

Для цитирования: Венедиктов Г.Л., Кочетков В.М. Комплексная оптимизация эксплуатации пассажирских поездов на базе автоматизированной системы управления рентабельностью пассажирских перевозок // Вестник ВНИИЖТ. 2020. Т. 79. № 6. С. 343–350. DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2020-79-6-343-350>.

Comprehensive optimization of passenger trains operation based on an automated system for managing the profitability of passenger traffic

G. L. VENEDIKTOV, V. M. KOCHETKOV

Limited Liability Company "Ekspress-L" (LLC "Ekspress-L"), St. Petersburg, 194291, Russia

Abstract. The article is devoted to solving the problem of optimizing the tariff policy, which is relevant for the passenger complex, with the most rational use of the rolling stock. Principles of economic and mathematical modeling are presented in order to determine the optimal number of cars in passenger trains and prices for travel in a single calculation process called complex optimization. Developed models make it possible to form optimal train schemes in accordance with the predicted demand, balancing supply and demand for transportation, which, in turn, radically increases its economic efficiency. Simultaneously with finding the optimal schemes by the method of complex optimization, such fares are determined at which the balance of supply and demand is achieved with the maximum possible economic effect. The article discusses the analytical models of passenger demand, the principles of implementation of the complex optimization procedure, the problems of forecasting passenger demand and the features of calculating the forecast of demand for the example of train No. 17/18 "Karelia" on the Petrozavodsk—Moscow route, and also offers a solution to the problem of determining the optimal prices and train schemes. On the example of real data of the operation of this train, the effectiveness of the automated system for managing the profitability of passenger traffic, created on the basis of complex optimization algorithms, was evaluated. It is shown that the developed analytical models of passenger demand allow solving optimization problems that increase the efficiency of automated control systems for the economic indicators of the transportation process, and the multi-model forecasting system provides satisfactory accuracy with a high level of forecast detail. Due to the fact that the level of expenses for train jour-

neys radically affects the result of optimization of the transportation process with variable train schemes, the adopted optimization criterion takes into account both income and transportation costs. The results of calculations are presented showing that the complex optimization procedure for the "Karelia" train could give a significant additional financial result.

Keywords: passenger railway transportation; demand; economic and mathematical modeling; complex optimization; forecasting; profitability management; automated system; automated system for managing the profitability of passenger traffic (ASURPP)

DOI: <https://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2020-79-6-343-350>

REFERENCES

1. Talluri K.T., van Ryzin G.J. *The Theory and Practice of Revenue Management*. Boston, Kluwer Academic Publishers, 2004, 713 p.

2. Venediktov G.L., Kochetkov V.M. *Povyshenie rentabel'nosti passazhirskikh zheleznodorozhnykh perevozok metodom kompleksnoy optimizatsii* [Increasing the profitability of passenger railway transportation by the method of complex optimization]. Railway Economy, 2013, no. 11, pp. 12–24.

3. Venediktov G.L., Kochetkov V.M. *Ekonomicheskie modeli povysheniya dokhodnosti pri zhestkom ogranichenii predlozheniya* [Economic models of increasing profitability under strict supply constraints]. Economics and Mathematical Methods, 2012, Vol. 48, no. 1, pp. 111–118.

4. Venediktov G.L., Kochetkov V.M. *Effektivnye metody prognozirovaniya passazhirskogo sprosа na zheleznodorozhnom*

transporte [Effective methods of forecasting passenger demand on railway transport]. Railway Economy, 2016, no. 6, pp. 36–45.

5. Miroshnichenko O. F., Venediktov G. L., Kochetkov V. M., Pastukhov S. S. *Realizatsiya ekonomiko-matematicheskikh modely v avtomatizirovannykh sistemakh upravleniya rentabel'nost'yu passazhirskikh perevozok* [Implementation of economic and mathematical models in automated control systems for the profitability of passenger traffic]. Vestnik VNIIZhT [Vestnik of the Railway Research Institute], 2011, no. 4, pp. 33–39.

6. Miroshnichenko O. F., Venediktov G. L., Popov E. V. *Povyshenie effektivnosti zheleznodorozhnykh perevozok na baze avtomatizirovannoy sistemy upravleniya rentabel'nost'yu* [Improving the efficiency of railway transportation on the basis of automated profitability management system]. Zheleznodorozhnyy transport, 2011, no. 12, pp. 56–60.

7. Ayvazyan S. A., Mkhitarian V. S. *Prikladnaya statistika i osnovy ekonometriki* [Applied statistics and foundations of econometrics]. Moscow, Unit Publ., 1998, 1022 p.

8. Efimov S. M. *Metodika analiza faktorov, opredelyayushchikh spros na passazhirskie perevozki* [Method of analysis of factors determining the demand for passenger transportation]. World of Transport and Transportation, 2015, Vol. 13, no. 2, pp. 114–120.

9. Van Westendorp P. *NSS-Price Sensitivity Meter (PSM) — A new approach to study consumer perception of price*. Proceedings of the ESOMAR Congress (Venice, September 5–9, 1976). Venice, 1976, pp. 139–167.

10. Box G., Jenkins G., Reinsel G., Lyung G. *Time Series Analysis: Forecasting and Control*. Fifth edition. New York, Wiley Publ., 2015. 712 p.

11. Brockwell P. J., Davis R. A. *Introduction to Time Series and Forecasting*. New York, Springer Publ., 2002, 434 p.

12. Kantorovich G. G. *Analiz vremennykh ryadov* [Analysis of time ranges]. Higher schools of Economics economic journal, 2002, Vol. 6, no. 2, pp. 251–269.

13. Diebold F. X. *Elements of Forecasting*. [S. l.], South-Western College Pub, 2007, pp. 129–384.

14. Minashkin V. G., Sadovnikova N. A., Shmoylova R. A. *Otsenka tochnosti i nadezhnosti prognozov* [Assessment of the accuracy and reliability of forecasts]. *Biznes-statistika i prognozirovaniye: ucheb.-prakt. posobie* [Business statistics and forecasting: educational and practical manual]. Moskovskiy gos. un-t ekonomiki, statistiki i informatiki [Moscow State University of Economics, Statistics and Informatics]. Moscow, 2008, chapter 16. URL: <https://studfiles.net/preview/3490105/page:44> (retrieved on 06.02.2020) (in Russ.).

ABOUT THE AUTHORS

Gennadiy L. VENEDIKTOV,
Cand. Sci. (Eng.), General Director of LLC “Ekspress-L”

Valeriy M. KOCHETKOV,
Cand. Sci. (Phys.-Math.), Project Manager, LLC “Ekspress-L”

Received 29.07.2020

Accepted 21.09.2020

■ E-mail: gennady@konsalt.net (G. L. Venediktov)

For citation: Venediktov G. L., Kochetkov V. M. Comprehensive optimization of passenger trains operation based on an automated system for managing the profitability of passenger traffic // VNIIZHT Scientific Journal. 2020. 79 (6): 343–350 (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2020-79-6-343-350>.

ПОДПИСКА

«Вестник ВНИИЖТ» ГДЕ подписаться?

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

Подписной индекс журнала — 70116.

Также можно оформить подписку (годовую и полугодовую) на договорных условиях в редакции. Адрес редакции журнала: 129626, Москва, 3-я Мытищинская ул., д. 10, тел.: +7 (495) 602-80-37, факс: +7 (499) 262-00-70, E-mail: journal@vniizht.ru. Информация о подписке размещена на сайте журнала www.journal-vniizht.ru.

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

К вопросу выбора вертикальных и горизонтальных связей в тележке для грузовых вагонов скоростных поездов

Г. И. ГАДЖИМЕТОВ¹, Г. И. ПЕТРОВ², Ю. А. ПАНИН¹, И. Е. ИЛЬИН¹

¹ Акционерное общество «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава» (АО «ВНИКТИ»), Коломна, 140402, Россия

² Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет транспорта» (ФГАОУ ВО «РУТ» (МИИТ)), Москва, 127994, Россия

Аннотация. Для повышения конкурентных преимуществ грузоперевозок железнодорожным транспортом долгосрочной программой развития ОАО «РЖД» предусмотрено увеличение скорости движения грузовых поездов. Конструкционная скорость грузовых вагонов, эксплуатируемых в настоящее время на сети железных дорог, в основном составляет 120 км/ч, а допускаемая скорость движения ограничена 90 км/ч. Одним из возможных решений задачи является внедрение грузовых вагонов с повышенной скоростью движения. В АО «ВНИИЖТ» и АО «ВНИКТИ» проводятся теоретические и экспериментальные исследования грузового движения с повышенными скоростями, работы по выбору конструкций, разработке требований безопасности.

В 2017–2018 гг. на скоростном испытательном полигоне Белореченская—Майкоп Северо-Кавказской железной дороги специалистами АО «ВНИИЖТ» проведены ходовые испытания опытного образца вагона-платформы для перевозки контейнеров с конструкционной скоростью 160 км/ч, разработанного АО «ВНИКТИ». В конструкции вагона-платформы применена тележка, являющаяся аналогом тележки прицепных вагонов электропоездов ЭД4 и ЭД9, с подбором жесткости пружин в ступенях рессорного подвешивания для соблюдения разности уровня автосцепки от головки рельса в режимах «тара» и «брутто».

Анализ результатов ходовых испытаний позволяет определить пути совершенствования конструкции тележки. Для выбора конструктивных решений с целью обеспечения безопасности выполнен обзор исследований отечественных ученых, посвященных изучению динамических качеств железнодорожного подвижного состава при различных конструкциях экипажной части. Исследования проводились на опытных образцах подвижного состава, имеющего разные упругодиссипативные связи в системе «кузов—тележка—колесные пары». По результатам анализа определены конструкторские решения, позволяющие достичь удовлетворительных динамических качеств для грузового вагона при скорости движения до 140 км/ч. Принятые конструкторские решения апробированы по результатам теоретических исследований динамических качеств вагона-платформы с новой тележкой, проведенных методом компьютерного моделирования. Повышение гибкости рессорного подвешивания и горизонтальной связи кузова с тележкой позволило улучшить динамические качества грузового вагона. Для оценки безопасности при проведении сертификации требуется разработка стандарта, который учитывал бы особенности конструкции тележек вагонов, рассчитанных на повышенную скорость.

Ключевые слова: тележка; грузовой вагон; скоростной поезд; статический прогиб; эквивалентный маятник; динамические качества

Введение. Долгосрочной программой развития ОАО «РЖД» до 2025 года [1] предусмотрено повышение скорости движения грузовых поездов с целью сокращения времени перевозки контейнеров железнодорожным транспортом.

Эксплуатируемый в настоящее время парк грузовых вагонов комплектуется преимущественно трехэлементными тележками, скорость движения которых ограничена 90 км/ч [2, 3]. Причинами этого ограничения являются неудовлетворительные ходовые качества вагонов при высокой скорости, особенно в порожнем состоянии, и зависимость динамики движения вагона от изношенности ходовых частей тележки и геометрии рельсовой колеи [4, 5]. Еще одним основанием для ограничения скорости движения является недостаточная эффективность тормозной системы при скорости выше 90 км/ч (фактические тормозные пути не укладываются в нормативные).

В [6] для увеличения скорости движения грузовых вагонов, особенно в порожнем состоянии, предлагается применить тележки типа КВ3-И2 с жесткой рамой. Тележка типа КВ3-И2 имеет люлечное подвешивание кузова, буксовую ступень и центральную ступень рессорного подвешивания, реализованную эллиптическими рессорами конструкции Галахова. Вместе с тем тележка КВ3-И2 предназначена для вагонов с конструкционной скоростью до 120 км/ч.

В связи с этим назрела необходимость поиска новых конструктивных решений для тележек грузовых вагонов при повышении скорости движения до 140 км/ч.

Анализ динамических испытаний прототипа тележки грузового вагона на полигоне Белореченская—Майкоп. Специалистами АО «ВНИКТИ» по техническому заданию ООО «Комплексные скоростные технологии» был разработан вагон-платформа модели 13-6954 для перевозки одного контейнера длиной до 45 футов,

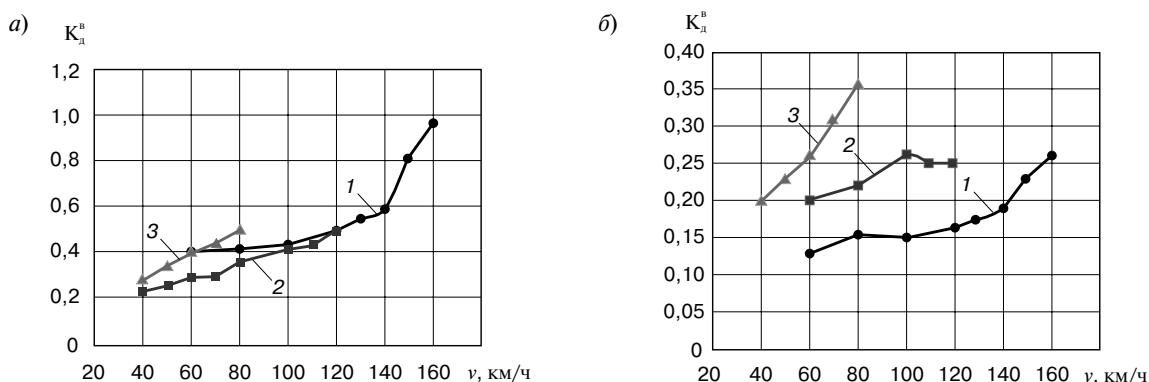


Рис. 1. Коэффициент вертикальной динамики K_d^a первой ступени рессорного подвешивания при движении в порожнем (а) и груженом (б) режимах:
1 — прямая; 2 — кривая $R = 650$ м; 3 — кривая $R = 350$ м
Fig. 1. Coefficient of vertical dynamics K_d^a of the first stage of spring suspension when driving in unloaded (a) and loaded (б) modes:
1 — tangent section; 2 — curve $R = 650$ m; 3 — curve $R = 350$ m

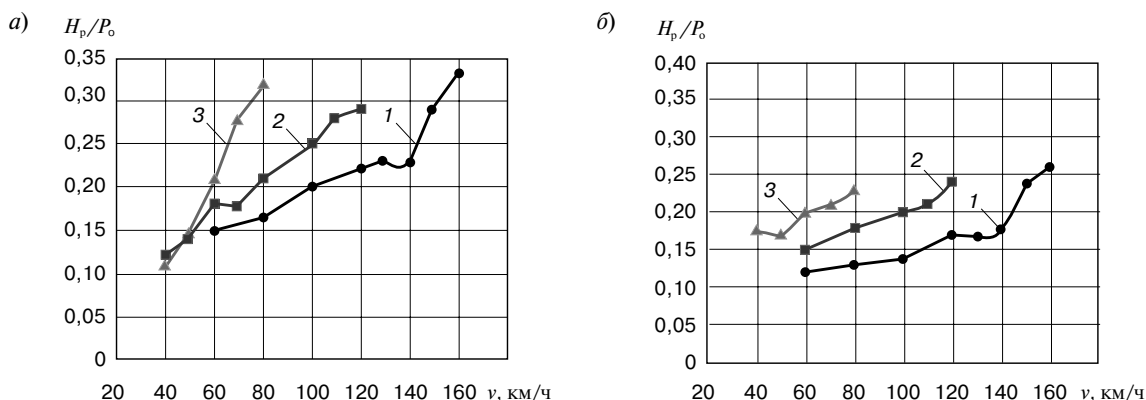


Рис. 2. Рамные силы H_p в долях от осевой нагрузки P_0 при движении в порожнем (а) и груженом (б) режимах:
1 — прямая; 2 — кривая $R = 650$ м; 3 — кривая $R = 350$ м
Fig. 2. Frame forces H_p in parts of the axle load P_0 when driving in unloaded (a) and loaded (б) modes:
1 — tangent section; 2 — curve $R = 650$ m; 3 — curve $R = 350$ m

рассчитанный на конструкционную скорость 160 км/ч [7]. На вагоне-платформе применена двухосная тележка модели 18-6960, являющаяся аналогом тележки прицепных вагонов электропоездов ЭД4 и ЭД9, в которой для обеспечения необходимой величины статического прогиба были специально подобраны пружины в буксовой и центральной ступенях рессорного подвешивания.

Для оценки динамических качеств вагона-платформы проведены ходовые испытания на скоростном испытательном полигоне Белореченская—Майкоп Северо-Кавказской железной дороги [8]. Результаты испытаний показали соответствие всех динамических качеств платформы требованиям, установленным в ГОСТ 33211–2014 [9], но только при скорости до 140 км/ч. Анализ графиков (рис. 1 и 2) показывает, что при скорости выше 140 км/ч наступает резкое ухудшение динамических качеств. Коэффициент запаса устойчивости против схода колеса с рельса K_{yc} , являющийся

одним из основных показателей, по которому оценивается безопасность движения железнодорожного подвижного состава, в порожнем режиме при скорости 140 км/ч составил 1,48 (рис. 3).

Вместе с тем по условиям проведения испытаний динамические качества должны обеспечиваться и при скоростях, превышающих конструкционную на 10 %. Так, при скорости 150 км/ч коэффициент запаса устойчивости снизился до 1,22, что ниже нормативного значения (не менее 1,3). В ходе испытаний коэффициент запаса устойчивости против схода колеса с рельса определялся по формуле [10]:

$$K_{yc} = \frac{\tan \beta - \mu \langle P_B \rangle}{1 + \mu \tan \beta \langle P_B \rangle} \geq [K_{yc}], \quad (1)$$

где β — угол наклона образующей гребня колеса к горизонтالي; μ — коэффициент трения поверхностей колеса и рельса; $\langle P_B \rangle$ — скользящее среднее

вертикальной силы от набегающего колеса на рельс, H ; $\langle P_6 \rangle$ — скользящее среднее боковой силы взаимодействия гребня набегающего колеса и рельса, H .

Из формулы (1) видно, что уровень безопасности зависит от параметров колесной пары, боковых и вертикальных сил.

Анализ результатов испытаний и формулы (1) показывает, что снижение значения K_{yc} стало следствием резкого повышения уровня вертикальной динамики и рамных сил при скорости выше 140 км/ч.

Испытания показали необходимость продолжения поиска технических решений, позволяющих снизить вертикальные и боковые динамические силы, чтобы создать тележку для скоростных грузовых вагонов с конструкционной скоростью 140 км/ч.

Данную задачу следует решать путем проведения комплекса опытно-конструкторских и научно-исследовательских работ с применением компьютерного моделирования, при помощи которого представляется возможным осуществить подбор рациональных характеристик связей колесной пары с рамой тележки, горизонтальной связи кузова с рамой тележки и характеристик рессорного подвешивания, от значений которых зависят ходовые качества вагона.

Обзор исследований по выбору упругодиссипативных связей системы «кузов—тележка—колесные пары». Горизонтальная связь колесной пары с рамой тележки. При скорости движения свыше 100 км/ч увеличивается интенсивность извилистого движения тележек, что вызывает рост динамических сил взаимодействия колес с рельсами и усиление боковых колебаний кузова [11]. Таким образом, извилистое движение вагона является одним из важнейших факторов, влияющих на ходовые качества, воздействие которого необходимо снизить.

Проведенные специалистами АО «ВНИИЖТ» исследования вагонов показали, что снижение «подвижности» колесных пар относительно рамы тележки в горизонтальной плоскости благоприятно отражается на плавности хода [11]. На рис. 4 даны показатели плавности хода в вертикальном и горизонтальном направлениях с устройством, исключаям перемещение колесных пар относительно рамы тележки в горизонтальном направлении (кривая 1), и без устройства (кривая 2). Из анализа графиков (рис. 4) следует, что оптимальной конструкцией связи колесной пары с рамой тележки является такая конструкция буксовых направляющих, которая создает в горизонтальной плоскости упругую связь с начальной затяжкой. Величина начальной затяжки устанавливается исходя из условий неизменяемости геометрии тележки в горизонтальной плоскости при движении по прямым участкам пути.

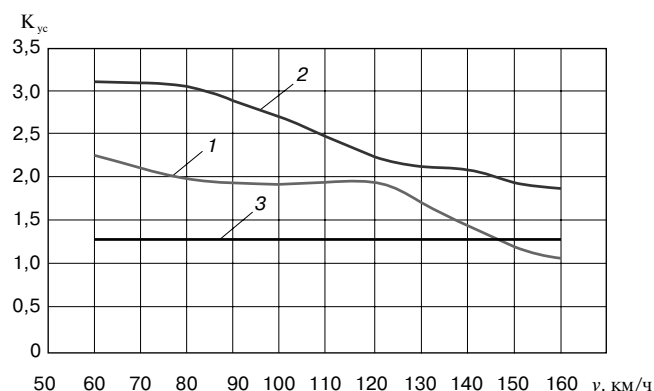


Рис. 3. Коэффициент запаса устойчивости против схода колеса с рельса K_{yc} при движении в разных режимах: 1 — порожний режим; 2 — грузный режим; 3 — норматив
Fig. 3. Coefficient of safety factor K_{yc} against wheel derailment from the rail when driving in different modes: 1 — unloaded mode; 2 — loaded mode; 3 — standard

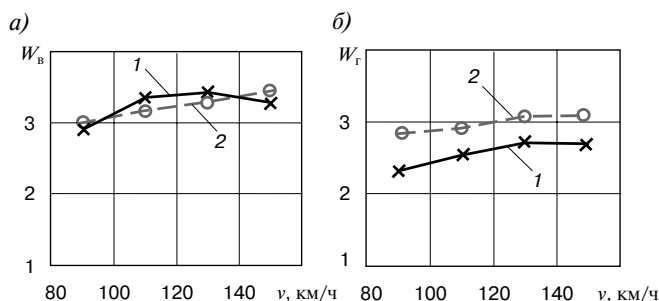


Рис. 4. Средние арифметические показатели плавности хода W по вертикальным (а) и горизонтальным (б) ускорениям: 1 — с устройством; 2 — без устройства
Fig. 4. Arithmetic mean indicators of running smoothness W for vertical (a) and horizontal (b) accelerations: 1 — with the device; 2 — without device

В стандарте на тележки пассажирских вагонов локомотивной тяги [12] величины горизонтальной жесткости связи буксы колесной пары с рамой тележки в поперечном и продольном направлениях составляют 1,5...5,0 и 1,5...35,0 МН/м соответственно.

Примером конструктивного решения буксового рессорного подвешивания, в котором реализованы результаты исследований, может служить подвешивание тележки типа КВЗ-ЦНИИ пассажирского вагона (рис. 5) [13].

Горизонтальная связь кузова с рамой тележки предназначена для передачи горизонтальных поперечных инерционных сил от кузова на рельсы и наоборот.

Исследования, проведенные специалистами АО «ВНИИЖТ» на отечественных опытных локомотивах с маятниковым и люлечным подвешиванием кузова, показали возможность достижения хороших динамических качеств при высокой скорости движения с обеспечением низкого уровня воздействия на путь в кривых [14]. По результатам исследований

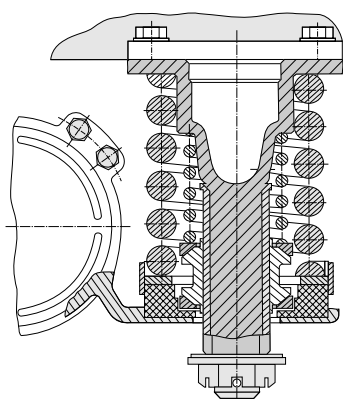


Рис. 5. Буксовое рессорное подвешивание тележек типа КВЗ-ЦНИИ

Fig. 5. Axle-box spring suspension of bogies of the KVZ-TsNII type

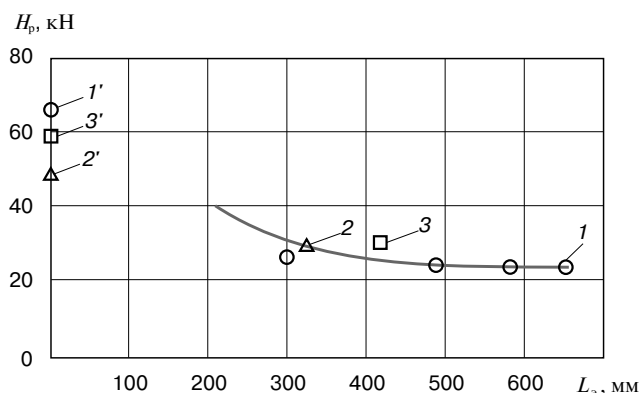


Рис. 6. Зависимость максимальных рамных сил H_p от длины эквивалентного маятника L_p :

1 — тепловоз ТЭ7-001 с экспериментальной экипажной частью, $v = 140$ км/ч; 2 — электровоз ВЛ80-003, $v = 120$ км/ч; 3 — тепловоз ТЭ50-0001, $v = 100$ км/ч; 1', 2', 3' — ТЭ7-001, ВЛ80-003 и ТЭ50-0001 при жестком шкворне

Fig. 6. Dependence of the maximum frame forces H_p on the length of the equivalent pendulum L_p :

1 — diesel locomotive TE7-001 with an experimental undercarriage, $v = 140$ km/h; 2 — electric locomotive VL80-003, $v = 120$ km/h; 3 — diesel locomotive TE50-0001, $v = 100$ km/h; 1', 2', 3' — TE7-001, VL80-003 and TE50-0001 with a rigid center pin

Нормативные минимальные значения длины эквивалентного маятника L_p [12, 15]
Standard minimum values of the length of the equivalent pendulum L_p [12, 15]

Тип вагона	Тип тележки	Длина эквивалентного маятника L_p , мм, не менее	
		ГОСТ Р 55821–2013 [12]	ГОСТ 34093–2017 [15]
Пассажирский	Люлочный	400	400
	Безлюлочный	350	
Почтовый, багажный и специальный	—	250	300

установлено, что выполнять упругую связь кузова с тележкой, жесткость которой обычно выражают длиной эквивалентного маятника L_p , менее 200 мм нецелесообразно. Влияние значения L_p на ходовые каче-

ства, выявленные в этих исследованиях, отражено на рис. 6. В таблице приведены значения L_p из стандартов [12, 15], устанавливающих требования к ходовым частям вагонов пассажирского типа.

Вертикальная связь колесной пары с рамой тележки. Для снижения динамического взаимодействия в системе «вагон—путь» колесные пары связывают с рамой тележки через рессорное подвешивание. Наиболее общей характеристикой его качества является статический прогиб. На основании анализа опытных данных получена зависимость коэффициента вертикальной динамики от скорости движения и статического прогиба [16], которая описывается следующей формулой:

$$K_d^B = 0,1 + \left(0,2 \frac{v}{f_{ст}} \right), \quad (2)$$

где v — скорость движения, км/ч; $f_{ст}$ — расчетный статический прогиб рессорного подвешивания, мм.

Из формулы (2) видно, что с увеличением статического прогиба динамические качества вагона улучшаются [16]. Повышение скорости приводит к увеличению коэффициента вертикальной динамики. Для его снижения необходимо стремиться увеличивать статический прогиб. Снижение коэффициента вертикальной динамики приведет к уменьшению разгрузки колесной пары, что, в свою очередь, благоприятно скажется на устойчивости колеса против схода с рельса. На рис. 7 приведены графики, отражающие зависимость коэффициента запаса устойчивости K_{yc} от уровня рамных сил и коэффициента вертикальной динамики. Расчеты выполнены для экипажа с нагрузкой на ось 17 тс по формуле 9.11 [10], позволяющей определять мгновенное значение K_{yc} .

При исследованиях влияния характеристик рессорного подвешивания на динамические качества локомотивов выявлено, что при равенстве величин статического прогиба и конструктивной скорости, выраженных в миллиметрах и километрах в час соответственно, наблюдается хорошая вертикальная динамика обрессоренных частей [16]. Вместе с тем следует отметить, что жесткие значения динамических качеств в локомотивах в отличие от грузовых вагонов обусловлены присутствием на нем локомотивной бригады.

Демпфирование горизонтальных и вертикальных колебаний в тележке. Для предотвращения резонансных явлений и гашения колебаний наддресорного строения при проезде подвижным составом неровностей пути совместно с рессорным подвешиванием и упругой горизонтальной связью тележки с кузовом предусматривают фрикционные или гидравлические демпферы. С целью определения потребной мощности гидравлических демпферов специалистами АО «ВНИКТИ»

проводились исследования опытных тепловозов с различным уровнем коэффициента относительного демпфирования вертикальных колебаний и колебаний отбоя [17]. По результатам исследований рекомендовано использовать в расчетах коэффициент сопротивления демпфера вертикальным деформациям упругих элементов β^B , который принимается равным 0,2...0,3 от критической величины коэффициента сопротивления демпфера $\beta_{кр}^B$, определяемой по формуле

$$\beta_{кр}^B = 2\sqrt{mc}, \quad (3)$$

где m — масса обрессоренных частей, поддерживаемая рессорным подвешиванием, кг; c — жесткость рессорного подвешивания, кН/м.

Коэффициент относительного демпфирования колебаний отбоя рекомендуется принимать равным 0,3...0,4 [17]. Аналогичные рекомендации даны в [15, 18].

Особенности проектирования рессорного подвешивания грузового вагона. При проектировании рессорного подвешивания существует ряд вопросов, несвойственных для других типов подвижного состава, которые необходимо решать в комплексе:

- наличие режимов «тара» (порожний режим) и «брутто» (груженный режим);
- соблюдение уровня автосцепки на нормированной высоте в режимах «тара» и «брутто», в том числе при эксплуатационных износах;
- компоновка рессорного комплекта, обладающего необходимым статическим прогибом в режимах «тара» и «брутто» для получения удовлетворительных ходовых качеств.

Для решения поставленных вопросов в комплексе представляется возможным применение рессорного подвешивания с билинейной или кусочно-линейной характеристикой.

В стандарте на тележки двухосные грузовых вагонов магистральных железных дорог колеи 1520 мм [19], принятом в 2004 г., минимальный статический прогиб под тарой вагона был рекомендован не менее 38 мм (сейчас действует редакция 2013 г., где установлена величина прогиба не менее 13 мм). Статический прогиб при расчетной нагрузке от колесной пары на рельсы 196 кН (20 тс), регламентированный исходя из соблюдения уровня автосцепки на нормированной высоте в режимах «тара» и «брутто», не должен превышать 70 мм. Вместе с тем, используя соответствующие конструкторские решения, позволяющие выдержать уровень автосцепки, статический прогиб можно увеличивать.

Техническое решение тележки для грузового вагона скоростного поезда. На основании анализа результатов испытаний вагона-платформы модели 13-6954 на двухосных тележках модели 18-6960 и выбора связей

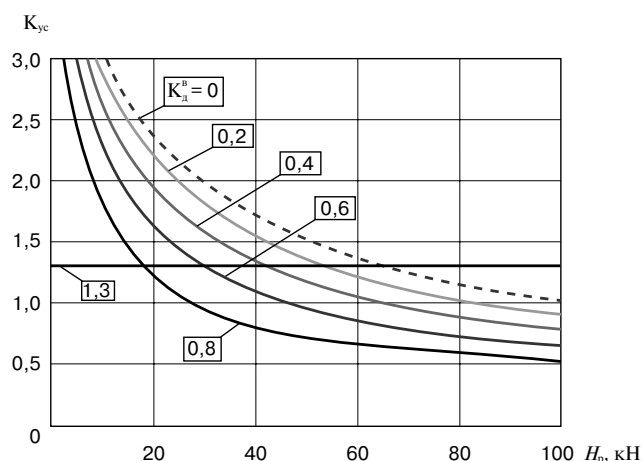


Рис. 7. Зависимость коэффициента запаса устойчивости против схода колеса с рельса K_{yc} от рамных сил H_p и коэффициента вертикальной динамики K_d^B

Fig. 7. Dependence of the safety factor of stability against derailling of the wheel from the rail K_{yc} on the frame forces H_p and the coefficient of vertical dynamics K_d^B

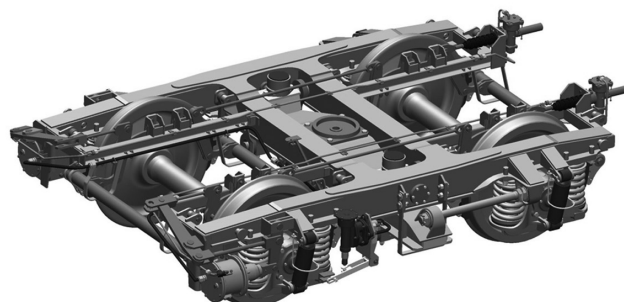


Рис. 8. Тележка модели 18-6981 для грузового вагона скоростного поезда

Fig. 8. Bogie model 18-6981 for high-speed train freight car

системы «кузов—тележка—колесные пары» разработана новая тележка оригинальной конструкции модели 18-6981, предназначенная для применения в вагонах для грузовых перевозок со скоростью до 140 км/ч (рис. 8).

Основные отличия разработанной тележки, оказывающие влияние на динамические качества, от ранее испытанной тележки модели 18-6960 следующие:

- нагрузка от шкворневого бруса на раму передается через люлечное подвешивание с наклонными подвесками;
- рессорное подвешивание буксовое, билинейное, одноступенчатое с увеличенным статическим прогибом;
- демпфирование колебаний в буксовой ступени рессорного подвешивания и в люлечном подвешивании осуществляется гидравлическими демпферами.

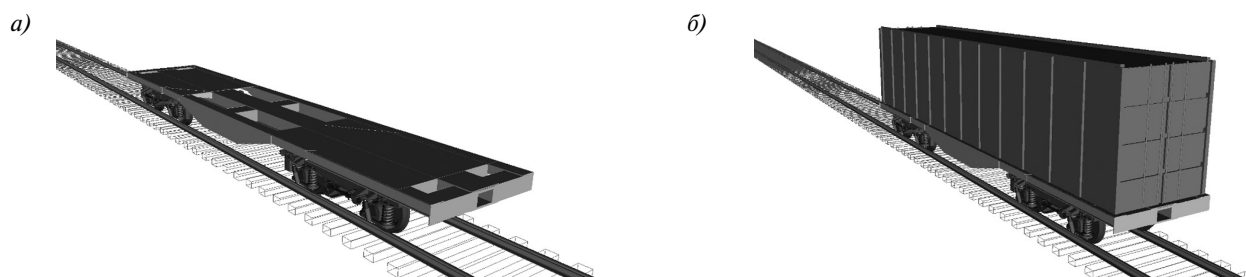


Рис. 9. Вагон-платформа модели 13-6990 в порожнем (а) и груженом (б) режимах
Fig. 9. Platform car model 13-6990 in unloaded (a) and loaded (b) modes

Теоретические исследования динамических качеств грузового вагона. Для определения динамических качеств тележки в составе вагона-платформы проведены теоретические исследования методом компьютерного моделирования в программном комплексе «Универсальный механизм». Разработана модель вагона-платформы, образованная двумя твердотельными подсистемами: 1) тележка; 2) главная рама (в груженом варианте с контейнером, при этом рама платформы и контейнер принимались за единое тело). Общий вид компьютерной модели вагона-платформы приведен на рис. 9.

Анализ результатов компьютерного моделирования показывает, что максимальное значение коэффициента вертикальной динамики в порожнем состоянии, полученное на прямом участке пути, составляет 0,59 при скорости 160 км/ч. В груженом режиме максимальное значение 0,40 зафиксировано в кривом участке пути радиусом 350 м при скорости 80 км/ч. Значения коэффициента вертикальной динамики в других условиях показаны на рис. 10.

Следует отметить, что уровень вертикальной динамики в новом проекте ниже, чем при испытаниях

вагона-платформы модели 13-6954 [8]. Определяющим фактором снижения уровня вертикальной динамики является увеличенный до 42 мм статический прогиб буксовой ступени одноступенчатого рессорного подвешивания тележки. Коэффициент вертикальной динамики соответствует оценке «хорошо» в порожнем режиме на прямом участке пути и «удовлетворительно» в груженом режиме в кривой радиусом 350 м [9].

Качество горизонтальной динамики вагона-платформы оценивалось по величине рамной силы в долях от осевой нагрузки. На рис. 11 приведены значения коэффициента горизонтальной динамики, которые в порожнем и груженом режимах соответствуют оценке «удовлетворительно» [9].

Результаты расчета коэффициента запаса устойчивости против схода колеса с рельса, выполненного по формуле (1), при одновременном действии вертикальных и горизонтальных сил показаны на рис. 12. Минимальный запас устойчивости (безопасности) зафиксирован в прямом участке кривой при скорости 160 км/ч в порожнем состоянии, и он составил 1,35, что соответствует требованию [7] (не менее 1,3).

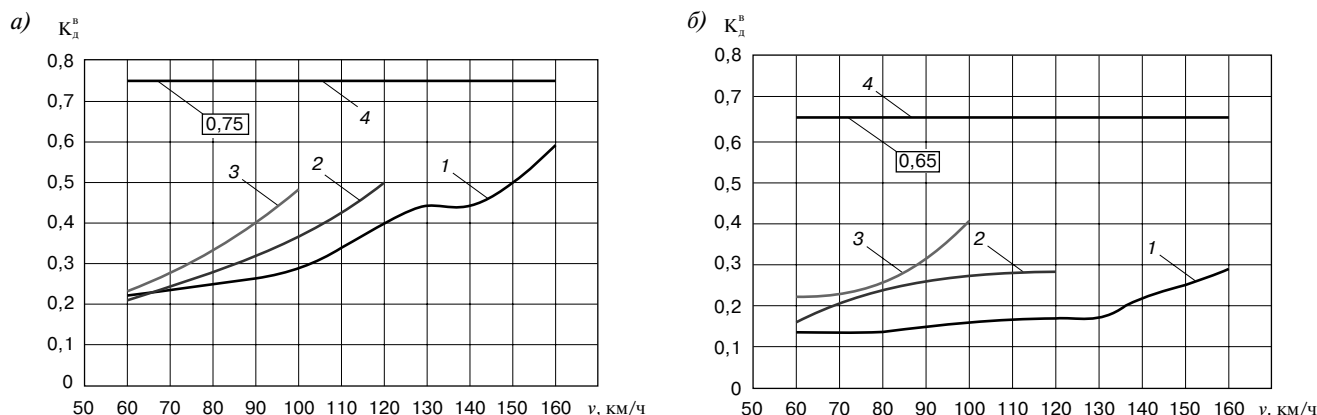


Рис. 10. Коэффициент вертикальной динамики K_v^a при моделировании движения в порожнем (а) и груженом (б) режимах:

1 — прямая; 2 — кривая $R=650$ м; 3 — кривая $R=350$ м; 4 — норматив

Fig. 10. Coefficient of vertical dynamics K_v^a when simulating driving in unloaded (a) and loaded (b) modes:

1 — tangent section; 2 — curve $R=650$ m; 3 — curve $R=350$ m; 4 — standard

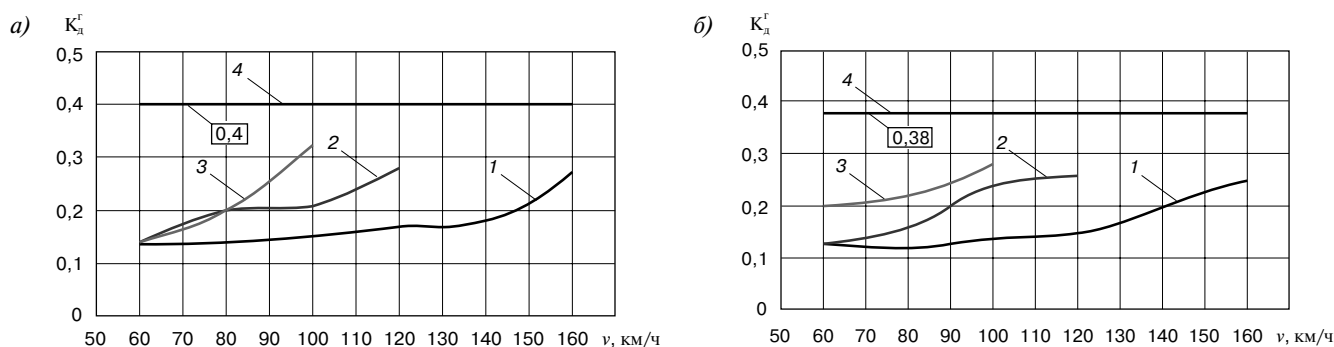


Рис. 11. Коэффициент горизонтальной динамики K_d^r при моделировании движения в порожнем (а) и груженом (б) режимах:

1 — прямая; 2 — кривая $R = 650$ м; 3 — кривая $R = 350$ м; 4 — норматив

Fig. 11. Coefficient of horizontal dynamics K_d^r when simulating driving in unloaded (a) and loaded (б) modes:

1 — tangent section; 2 — curve $R = 650$ m; 3 — curve $R = 350$ m; 4 — standard

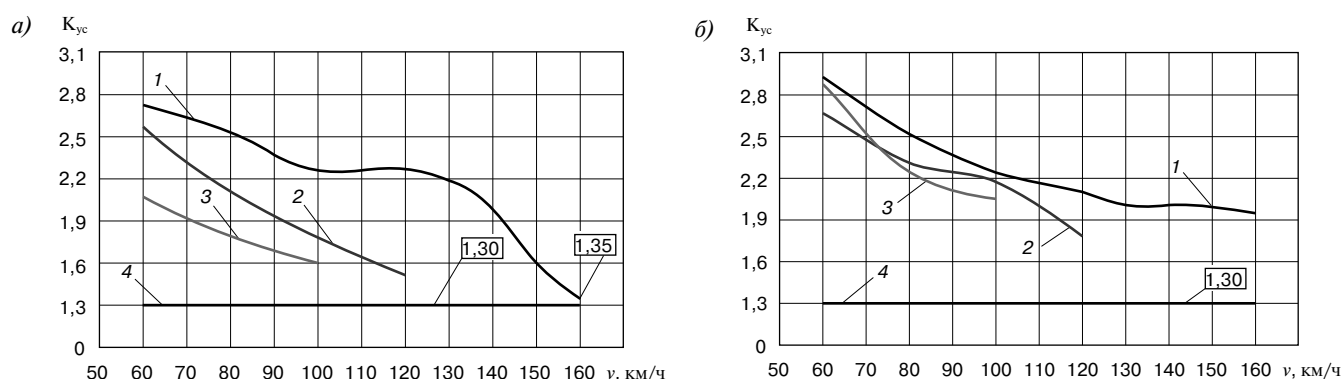


Рис. 12. Коэффициент запаса устойчивости против схода колеса с рельса K_{yc} при моделировании движения в порожнем (а) и груженом (б) режимах:

1 — прямая; 2 — кривая $R = 650$ м; 3 — кривая $R = 350$ м; 4 — норматив

Fig. 12. Coefficient of safety factor K_{yc} against wheel derailing from the rail when simulating driving in unloaded (a) and loaded (б) modes:

1 — tangent section; 2 — curve $R = 650$ m; 3 — curve $R = 350$ m; 4 — standard

Выводы. Проведенный анализ исследований по влиянию конструкторских решений на динамические качества подвижного состава и теоретические исследования вагона-платформы модели 13-6990 показывают:

- выбранные характеристики вертикальных и горизонтальных упругодиссипативных связей в тележке модели 18-6981 обеспечивают динамические качества вагона в пределах безопасных значений, установленных ГОСТ 33211–2014, при конструкционной скорости 140 км/ч, в том числе с превышением ее на 10 %;
- для снижения расстройств пути при эксплуатации грузовых вагонов со скоростью до 140 км/ч возможно применение конструкторских решений, позволяющих улучшить их динамические качества по сравнению с эксплуатируемыми грузовыми вагонами на трехэлементных тележках;
- на основании проводимых научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ необходимо разработать нормативный документ, устанавливающий технические требования к грузовым вагонам скоростных поездов и позволяющий оценить их безопасность, в том числе при проведении сертификации;

- необходимо продолжить исследования по определению динамических качеств вагона при проведении натурных испытаний на скоростном испытательном полигоне Белореченская—Майкоп, провести валидацию компьютерной модели и продолжить расчетные исследования при эксплуатационных режимах нагружения и вождения поездов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Долгосрочная программа развития открытого акционерного общества «Российские железные дороги» до 2025 года [Электронный ресурс]: утв. распоряжением Правительства Российской Федерации от 19 марта 2019 г. № 466-р. URL: <https://rulaws.ru/government/Rasporyazhenie-Pravitelstva-RF-ot-19.03.2019-N-466-r> (дата обращения: 10.06.2020 г.).
2. Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации [Электронный ресурс]: утв. приказом Министерства транспорта Российской Федерации от 21 дек. 2010 г. № 286 (с изм. и доп.). URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_110021/2ff7a8c72de3994f30496a0ccbb1ddafdadff518 (дата обращения: 10.06.2020 г.).
3. Нормы допускаемых скоростей движения подвижного состава по железнодорожным путям колеи 1520 (1524) мм

[Электронный ресурс]: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 8 нояб. 2016 г. № 2240р (ред. от 23 авг. 2018 г.). URL: cssrzd.ru/orders/2240.docx (дата обращения: 16.06.2020 г.).

4. Коссов В. С., Березин В. В., Быков В. А. Факторы устойчивости порожних вагонов // Мир транспорта. 2012. № 2. С. 168–177.

5. Певзнер В. О., Ромен Ю. С. Основы разработки нормативов содержания пути и установления скоростей движения. М.: Интекст, 2013. С. 174–197. (Сб. тр. ученых ОАО «ВНИИЖТ»).

6. Харьбин И. А., Орлова А. М., Додонов А. В. Совершенствовать ходовую часть грузовых вагонов // Вагоны и вагонное хозяйство. 2009. № 2. С. 26–29.

7. Скоростная платформа для перевозки контейнеров / В. А. Никонов [и др.] // Вагоны и вагонное хозяйство. 2017. № 2. С. 25–27.

8. Платформа для скоростных перевозок контейнеров: испытания, результаты, новые направления / М. А. Кимасов [и др.] // Вагоны и вагонное хозяйство. 2018. № 2. С. 41–43.

9. ГОСТ 33211–2014. Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам: межгос. стандарт: введен в действие в качестве нац. стандарта Российской Федерации приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 5 июня 2015 г. № 565-ст: дата введения 2016-07-01. М.: Стандартинформ, 2016. 59 с.

10. ГОСТ 33788–2016. Вагоны грузовые и пассажирские. Методы испытаний на прочность и динамические качества: межгос. стандарт: введен в действие в качестве нац. стандарта Российской Федерации приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 19 июля 2016 г. № 856-ст: дата введения 2017-05-01. М.: Стандартинформ, 2016. 50 с.

11. Долматов А. А. Динамика и основные технические требования к конструкции ходовых частей пассажирских вагонов для скорости движения до 160 км/ч // Тр. ВНИИЖТ. М.: Транспорт, 1965. Вып. 307: Исследование динамики вагонов. С. 121–137.

12. ГОСТ Р 55821–2013. Тележки пассажирских вагонов локомотивной тяги. Технические условия: нац. стандарт Российской Федерации: утв. и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 22 нояб. 2013 г. № 1755-ст: дата введения 2014-07-01. М.: Стандартинформ, 2014. 20 с.

13. Быков Б. В. Конструкция тележек грузовых и пассажирских вагонов: учеб. пособие. М.: Маршрут, 2004. 36 с.

14. Исследования динамики локомотивов / С. М. Голубятников [и др.] // Тр. ВНИИТ. Коломна, 1967. Вып. 30. С. 281–344.

15. ГОСТ 34093–2017. Вагоны пассажирские локомотивной тяги. Требования к прочности и динамическим качествам: межгос. стандарт: введен в действие в качестве нац. стандарта Российской Федерации приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 13 июня 2017 г. № 537-ст: дата введения 2018-01-01. М.: Стандартинформ, 2017. 46 с.

16. Тележные экипажи локомотивов для повышенных скоростей движения / под ред. К. П. Королева. М.: Трансжелдориздат, 1962. 304 с. (Тр. ВНИИЖТ; вып. 248).

17. Повышение надежности экипажной части тепловозов / А. И. Беляев [и др.]; под ред. Л. К. Добрынина. М.: Транспорт, 1984. 248 с.

18. Вериго М. Ф., Коган А. Я. Взаимодействие пути и подвижного состава. М.: Транспорт, 1986. 559 с.

19. ГОСТ 9246–2004. Тележки двухосные грузовых вагонов магистральных железных дорог колеи 1520 мм. Технические условия: межгос. стандарт: введен в действие в качестве нац. стандарта Российской Федерации приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии Российской Федерации от 9 фев. 2005 г. № 19-ст: дата введения 2005-07-01. М.: Изд-во стандартов, 2005. 11 с.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

ГАДЖИМЕТОВ Гаджимет Исамединович, руководитель испытательного центра, АО «ВНИКИ»

ПЕТРОВ Геннадий Иванович, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Вагоны и вагонное хозяйство», ФГАОУ ВО «РУТ» (МИИТ)

ПАНИН Юрий Алектинович, канд. техн. наук, заведующий отделом динамики, АО «ВНИКИ»

ИЛЬИН Илья Евгеньевич, заведующий лабораторией, отдел динамики, АО «ВНИКИ»

Статья поступила в редакцию 14.07.2020 г., принята к публикации 25.09.2020 г.

Для цитирования: К вопросу выбора вертикальных и горизонтальных связей в тележке для грузовых вагонов скоростных поездов / Г. И. Гаджиметов [и др.] // Вестник ВНИИЖТ. 2020. Т. 79. № 6. С. 351–359. DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2020-79-6-351-359>.

On the issue of choosing vertical and horizontal connections in a bogie for freight cars of high-speed trains

G. I. GADZHIMETOV¹, G. I. PETROV², Yu. A. PANIN¹, I. E. IL'IN¹

¹Joint Stock Company "Research and Development Institute of Rolling Stock" (JSC "VNIKT"), Kolomna, 140402, Russia

²Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Russian University of Transport" (FGAOU VO "RUT" (MIIT)), Moscow, 127994, Russia

Abstract. To increase the competitive advantages of rail freight transportation, the long-term development program of the Russian Railways provides for an increase in the speed of freight trains. The design speed of freight cars currently operating on the railway network is mainly 120 km/h, and the permitted speed is limited to 90 km/h. One of the possible solutions to the problem is the introduction of freight cars with an increased speed. At JSC "VNIKT" and JSC "VNIKT", work is being carried out on the selection of structures, the development of safety requirements, theoretical and experimental studies of freight traffic at increased speeds.

In 2017–2018 at the Belorechenskaya–Maikop high-speed test range of the North Caucasian Railway, specialists of JSC "VNIKT" carried out running tests of a prototype of a platform car for transporting containers with a design speed of 160 km/h, developed by JSC "VNIKT". In the design of the platform car, a bogie is used, which is an analogue of the bogie of trailed cars of electric trains ED4 and ED9, with the selection of the stiffness of the springs in the spring suspension steps to comply with the difference in the level of the automatic coupler from the rail head in the "container" and "gross" modes.

Analysis of the results of running tests allows determining the ways to improve the design of the bogie. To select design solutions for the purpose of ensuring safety, a review of the studies of domestic scientists aimed at studying the dynamic properties of railway rolling stock with various designs of the carriage part was carried out. Tests were carried out on prototypes of rolling stock having different elastic-dissipative connections in the “body-bogie-wheelsets” system. Based on the results of the analysis, design solutions have been determined that allow achieving satisfactory dynamic qualities for a freight car at a speed of up to 140 km/h. The adopted design solutions were tested on the basis of the results of theoretical studies of the dynamic properties of a platform car with a new bogie, carried out by the method of computer simulation. Increasing the flexibility of the spring suspension and the horizontal connection of the body with the bogie made it possible to improve the dynamic qualities of freight cars. To assess the safety during certification, it is required to develop a standard that would take into account the design features of car bogies, designed for increased speed.

Keywords: bogie; freight car; high-speed train; static deflection; equivalent pendulum; dynamic qualities

DOI: <https://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2020-79-6-351-359>

REFERENCES

1. Long-term development program of the JSC “Russian Railways” until 2025. Approved by order of the Government of the Russian Federation dated March 19, 2019 No. 466-r. URL: <https://rulings.ru/government/Rasporyazhenie-Pravitelstva-RF-ot-19.03.2019-N-466-r> (retrieved on 10.06.2020) (in Russ.).
2. Rules for the technical operation of the railways of the Russian Federation. Approved by order of the Ministry of Transport of the Russian Federation dated December 21, 2010 No. 286 (with amendments and additions). URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_1100212f7a8c72de3994f30496a0ccbb1dda fdaddf518 (retrieved on 10.06.2020) (in Russ.).
3. Norms of permissible operation speeds of rolling stock on railway tracks of 1520 (1524) mm gauge. Approved by order of the JSC “Russian Railways” dated November 8, 2016 No. 2240r (as amended dated August 23, 2018). URL: cssrd.ru/orders/2240.docx (retrieved on 16.06.2020) (in Russ.).
4. Kossov V. S., Berezin V. V., Bykov V. A. Stability factors of empty cars. World of Transport and Transportation, 2012, no. 2, pp. 168–177.
5. Pevzner V. O., Romen Yu. S. Fundamentals of developing track maintenance standards and establishing operation speeds. Moscow, Intext Publ., 2013, pp. 174–197.
6. Kharybin I. A., Orlova A. M., Dodonov A. V. Improve running gear of freight cars. Vagony i vagonnoe khozyaystvo, 2009, no. 2, pp. 26–29.
7. Nikonov V. A., Meshcherin Yu. V., Kimasov M. A., Shcheklein N. I., Konurov V. A. High-speed platform for the transportation of containers. Vagony i vagonnoe khozyaystvo, 2017, no. 2, pp. 25–27.
8. Kimasov M. A., Shcheklein N. I., Nazarov I. V., Gorskiy D. V., Krasnobayev O. A., Nikonov V. A., Meshcherin Yu. V., Zubkov V. F. Platform for high-speed container transportation: tests, results, new directions. Vagony i vagonnoe khozyaystvo, 2018, no. 2, pp. 41–43.
9. GOST 33211–2014. Freight wagons. Requirements to structural strength and dynamic qualities. Interstate standard, put into effect as national standard of the Russian Federation by order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology dated

June 5, 2015 No. 565-st. Moscow, Standartinform Publ., 2016, 59 p. (in Russ.).

10. GOST 33788–2016. Freight and passenger cars. Test methods for strength and dynamic qualities. Interstate standard, put into effect as national standard of the Russian Federation by order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology dated July 19, 2016 No. 856-st. Moscow, Standartinform Publ., 2016, 50 p.

11. Dolmatov A. A. Dynamics and basic technical requirements for the design of undercarriage of passenger cars for a speed of up to 160 km/h. Proceedings of the VNIIZhT. Moscow, Transport Publ., 1965, no. 307, pp. 121–137.

12. GOST R 55821–2013. Bogies of passenger cars on locomotive traction. Specifications. National standard of the Russian Federation. Approved and put into effect by order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology dated November 22, 2013 No. 1755-st. Moscow, Standartinform Publ., 2014, 20 p. (in Russ.).

13. Bykov B. V. Konstruktsiya telezhek gruzovykh i passazhirskikh vagonov. Ucheb. posobie [Design of bogies for freight and passenger cars. Textbook]. Moscow, Marshrut Publ., 2004, 36 p.

14. Golubyatnikov S. M., Dobrynin L. K., Kokorev A. I., Ly-sak V. A., Fomin E. P., Evstratov A. S., Grigor'yev N. I., Savushkin S. S., Nagornyy B. V. Issledovaniya dinamiki lokomotivov. Trudy VNITI [Studies of the dynamics of locomotives. Proceedings of the VNITI]. Kolomna, 1967, no. 30, pp. 281–344.

15. GOST 34093–2017. Passenger cars on locomotive traction. Requirements for structural strength and dynamic qualities. Interstate standard, put into effect as national standard of the Russian Federation by order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology dated June 13, 2017 No. 537-st. Moscow, Standartinform Publ., 2017, 46 p. (in Russ.).

16. Korolev K. P. Telezhechnye ekipazhi lokomotivov dlya povyshennykh skorostey dvizheniya [Bogie carriages of locomotives for increased speeds]. Trudy VNIIZhT; vyp. 248 [Proceedings of the VNIIZhT, no. 248]. Moscow, Transzheldorizdat Publ., 1962, 304 p.

17. Belyaev A. I., Bunin B. B., Golubyatnikov S. M., Dobrynin L. K. Improving the reliability of the undercarriage of diesel locomotives. Moscow, Transport Publ., 1984, 248 p.

18. Verigo M. F., Kogan A. Ya. Interaction of track and rolling stock. Moscow, Transport Publ., 1986, 559 p.

19. GOST 9246–2004. Four-wheel bogies of freight cars for 1520 mm gauge mainline railways. Specifications. Interstate standard, put into effect as national standard of the Russian Federation by order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology of the Russian Federation dated February 9, 2005 No. 19-st. Moscow, IPK Publishing house of standards, 2005, 11 p. (in Russ.).

ABOUT THE AUTHORS

Gadzhimet I. GADZHIMETOV,
Head of the Test Center, JSC “VNIKT”

Gennadiy I. PETROV,
Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department “Cars and Car Facilities”, FGAOU VO “RUT” (MIIT)

Yuriy A. PANIN,
Cand. Sci. (Eng.), Head of the Department of Dynamics, JSC “VNIKT”

Il'ya E. IL'IN,
Head of the Laboratory, Department of Dynamics, JSC “VNIKT”

Received 14.07.2020

Accepted 25.09.2020

■ E-mail: gajimetov-gi@vnikti.com (G. I. Gadzhimetov)

For citation: Gadzhimetov G. I., Petrov G. I., Panin Yu. A., Il'in I. E. On the issue of choosing vertical and horizontal connections in a bogie for freight cars of high-speed trains // VNIIZHT Scientific Journal. 2020. 79 (6): 351–359 (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2020-79-6-351-359>.

Выбор специального транспортного средства для перевозки скоропортящихся грузов по железной дороге

Т. И. НАБАТЧИКОВА¹, С. Н. НАУМЕНКО², А. В. КОСТИН¹, Г. Б. ГУСЕВ¹

¹Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет транспорта» (ФГАОУ ВО «РУТ» (МИИТ)), Москва, 127994, Россия

²Акционерное общество «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (АО «ВНИИЖТ»), Москва, 129626, Россия

Аннотация. Важную роль в доставке скоропортящихся грузов с сохранением их исходных качеств играет правильность выбора специального транспортного средства, а также точность оценки предельного срока перевозки. Согласно требованиям Правил перевозок железнодорожным транспортом скоропортящихся грузов все специальные транспортные средства в срок до 1 января 2022 г. должны получить свидетельства о соответствии нормам, установленным Соглашением о международных перевозках скоропортящихся пищевых продуктов и о специальных транспортных средствах, предназначенных для этих перевозок. Данное требование распространяется на специальные транспортные средства, применяемые как при международном сообщении, так и для перевозки скоропортящихся грузов внутри страны.

В статье представлена краткая классификация специальных транспортных средств, используемых для перевозки скоропортящихся грузов. Приведены формулы, позволяющие рассчитать длительность перевозки таких грузов и среднюю температуру наружного воздуха на всем пути следования. Разработан порядок выбора специального транспортного средства при уже известной длительности транспортировки груза. Сделан вывод, что предлагаемый авторами порядок действий позволяет выбрать оптимальное специальное транспортное средство для перевозки скоропортящихся грузов. Использование данной последовательности расчета дает возможность учесть максимальное количество внешних факторов, оказывающих влияние на длительность перевозки.

Ключевые слова: длительность перевозки скоропортящихся грузов; изотермическое транспортное средство; специальное транспортное средство; коэффициент теплопередачи; средняя температура наружного воздуха; порядок выбора

Введение. Доставка скоропортящихся грузов с исходным качеством в значительной мере зависит от выбора специального транспортного средства и верности расчета времени доставки потребителю.

4 марта 2019 г. были утверждены Правила перевозок железнодорожным транспортом скоропортящихся грузов [1]. В них указано, что все специальные транспортные средства в срок до 1 января 2022 г. должны получить свидетельства о соответствии нормам, установленным Соглашением о международных перевозках скоропортящихся пищевых продуктов и о специальных транспортных средствах, предназначенных

для этих перевозок (СПС) [2]. Данное Соглашение действует с 1970 г., в нем состоит 50 стран, включая США. Распоряжением Правительства Российской Федерации от 08.06.2001 г. № 788-р при допуске специальных транспортных средств для перевозки скоропортящихся грузов обязательно выполнение требований СПС. Требование об обязательном наличии свидетельства распространяется на специальные транспортные средства (СТС), применяемые как при международном сообщении, так и для перевозки скоропортящихся грузов (СПГ) внутри страны.

Обзор существующего парка СТС и методов оценки коэффициента теплопередачи кузова. На данный момент при международных перевозках скоропортящихся пищевых продуктов «изотермическими транспортными средствами», «ледниками», «рефрижераторами» или «отапливаемыми транспортными средствами» специальными транспортными средствами могут считаться только те, которые удовлетворяют определениям и нормам, указанным в приложении 1 к СПС.

В связи с тем, что парк специальных транспортных средств непрерывно обновляется и на рынке перевозок появляются новые технологии, регулярно подвергаются корректировке и совершенствуются на ежегодных заседаниях Комитета по внутреннему транспорту Европейской экономической комиссии ООН теплотехнические нормативы, изложенные в СПС.

Исходя из требований СПС [2] изотермические транспортные средства (вагоны, контейнеры для доставки тарно-штучных и насыпных грузов и цистерны для доставки жидких грузов наливом) делятся на две категории:

а) обычные — имеющие коэффициент теплопередачи меньше $0,7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$;

б) с усиленной изоляцией — имеющие коэффициент теплопередачи меньше $0,4 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

Помимо этого, транспортные средства-рефрижераторы подразделяются на ряд классов в зависимости от температуры, которую они способны поддерживать

■ E-mail: naumenko.sergey@vniizht.ru (С. Н. Науменко)

внутри кузова при наружной температуре, равной $+30^{\circ}\text{C}$. Данная классификация представлена в таблице.

Коэффициент теплопередачи K транспортных средств классов В, С, Е и F не должен превышать $0,4 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

К отопляемым транспортным средствам относятся изотермические транспортные средства, позволяющие повышать внутреннюю температуру порожнего кузова и затем поддерживать ее без дополнительного поступления тепла в течение по меньшей мере 12 ч на практически постоянном уровне (не ниже $+12^{\circ}\text{C}$). Возможность реализации данного условия в зависимости от наружной температуры разделяет отопляемые транспортные средства на следующие классы:

- -10°C для отопляемого транспортного средства класса А;
- -20°C для отопляемого транспортного средства класса В;
- -30°C для отопляемого транспортного средства класса С;
- -40°C для отопляемого транспортного средства класса D.

При этом коэффициент теплопередачи K отопляемых транспортных средств класса В (как и транспортных средств-рефрижераторов (ТСР) классов В, С, Е и F) должен быть меньше $0,4 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

К транспортному средству-леднику относят изотермическое транспортное средство, которое при помощи источника холода (естественного льда с добавлением или без добавления соли, эвтектических плит, сухого льда с приспособлением, позволяющим регулировать его сублимацию, или без такового и т. д.), не являющегося механической или «абсорбционной» установкой, позволяет понижать температуру внутри порожнего кузова и поддерживать ее затем при средней наружной температуре $+30^{\circ}\text{C}$:

- на уровне не более $+7^{\circ}\text{C}$ для класса А;
- на уровне не более -10°C для класса В;
- на уровне не более -20°C для класса С;
- на уровне не более 0°C для класса D.

В соответствии с СПС проводится проверка эффективности термического оборудования отопляемых транспортных средств и ТСР, находящихся в эксплуатации.

Указанные требования являются обязательными для стран — участников СПС. Выполнение данных требований жестко контролируется посредством ежегодного их рассмотрения Комитетом по внутреннему транспорту сторон СПС.

Перевозка жидких грузов наливом может также осуществляться во флекситанках — полимерных мягких контейнерах, предназначенных для транспортировки неопасных жидких пищевых и наливных грузов. В случае необходимости флекситанк может быть помещен внутрь изотермического контейнера или вагона.

Классификация транспортных средств-рефрижераторов
Refrigerated vehicle classification

№ п/п	Класс	Значение температуры внутри кузова, $^{\circ}\text{C}$
1	A	в диапазоне от $+12$ до 0 включительно
2	B	в диапазоне от $+12$ до -10 включительно
3	C	в диапазоне от $+12$ до -20 включительно
4	D	не больше 0
5	E	не больше -10
6	F	не больше -20

При перевозке грузов в условиях, соответствующих или близких к условиям хранения груза, могут быть использованы обычные утепленные крытые вагоны с K , равным $0,7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, или обычные крытые вагоны без тепловой изоляции.

Одна из главных проблем, возникающих при организации перевозки СПГ по железным дорогам, — правильный выбор транспортного средства и точный расчет предельного срока перевозки груза.

Коэффициент теплопередачи является одной из важнейших характеристик любого вагона, предназначенного для транспортировки СПГ. Как правило, эта характеристика определяется экспериментально для большинства ТС [3, 4, 5, 6, 7].

На данный момент разработан ряд методов оценки коэффициента теплопередачи кузова ТС.

Эти методы условно можно разделить на следующие группы:

1. Метод равновесного режима, основанный на подогреве воздуха внутри ТС.
2. Метод равновесного режима, основанный на охлаждении воздуха внутри ТС.
3. Метод неравновесного режима, основанный на подогреве воздуха внутри ТС.
4. Метод неравновесного режима, основанный на охлаждении воздуха внутри ТС.

Следует отметить, что каждый из них имеет как свои преимущества, так и свои недостатки.

Методика учета внешних факторов, влияющих на длительность перевозки СПГ. Время доставки СПГ может быть оценено из следующего дифференциального уравнения, которое записано для теплового потока, направленного внутрь изотермического транспортного средства (например, перевозка замороженных продуктов в летнее время):

$$(m_r c_r + m_b c_b) \frac{dt_r}{dt} = K_{тр} F (t_n - t_r), \quad (1)$$

где m_r , m_b — масса груза (с учетом тары) и воздуха в изотермическом транспортном средстве, кг; c_r , c_b — удельные массовые теплоемкости груза (с учетом тары) и воздуха в изотермическом транспортном средстве, Дж/(кг·К); t_r — температура воздуха и груза в изотермическом транспортном средстве, $^{\circ}\text{C}$;

t_n — температура наружного воздуха, °C; τ — время, с; $K_{тр}$ — коэффициент теплопередачи ограждающих конструкций изотермического транспортного средства во время перевозки, Вт/(м²·K); F — площадь поверхности ограждающих конструкций изотермического транспортного средства, м².

Решая уравнение, получим следующее выражение:

$$\int_{t_0}^{t_{\max}} \frac{m_t c_t + m_b c_b}{F(t_n - t_r)} dt_r = K_{тр} \int_0^{\tau_{\max}} d\tau, \quad (2)$$

где $t_{\max}$ — максимальная температура, до которой может нагреться груз, °C; $\tau_{\max}$ — время, в течение которого это произойдет (максимальное время доставки груза), с; t_0 — начальная температура груза (после погрузки), °C.

Температуру наружного воздуха определяем как осредненную по времени прохождения грузом регионов τ_i с различной наружной температурой t_{ni} :

$$t_n = \left[\sum_{i=1}^n t_{ni} \tau_i \right] / \tau_{\max}, \quad (3)$$

где n — количество отрезков пути доставки груза с различными наружными температурами t_{ni} .

После решения уравнения (1) можно получить следующую зависимость:

$$\tau_{\max} = \frac{m_t c_t + m_b c_b}{K_{тр} F} \ln \frac{t_n - t_0}{t_n - t_{\max}}. \quad (4)$$

Эта зависимость позволяет подобрать изотермическое транспортное средство (по коэффициенту теплопередачи во время перевозки) или оценить предельный срок доставки скоропортящегося груза в имеющемся парке вагонов.

При перевозке жидких грузов наливом в изотермической цистерне или флекситанке ввиду отсутствия в них воздуха уравнение (4) записывается как

$$\tau_{\max} = \frac{m_t c_t}{K_{тр} F} \ln \frac{t_n - t_0}{t_n - t_{\max}}. \quad (5)$$

Необходимо отметить, что коэффициент теплопередачи, полученный при проведении теплотехнических испытаний вагона в соответствии с требованиями СПС, и коэффициент теплопередачи вагона при доставке груза потребителю отличаются друг от друга. Это объясняется тем, что расчет предельно допустимых сроков перевозки СПГ основан на значениях теплотехнических характеристик кузова изотермического транспортного средства, определенных в стационарных условиях цеха. При этом не учитываются реальные внешние факторы (температура наружного воздуха, скорость движения поезда), существенно влияющие на эти характеристики. Предварительные расчеты показывают, что при учете внешних факторов предельные сроки перевозки в зависимости от ее длительности могут быть скорректированы на

3–10 % по отношению к расчету по действующей методике [8].

Для корректировки $K_{тр}$ в зависимости от скорости движения СТС нужно использовать следующее выражение:

$$K_{тр} = \left[\sum_{i=1}^n K_{три} \tau_i \right] / \tau_{\max}, \quad (6)$$

где $K_{три}$ — коэффициент теплопередачи ограждающих конструкций изотермического транспортного средства при его движении с постоянной скоростью w_i за время τ_i . Для его расчета можно воспользоваться зависимостями, описанными в [9].

Влияние солнечной радиации на тепловой режим в вагоне подробно описано в [9, 10] и в используемых на данный момент методиках расчета при выборе транспортного средства и определении времени доставки груза практически не учитывается. При оценке интенсивности прямой солнечной радиации рекомендуется использовать формулу Кастрова—Савинова [10]. Условное повышение наружной температуры, учитывающее тепловое воздействие солнечной радиации $\Delta t_{рад}$, может быть найдено из соотношения

$$\Delta t_{рад} = \frac{\rho}{\alpha_n} (I_{кр} \bar{H}_{кр} + I_{ст} \bar{H}_{ст}), \quad (7)$$

где $I_{кр}$, $I_{ст}$ — полная интенсивность солнечной радиации на крыше и одной из боковых стен вагона; $\bar{H}_{кр}$, $\bar{H}_{ст}$ — относительные доли поверхностей крыши и боковой стены в общей площади наружной поверхности вагона; ρ — коэффициент поглощения солнечных лучей поверхностью ограждения вагона (при расчетах обычно принимается равным 0,7); α_n — коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности ограждающих конструкций СПС в окружающую среду.

По результатам расчетов величина $\Delta t_{рад}$ может составлять до 15 °C.

В общем виде учесть влияние инсоляции можно следующим образом:

$$\overline{\Delta t_{рад}} = \left[\sum_{j=1}^n \Delta t_{раdj} \tau_j \right] / \tau_{\max}, \quad (8)$$

где $\Delta t_{раdj}$ — условное повышение наружной температуры, вычисленное по формуле (7) для одинаковой интенсивности солнечной радиации, °C; τ_j — время, при котором сохраняется одинаковая интенсивность солнечной радиации.

Тогда зависимость для определения расчетной температуры наружного воздуха примет вид

$$t_n = \left[\sum_{i=1}^n t_{ni} \tau_i \right] / \tau_{\max} + \overline{\Delta t_{рад}}. \quad (9)$$

Также ее можно записать следующим образом:

$$t_n = \left(\left[\sum_1^n t_{ni} \tau_i \right] + \left[\sum_1^n \Delta t_{rad} \tau_j \right] \right) / \tau_{max}. \quad (10)$$

Следует отметить, что в ночное время или при пасмурной погоде условное повышение температуры равно 0.

Необходимо также учитывать, что при увеличении скорости поезда, с одной стороны, растет коэффициент теплоотдачи на наружной стороне вагона, а с другой стороны — ослабляется влияние солнечной радиации [9].

Порядок выбора СТС. При заданном времени доставки груза и необходимости выбора СТС рекомендуется следующий порядок действий:

1. Разбить маршрут на участки с t_{ni} и продолжительностью движения τ_i .
2. По формуле (3) определить t_n среднее.
3. На основании метеоданных найти $I_{кр}$, $I_{ст}$ и τ_j .
4. По формуле (8) рассчитать Δt_{rad} среднее.
5. Определить расчетную температуру наружного воздуха t_n по формуле (10).
6. Определить промежутки времени движения τ_i по маршруту следования со скоростью w_i .
7. Рассчитать время простоя груза при t_{ni} .
8. Определить α_{ni} при w_i . Зависимости для них были даны в [9].
9. Рассчитать максимальную величину $K_{тр max}$ по формуле (4) или формуле (5). Это базовая величина коэффициента теплопередачи для выбора транспортного средства.
10. Выбрать СТС на основании $K < K_{тр}$.
11. На основании значения K , полученного при теплотехнических испытаниях, для выбранного СТС определить среднее термическое сопротивление ограждающих конструкций $\left(\sum \frac{\delta_i}{\lambda_i} \right)$ и коэффициент теплоотдачи от воздуха внутри СТС к его стенке.

12. Рассчитать $K_{тр}$. Методика расчета подробно описана в [9].

13. Рассчитать $K_{тр}$ по формуле (6).

14. Сравнить $K_{тр}$, полученный по формуле (6), с $K_{тр max}$, полученным по формуле (4) или формуле (5), см. п. 9. Если $K_{тр} > K_{тр max}$, выбрать другое СТС (повторить действия начиная с п. 10), если $K_{тр} \leq K_{тр max}$, данное СТС подходит для перевозки грузов, выбор СТС окончен.

Выводы. Разработанный порядок действий позволяет выбрать оптимальное специальное транспортное средство для перевозки СПГ.

Использование представленной последовательности расчета дает возможность учесть максимальное количество внешних факторов, оказывающих влияние на длительность перевозки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила перевозок железнодорожным транспортом скоропортящихся грузов [Электронный ресурс] / Министерство транспорта Российской Федерации, 4 марта 2019 г. URL: <http://docs.cntd.ru/document/553937031> (дата обращения: 25.07.2020 г.).
2. Соглашение о международных перевозках скоропортящихся пищевых продуктов и о специальных транспортных средствах, предназначенных для этих перевозок (СПС) [Электронный ресурс] / ООН. Нью-Йорк; Женева, 2015. URL: <http://docs.cntd.ru/document/902076335> (дата обращения: 25.07.2020 г.).
3. ГОСТ 33661–2015. Ограждающие конструкции помещений железнодорожного подвижного состава. Методы испытаний по определению теплотехнических показателей [Электронный ресурс]: дата введения 2016–10–01. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200130100> (дата обращения: 25.07.2020 г.).
4. Теймуразов Н.С., Науменко С.Н. Ускоренные методы оценки коэффициента теплопередачи кузовов изотермических транспортных средств // Вестник ВНИИЖТ. 2009. № 5. С. 18–21.
5. Голубин А.А., Набатчикова Т.И., Науменко С.Н. Технология автоматизированного расчета коэффициента теплопередачи кузова транспортного средства с использованием удаленного сервера // Вестник ВНИИЖТ. 2019. Т. 78. № 4. С. 227–232. DOI: <https://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2019-78-4-227-232>.
6. Давыдов Д.О. Методика расчета общего коэффициента теплопередачи кузова специального транспортного средства для перевозки скоропортящихся грузов // Вестник ВНИИЖТ. 2019. Т. 78. № 4. С. 249–256. DOI: <https://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2019-78-4-249-256>.
7. Давыдов Д.О. Методика проведения испытаний по определению изотермических свойств кузова грузовых вагонов, предназначенных для перевозок скоропортящихся грузов, в условиях отсутствия специализированной климатической камеры // Вестник ВНИИЖТ. 2020. Т. 79. № 3. С. 171–179. DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2020-79-3-171-179>.
8. Типовая методика по установлению температурных режимов и предельных сроков перевозки ОАО «РЖД» новых видов скоропортящихся грузов в изотермических транспортных средствах, кроме изотермических цистерн и контейнеров-цистерн, на особых условиях: утв. вице-президентом ОАО «РЖД» от 04.12.2012 г. № 355.
9. Набатчикова Т.И., Науменко С.Н., Гусев Г.Б. О влиянии внешних факторов на коэффициент теплопередачи кузова специализированного транспортного средства для перевозки скоропортящихся грузов // Вестник ВНИИЖТ. 2020. Т. 79. № 2. С. 88–92. DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2020-79-2-88-92>.
10. Бартош Е.Т. Энергетика изотермического подвижного состава. М.: Транспорт, 1976. 304 с.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

НАБАТЧИКОВА Татьяна Игоревна, аспирант, кафедра «Теплоэнергетика железнодорожного транспорта», ФГАОУ ВО «РУТ» (МИИТ)

НАУМЕНКО Сергей Николаевич, д-р техн. наук, начальник отдела Центра электрификации и теплоэнергетики (ЦЭТ), АО «ВНИИЖТ»

КОСТИН Александр Владимирович, канд. техн. наук, доцент, кафедра «Теплоэнергетика железнодорожного транспорта», ФГАОУ ВО «РУТ» (МИИТ)

ГУСЕВ Глеб Борисович, канд. техн. наук, доцент, кафедра «Теплоэнергетика железнодорожного транспорта», ФГАОУ ВО «РУТ» (МИИТ)

Статья поступила в редакцию 27.07.2020 г., актуализирована 25.10.2020 г., принята к публикации 16.11.2020 г.

Для цитирования: Выбор специального транспортного средства для перевозки скоропортящихся грузов по железной дороге / Т. И. Набатчикова [и др.] // Вестник ВНИИЖТ. 2020. Т. 79. № 6. С. 360–364. DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2020-79-6-360-364>.

Selection of special vehicle for transportation of perishable freights by rail

T. I. NABATCHIKOVA¹, S. N. NAUMENKO², A. V. KOSTIN¹, G. B. GUSEV¹

¹ Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Russian University of Transport" (FGAOU VO "RUT" (MIIT)), Moscow, 127994, Russia

² Joint Stock Company "Railway Research Institute" (JSC "VNIIZHT"), Moscow, 129626, Russia

Abstract. Delivery of perishable freights in proper quality essentially depends on the correct choice of a special vehicle and the correct calculation of the delivery time. According to the requirements of the Rules for the transportation of perishable freights by rail, all special vehicles by January 1, 2022 must obtain certificates of compliance with the standards established by the Agreement on the International Transportation of Perishable Foodstuffs and on special vehicles intended for these transports. This requirement applies to special vehicles used both in international traffic and for transport of perishable freights within the country.

The article presents a brief classification of special vehicles used for the transportation of perishable freights. Formulas are given that allow calculating duration of transportation of such freights and average temperature of the outside air along the entire route. Procedure for choosing a special vehicle for the already known duration of freight transportation has been developed. It is concluded that the procedure proposed by the authors allows choosing the optimal special vehicle for the transportation of perishable freights. Using this sequence of calculations makes it possible to take into account the maximum number of external factors that affect the duration of transportation.

Keywords: duration of transportation of perishable freights; isothermal vehicle; special vehicle; heat transfer coefficient; average outside temperature; order of selection

DOI: <https://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2020-79-6-360-364>

REFERENCES

1. Rules for transportation of perishable freights by railways. Ministry of Transport of the Russian Federation, March 4, 2019. URL: <http://docs.cntd.ru/document/553937031> (retrieved on 25.07.2020) (in Russ.).
2. Agreement on the international transport of perishable foodstuffs and on special vehicles intended for this transportation (ATP). UN. New York; Geneva, 2015. URL: <http://docs.cntd.ru/document/902076335> (retrieved on 25.07.2020) (in Russ.).
3. GOST 33661–2015. Protecting constructions of the railway rolling stock premises. Test methods for determining the thermal technical indicators. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200130100> (retrieved on 25.07.2020) (in Russ.).
4. Teymurazov N. S., Naumenko S. N. Accelerated methods for assessing the heat transfer coefficient of bodies of isothermal vehicles. Vestnik of the Railway Research Institute, 2009, no. 5, pp. 18–21.
5. Golubin A. A., Nabatchikova T. I., Naumenko S. N. Automated analysis technology for the transport superstructure heat transfer coefficient using a remote server. Vestnik of the Railway Research

Institute, 2019, Vol. 78, no. 4, pp. 227–232. DOI: <https://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2019-78-4-227-232>.

6. Davydov D. O. Calculation method for the overall heat-transfer coefficient of a technical transport superstructure for perishables in traffic. Vestnik of the Railway Research Institute, 2019, Vol. 78, no. 4, pp. 249–256. DOI: <https://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2019-78-4-249-256>.

7. Davydov D. O. Testing procedure for determining isothermal properties of the freight car body intended for the transport of perishable freights in the absence of specialized climate chamber. Vestnik of the Railway Research Institute, 2020, Vol. 79, no. 3, pp. 171–179. DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2020-79-3-171-179>.

8. Typical methodology for setting temperature regimes and deadlines for the transport of new types of perishable freights by the Russian Railways in insulated vehicles, except for isothermal tanks and tank containers, under special conditions. Approved by the Vice President of the Russian Railways dated December 4, 2012 No. 355 (in Russ.).

9. Nabatchikova T. I., Naumenko S. N., Gusev G. B. On the influence of external factors on the heat transfer coefficient of the body of a specialized vehicle for the transportation of perishable freight. Vestnik of the Railway Research Institute, 2020, Vol. 79, no. 2, pp. 88–92. DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2020-79-2-88-92>.

10. Bartosh E. T. Energy of isothermal rolling stock. Moscow, Transport Publ., 1976, 304 p.

ABOUT THE AUTHORS

Tat'yana I. NABATCHIKOVA, Postgraduate, Department "Heat Power Engineering of Railway Transport", FGAOU VO "RUT" (MIIT)

Sergey N. NAUMENKO, Dr. Sci. (Eng.), Head of Department of the Center for Electrification and Heat Power Engineering (TsET), JSC "VNIIZHT"

Aleksander V. KOSTIN, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department "Heat Power Engineering of Railway Transport", FGAOU VO "RUT" (MIIT)

Gleb B. GUSEV, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department "Heat Power Engineering of Railway Transport", FGAOU VO "RUT" (MIIT)

Received 27.07.2020

Revised 25.10.2020

Accepted 16.11.2020

■ E-mail: naumenko.sergey@vniizht.ru (S. N. Naumenko)

For citation: Nabatchikova T. I., Naumenko S. N., Kostin A. V., Gusev G. B. Selection of special vehicle for transportation of perishable freights by rail // VNIIZHT Scientific Journal. 2020. 79 (6): 360–364 (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2020-79-6-360-364>.

Методы определения положения кривой в плане и влияние геометрии пути на показатели взаимодействия пути и подвижного состава

Е. А. СИДОРОВА¹, О. Н. ВАГАНОВА², А. Ю. СЛАСТЕНИН¹

¹ Акционерное общество «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (АО «ВНИИЖТ»), Москва, 129626, Россия

² Центральная дирекция инфраструктуры — филиал ОАО «РЖД» (ЦДИ), Москва, 107174, Россия

Аннотация. Обоснована необходимость дополнения существующей оценки положения пути в плане по разности смежных стрел изгиба оценкой отклонений от зафиксированного исходного положения, обеспечивающей постоянство характеристик однорадиусной кривой или составных частей многорадиусной кривой по всей их длине.

В качестве закрепленного исходного положения базы отсчета (базового положения) предлагается принять проектное положение или положение пути после ремонта, выполненного по проекту, а при отсутствии проекта — расчетное положение, полученное с помощью верифицированных программ.

Рассмотрен вопрос определения величин отклонения положения кривых в отдельных точках от базового положения и их ранжирования при различных вариантах съемки кривых. В качестве возможных вариантов съемки рассматриваются геодезические методы измерений с использованием декартовой и полярной систем координат, методы получения информации по преобразованным данным с датчиков вагонов-путеизмерителей, а также классический метод измерения стрел изгиба кривой.

В статье приведены результаты расчетов показателей взаимодействия пути и подвижного состава (рамные и горизонтальные поперечные силы, поперечные отжатия рельсов) при моделировании движения грузового вагона по кривым, параметры которых получены на основе анализа данных опытных участков. Результаты расчетов соотнесены с проанализированными данными о наличии в кривых отклонений от базового положения.

Ключевые слова: железнодорожный путь; базовое положение пути в кривых; интенсивность бокового износа рельсов; рамные силы в подвижном составе

Введение. Проблема оценки натурного положения пути актуальна на всей сети ОАО «РЖД», и особо остро она проявляется на участках пути в кривых, содержанию которых уделяется повышенное внимание. Для решения поставленной задачи необходимо создание дополнительной системы оценки положения пути в плане и разработка параметров такой оценки.

Исторически сложилось, что на железных дорогах России содержание участков пути в кривых осуществляется по стрелам прогиба [1] в отличие от зарубежной практики, где содержание таких участков базируется на приведении к проектному первоначальному

положению согласно нормам [2]. Содержание подобных участков с периодической паспортизацией существующего состояния, а не возвращение к изначальному проектному положению приводит к расстраиванию кривых в плане. В работах [3, 4] отмечалось, что приведение кривых в проектное положение и последующая их паспортизация на отечественных железных дорогах в настоящее время имеет ряд нерешенных проблем, что, в свою очередь, влечет за собой появление большого количества временно паспортизованных кривых (согласно нормам контроля состояния главных и станционных путей путеизмерительными средствами [5]). Это обусловлено, с одной стороны, широким применением при производстве работ метода сглаживания, а с другой — использованием при расчетах сдвигов принципа «минимальной суммы сдвигов», что фактически означает узаконивание расстроенного положения кривых.

В современных условиях все больший объем работ по ремонту и текущему содержанию участков пути в кривых выполняется механизированным (автоматизированным) способом. При этом, принимая во внимание наличие большого количества кривых с временной паспортизацией, усиливается необходимость в дополнении существующих критериев оценки положения кривой в плане нормативами отклонений от проектного положения [6–8]. При текущем содержании пути производство работ по выправке расстроенных кривых во многих случаях затруднительно в связи с отсутствием проекта. В этом случае необходимо определение базового положения кривой. Для этого на основании параметров натурного положения кривой в пути необходимо произвести расчет по оптимизации параметров устройства кривых с учетом допускаемых величин непогашенного ускорения [9–11].

В кривых малого радиуса и на длинных участках в сложных условиях (ограниченный обзор, стесненный габарит и т. д.) затруднено выполнение промеров, что также способствует формированию многорадиусности при дальнейшей паспортизации кривых.

■ E-mail: Sidorova.Elena@vniizht.ru (Е. А. Сидорова)

Приоритетными задачами при решении этой проблемы являются:

- определение базового положения кривой, от которого определяются отклонения;
- оценка величин отклонений от базового положения;
- разработка предложений по формированию допускаемых величин этих отклонений.

За базовое положение кривой может быть принято:

- положение по проекту или установившееся после выполнения путевых работ;
- положение, полученное в результате расчета выправки кривой одним из сертифицированных расчетных методов.

Оценка фактических отклонений точек кривой от базового положения. Такая оценка может быть выполнена после специальной обработки показаний датчиков мобильных средств диагностики (МСД), по результатам тахеометрической съемки (ТС) или по разности стрел изгиба от хорды заданной длины от базового до фактического положения кривой, как это делается в большинстве зарубежных стран.

При использовании информации с МСД нужно учитывать параметры передаточной функции измерительной системы [12, 13].

При выправке кривых автоматизированными комплексами необходимо учитывать технические характеристики путеизмерительных систем [14, 15].

Определение фактического положения временно паспортизированной (не паспортизированной) кривой в пути возможно при использовании:

- ТС в декартовой системе координат;
- способа измерения углов поворота по хордам постоянной длины по трем или четырем точкам;
- динамического анализа с учетом сглаживающих свойств систем выправки с использованием передаточной функции измерительных систем;
- системы реперной привязки на местности с применением разницы длины хорды.

Определение фактического положения паспортизированной кривой в пути возможно при применении:

- высокоточной координатной системы;
- метода разности эвольвент;
- метода нормалей;
- системы с использованием лазерно-оптического оборудования с реперными точками на местности;
- всех перечисленных методов, применяемых для временно паспортизированных кривых.

В табл. 1 приведены данные промеров опытных участков пути в кривых с Южно-Уральской и Горьковской железных дорог, полученные при помощи методов ТС с привязкой положения кривых по геодезическим реперам относительно базового положения, а также данные с МСД и паспортного положения кривых согласно карточкам кривых [3, 5, 8, 14].

Анализ данных (табл. 1) показывает соответствие требованиям безопасности содержания кривых в плане с применением метода стрел изгиба с фиксированным шагом, а также необходимость в привязке кривой в плане к базовому положению с дополнением характеристик расстройств.

В зарубежной литературе отмечается необходимость применения сглаживающих систем в точках начала и конца переходных кривых для более плавного сопряжения.

Помимо отступлений в скользящей системе координат (на базе данных промеров путеизмерителя) на ряде железных дорог нормируется также отступление от фиксированных реперов в абсолютной системе координат. Так, в ФРГ предлагается нормировать не только разности стрел изгиба в плане от скользящей хорды (f), но и отступления от реперов (Δh). Предлагаемые в этом случае нормы сведены в табл. 2. Характеристики расстройств кривой в плане формируются из параметров отступления от реперов в миллиметрах в каждой точке кривой [16]. Методика позволяет восстанавливать базовое положение кривой, не допуская накопления отступлений и дальнейшего расстраивания кривой в плане.

Полученные данные (табл. 1) показывают, что метод ТС дает более точные результаты по сравнению с системами МСД, хотя является более трудоемким.

С учетом международного опыта исследований отклонения фактических величин стрел изгиба от хорды длиной 20 м могут отличаться от стрел изгиба базовой кривой на 10–15 мм [16, 17]. Влияние этих отклонений на динамическое взаимодействие пути и подвижного состава требует дополнительного изучения.

Степень стабильности характеристик кривой по ее длине может быть оценена по статистическим характеристикам стрел изгиба, в частности по коэффициенту вариации C_v

$$C_v = \frac{\sigma_f}{\bar{f}},$$

где σ_f — среднее квадратичное отклонение (СКО) величин стрел изгиба в круговой кривой, мм; $\bar{f}$ — средняя стрела изгиба, мм.

При $C_v \leq 0,3$ — стабильность характеристик кривой по длине можно считать отличной; при $0,31 \leq C_v \leq 0,4$ — хорошей; при $0,41 \leq C_v \leq 0,5$ — удовлетворительной. При $C_v > 0,5$ кривую следует считать расстроенной и подлежащей выправке.

За рубежом такой статистический анализ не применяется.

Влияние геометрии пути на показатели взаимодействия пути и подвижного состава. Вопросы влияния отклонений железнодорожного пути от его базового положения в плане на показатели взаимодействия пути и подвижного состава широко изучены отраслевой наукой. Исследования охватывают общие расчеты действия сил

Таблица 1

Параметры положения кривых

Table 1

Curve position options

Километр, тип кривой	Средство измерения	Сумма стрелы прогиба, мм	Угол поворота кривой		Среднее от- клонение на 100 м, мм	СКО от средних значений от- клонений в кривой, мм	Амплитуда, отклонений в кривой от средних зна- чений, мм	Вариатив- ность, %
			Радан	Градус				
Киров, 1034-й км (однорADIUSная кривая)	1 промер ТС	2705	0,54	31	7,85	13,7	34	74,52
	2 промер ТС	2771	0,55	31,75	9,82	8,4	34	14,46
	МСД	—	—	31,54	9,18	11,7	32	27,45
Киров, 1024-й км (многоRADIUSная кривая)	1 промер ТС	6264	1,25	71,78	12,77	11,3	40	11,51
	2 промер ТС	6149	1,23	70,46	11,04	11,7	49	5,89
	МСД	—	—	69,94	11,08	11,5	34	3,88
Киров, 1032-й км (многоRADIUSная кривая)	1 промер ТС	2970	0,59	34,03	8,63	8,36	34	3,13
	2 промер ТС	3007	0,6	34,46	8,18	7,64	37	6,60
	МСД	—	—	35	7,89	7,56	31	4,18
Киров, 17-й км (однорADIUSная кривая)	1 промер ТС	2386	0,48	27,34	7,86	10,2	21	29,13
	2 промер ТС	2482	0,5	28,44	8,75	10,7	25	21,94
	МСД	—	—	28,37	7,56	10,1	19	33,73
Челябинск, 2065-й км (многоRADIUSная кривая)	1 промер ТС	4368	0,87	50,05	9,46	8,97	47	5,18
	2 промер ТС	4384	0,88	50,24	10,39	9,58	47	7,80
	МСД	—	—	44,8	10,11	9,23	31	8,70
Челябинск, 2052-й км (многоRADIUSная кривая)	1 промер ТС	5992	1,2	68,66	7,26	6,06	35	16,53
	2 промер ТС	5858	1,17	67,13	10,92	9,78	59	10,44
	МСД	—	—	68,35	7,97	8,13	30	2,01
Челябинск, 2022-й км (однорADIUSная кривая)	1 промер ТС	802	0,16	9,19	8,06	5,58	27	30,77
	2 промер ТС	771	0,15	8,84	9,78	8,52	50	12,88
	МСД	—	—	9,17	7,34	7,43	24	1,23
Челябинск, 2023-й км (однорADIUSная кривая)	1 промер ТС	1950	0,39	22,34	7,33	5,05	35	31,11
	2 промер ТС	1942	0,39	22,25	11,17	7,12	59	36,26
	МСД	—	—	22,61	7,56	7,98	27	5,56
Челябинск, 2021-й км (однорADIUSная кривая)	1 промер ТС	5037	1,01	57,72	12,54	11,4	44	9,25
	2 промер ТС	4967	1	56,92	10,02	10,4	28	3,49
	МСД	—	—	57,65	9,89	8,45	24	14,56
Челябинск, 1982-й км (многоRADIUSная кривая)	1 промер	8641	1,73	99,02	11,68	10,5	39	10,53
	2 промер	8410	1,68	96,37	12,77	11,3	65	11,82
	МСД	—	—	98,25	10,65	10,9	28	2,25

в кривых [17, 18], а также оценку влияния на уровень силового взаимодействия пути и подвижного состава в кривых как единичных неровностей [19], так и неровностей различной длины [20].

В данной работе оценка силового взаимодействия пути и подвижного состава производится для установления взаимосвязи между регистрируемыми отклонениями натурального положения кривой от базового и уровнем возникающих при этом поперечных сил и отжатий рельса для последующего нормирования допускаемых величин отклонений от базового положения.

Для решения поставленной задачи были рассмотрены два варианта модели пути. Модель пути, построен-

ная по данным карточки кривой, состоит из стандартных элементов (переходных и круговых кривых) и не имеет отклонений в плане. Модель пути, построенная по данным ТС, отражает реальное положение кривой и имеет ряд отклонений от базового положения кривой в плане. В качестве исходной информации для построения моделей были взяты данные по участкам пути в кривых на направлении Самара—Челябинск. На рис. 1 приведены величины отклонений в одной из кривых на указанном маршруте.

Для расчета показателей взаимодействия пути и подвижного состава из рассмотренных в табл. 1 кривых в плане были выбраны две однорADIUSные и одна

Таблица 2
Допускаемые отклонения в плане
Table 2
Tolerances in the plan

Скорость движения, км/ч	Допускаемые величины	
	f , мм	Δh , мм
70	30	6
$70 < v \leq 80$	25	5
$80 < v \leq 120$	20	4
$120 < v \leq 160$	15	3
$160 < v \leq 200$	10	2

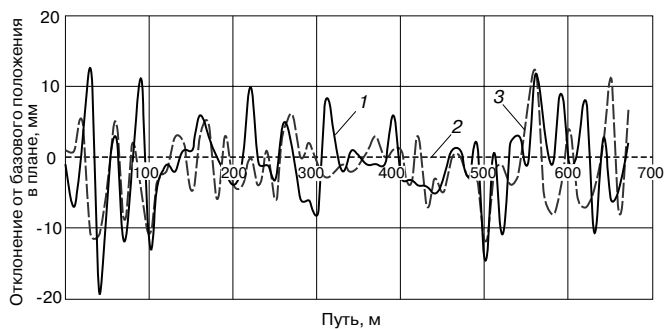


Рис. 1. Величины отклонений от базового положения кривой пути в плане:
1 — отклонение по ТС;

2 — базовое положение кривой; 3 — отклонение по данным МСД
Fig. 1. Values of deviations from the basic position of the track curve in the plan:
1 — deviation by tachometric survey; 2 — base position of the curve;
3 — deviation according to mobile diagnostic tools

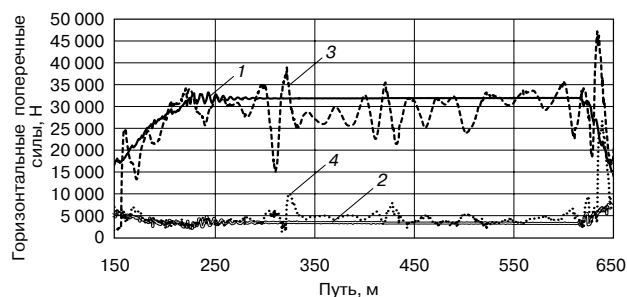


Рис. 2. Осциллограмма горизонтальных поперечных сил:
1 — первая колесная пара по базовому положению кривой пути;
2 — вторая колесная пара по базовому положению кривой пути;
3 — первая колесная пара по натурному положению кривой пути;
4 — вторая колесная пара по натурному положению кривой пути

Fig. 2. Oscillogram of horizontal lateral forces:
1 — first wheelset on the base position of the track curve;
2 — second wheelset on the base position of the track curve;
3 — first wheelset on the full-scale position of the track curve;
4 — second wheelset on the full-scale position of the track curve

много радиусная кривые. Согласно карточкам кривых, радиусы двух однорadiusных кривых составляли 605 и 634 м, а много радиусная кривая состояла из двух кривых радиусами 807 и 748 м. Отклонения натурального положения кривых от базового были оценены предварительно и представлены в табл. 1. В программном комплексе

«Универсальный механизм» были проведены расчеты горизонтальных поперечных сил, рамных сил и поперечных отжатий рельса, возникающих при движении грузового вагона с нагрузкой на ось 23,5 тс и со скоростями 60 и 80 км/ч в кривых в базовом и натурном положениях.

На рис. 2 представлена осциллограмма горизонтальных поперечных сил для правых колес первой тележки при моделировании движения грузового вагона со скоростью 60 км/ч в базовом и натурном положениях одной из кривых на направлении Самара—Челябинск, на рис. 3 — СКО от средних значений рассчитанных горизонтальных поперечных сил. Из осциллограммы процесса движения вагона в кривой видно, что первое колесо движется с набеганием, а второе — без набегания.

Средний радиус кругового участка натурной кривой больше радиуса базовой кривой примерно на 10 м; по этой причине средний уровень горизонтальных поперечных сил, рассчитанных для натурной кривой, несколько ниже уровня горизонтальных поперечных сил для кривой в базовом положении. На рис. 2 виден разброс значений горизонтальных поперечных сил, вызванный наличием отклонений натурной кривой в плане, которые показаны на рис. 1.

Из рис. 3 видно, что средние значения рамных и горизонтальных поперечных сил, рассчитанных при моделировании движения вагона по кривой в базовом положении и по натурной кривой, различаются незначительно. Однако наличие отклонений в натуральных кривых приводит к росту СКО рассчитанных показателей динамического взаимодействия пути и подвижного состава.

В табл. 3 представлены результаты расчета СКО, полученных по осциллограммам рамных и горизонтальных поперечных сил, при моделировании движения вагона в базовых и натуральных кривых. В среднем СКО сил, рассчитанных при движении вагона в натуральных кривых, выше в 3 раза, чем СКО сил, рассчитанных при движении вагона по базовым кривым.

С целью рассмотрения геометрических отклонений железнодорожных кривых в зависимости от силовых показателей взаимодействия пути и подвижного состава по полученным в результате моделирования осциллограммам были рассчитаны максимальные значения рамных и горизонтальных поперечных сил и поперечных отжатий рельса при движении грузового вагона по базовым и натурным кривым. Максимумы сил рассчитывались по среднему из трех максимальных значений выборки. Анализ полученных данных (табл. 4) показывает увеличение их максимальных значений при моделировании движения грузового вагона по натурной кривой по сравнению с движением по базовой кривой. Полученные данные демонстрируют разницу в уровне рамных сил до 11 кН, в уровне горизонтальных поперечных сил — до 12 кН, в уровне поперечного отжатия рельса — до 0,7 мм при расчете для кривых в

базовом положении и для натуральных кривых. При этом наименьшее различие в уровнях силовых показателей по сравнению с базовым положением было получено для однорядусной кривой на 2022 км направления Самара—Челябинск. Такой результат может быть связан с тем, что эта кривая имеет меньшие отклонения в плане по сравнению с двумя другими рассматриваемыми кривыми (однорядусной — на 2065 км и многорядусной — на 2052 км) и коэффициент вариации для отклонений в этой кривой ниже, чем для двух других.

Результаты расчетов показывают, что даже в кривых, находящихся в хорошем состоянии по существующей системе оценки положения пути в плане, различие в максимальных величинах рамных сил может достигать 45 % (табл. 4).

Для оценки влияния амплитуды отклонений на уровень силового взаимодействия пути и подвижного состава в программном комплексе «Универсальный механизм» была смоделирована кривая радиусом 600 м с наложенными на нее отклонениями в плане, устроенными через каждые 40 м, имеющими попеременное направление внутрь и наружу кривой и варьируемыми по амплитуде. Было смоделировано движение грузового вагона со скоростями 60 и 80 км/ч в кривой с отклонениями и по результатам расчетов получена зависимость величины горизонтальных поперечных сил от амплитуды отклонений (рис. 4). Из полученной зависимости видно, что наличие в кривой отклонений амплитудой выше 25 мм может приводить к приближению горизонтальных поперечных сил к своему критическому значению (100 кН). При этом необходимо отметить, что расчеты производились для одного вагона без учета продольных сил. Влияние продольных сил в сцепе вагонов требует дальнейших исследований, но по предварительным расчетам можно сказать, что дополнительная величина горизонтальных поперечных сил в этом случае может достигать 20 %.

Из рис. 4 видно, что величины полученных горизонтальных поперечных сил не влияют на безопасность движения, однако это, в свою очередь, является причиной неравномерного бокового износа рельсов по длине кривой и требует их более частой смены по состоянию худших участков. Неравномерность износа может возникать в многорядусных кривых при постоянном возвышении рельса за счет различных величин непогашенного ускорения (рис. 5). Проведенные ранее исследования [9, 11, 21] показали, что в зависимости от условий эксплуатации изменение непогашенного ускорения может вызывать увеличение бокового износа рельсов в 10 раз.

Неравномерность износа рельсов в кривой демонстрирует рис. 6, на котором представлены характеризующие износ оциллограммы мощности сил трения при моделировании движения грузового вагона со скоростью 60 км/ч в круговой кривой радиусом 600 м без отклонений в плане и с отклоне-

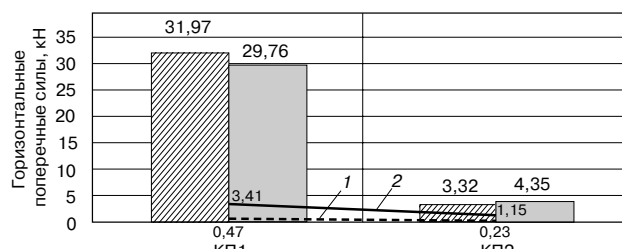


Рис. 3. Средние значения и СКО горизонтальных поперечных сил:
 — по базовому положению кривой пути; — по натурному положению кривой пути; 1 — СКО сил по базовому положению кривой пути; 2 — СКО сил по натурному положению кривой пути;
 КП1 и КП2 — первая и вторая колесные пары
 Fig. 3. Average values and standard deviation (SD) of horizontal transverse forces:
 — by the base position of the track curve; — by the natural position of the track curve; 1 — SD of forces by the base position of the track curve; 2 — SD forces by the full-scale position of the track curve;
 КП1 и КП2 — first and second wheelsets

Таблица 3
 СКО рамных и горизонтальных поперечных сил

Table 3

Standard deviation of frame and horizontal transverse forces

Километр, тип кривой	Исходные данные для модели (положение кривой)	СКО по оциллограммам рамных сил, кН		СКО по оциллограммам горизонтальных поперечных сил, кН	
		При 60 км/ч	При 80 км/ч	При 60 км/ч	При 80 км/ч
Челябинск, 2022-й км (однорядусная кривая)	Базовое	1,01	1,23	0,93	0,89
	Натурное	2,68	2,82	2,64	2,84
Челябинск, 2065-й км (однорядусная кривая)	Базовое	0,49	0,61	0,41	0,56
	Натурное	1,91	1,97	1,41	1,61
Челябинск, 2052-й км (многорядусная кривая)	Базовое	0,81	0,77	0,59	0,60
	Натурное	2,34	2,69	2,09	2,27

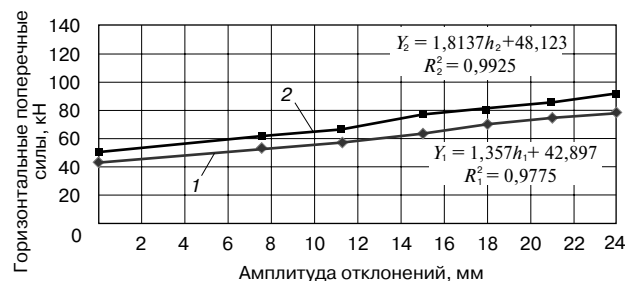


Рис. 4. Зависимость горизонтальных поперечных сил от величины амплитуды отклонений неровностей в кривой:

1 — 60 км/ч; 2 — 80 км/ч;
 Fig. 4. Dependence of horizontal transverse forces on the amplitude of the deviations of the irregularities in the curve:
 1 — 60 km/h; 2 — 80 km/h

ниями, равными 15 мм. Из рисунка видно, что износ в кривой без отклонений на наружной рельсовой нити происходит равномерно, в то время как на кривой с

Таблица 4

Максимальные значения показателей взаимодействия пути и подвижного состава

Table 4

Maximum values of indicators of interaction between track and rolling stock

Километр, тип кривой	Исходные данные для модели (положение кривой)	Значения рамных сил, кН		Значения горизонтальных поперечных сил, кН		Значения поперечного отжатия рельса, мм	
		При 60 км/ч	При 80 км/ч	При 60 км/ч	При 80 км/ч	При 60 км/ч	При 80 км/ч
Челябинск, 2022-й км (однорядная кривая)	Базовое	9,61	16,80	38,29	42,57	2,11	2,34
	Натурное	13,17	20,73	39,14	42,96	2,17	2,38
Различие в значениях, %		27	19	2	1	3	2
Челябинск, 2065-й км (однорядная кривая)	Базовое	8,03	10,74	33,18	37,85	1,84	2,09
	Натурное	12,17	21,77	42,74	49,76	2,37	2,76
Различие в значениях, %		34	45	22	24	22	24
Челябинск, 2052-й км (много радиусная кривая)	Базовое	7,98	10,63	29,69	33,18	1,65	1,84
	Натурное	11,71	16,64	38,58	43,50	2,14	2,42
Различие в значениях, %		32	36	23	24	23	23

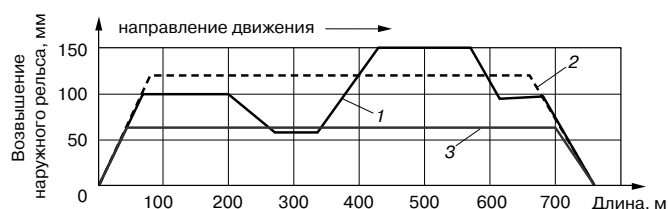


Рис. 5. Пример много радиусной кривой

с постоянным возвышением наружного рельса:

1 — расстроенная кривая в плане; 2 — базовое положение кривой в плане; 3 — возвышение наружного рельса кривой

Fig. 5. Example of a multi-radius curve with

a constant elevation of the outer rail:

1 — misadjusted curve in the plan; 2 — basic position of the curve in the plan; 3 — elevation of the outer rail of the curve

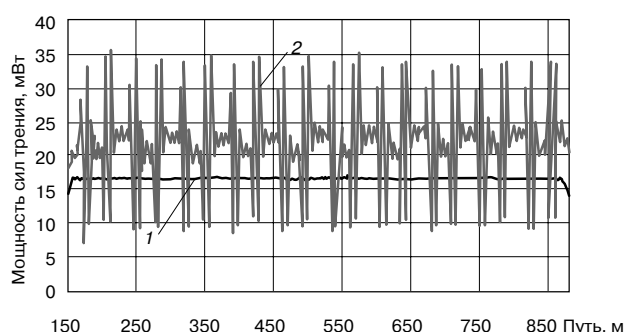


Рис. 6. Осциллограмма мощности сил трения при движении в кривой радиусом 600 м со скоростью 60 км/ч:

1 — без отклонений в кривой; 2 — отклонения в кривой 15 мм

Fig. 6. Oscillogram of the power of friction forces when moving in a curve with a radius of 600 m at a speed of 60 km/h:

1 — no deviations in the curve; 2 — deviations in the curve 15 mm

отклонениями заметно резкое усиление износа в местах неровностей пути.

Для оценки величины износа была рассчитана площадь пятна контакта под набегавшим колесом.

Анализ результатов расчетов показал, что с ростом отклонений точек кривой от базового положения до 24 мм отношение мощности сил трения в пятне контакта набегавшего колеса с рельсом к площади пятна контакта растет с 10,3 до 14,8 мВт/м² (при скорости движения грузового вагона 60 км/ч) и с 14,8 до 21,1 мВт/м² (при скорости движения грузового вагона 80 км/ч). При этом превышение значения 20 мВт/м² в кривой среднего радиуса (600 м) было получено расчетом при наличии отклонений амплитудой 21 мм при скорости движения вагона 80 км/ч. Проведенные ранее исследования показали [22], что отношение мощности сил трения в пятне контакта набегавшего колеса с рельсом к площади пятна контакта свыше 20,2 мВт/м² характерно для кривых малых радиусов, где износ существенно больше, чем в кривых средних и больших радиусов.

Заключение. Проведенные исследования показали, что существующая оценка положения кривых в плане только по разности смежных стрел изгиба должна быть дополнена величинами отклонений от базового положения. Необходимость учета отклонений от базового положения обусловлена тем, что их наличие в кривых вызывает неравномерный боковой износ рельсов, который, в свою очередь, приводит к нерациональной смене рельсовых нитей. По результатам расчетов по критерию безопасности (уровень горизонтальных поперечных сил не выше 100 кН) недопустимо наличие в кривой отклонений амплитудой свыше 25 мм. По критерию интенсивности износа (мощность сил трения в пятне контакта набегавшего колеса с рельсом к площади пятна контакта не выше 20,2 мВт/м²) нежелательно наличие в кривых среднего радиуса (600 м) отклонений амплитудой свыше 21 мм при скорости движения поездов свыше 80 км/ч.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Туровский И. Я. Расчет выправки железнодорожных кривых. М.: Транспорт, 1972. 213 с.
2. Railway applications — Track — Track alignment design parameters — Track gauges 1435 mm and wider; German version EN 13803:2017. [S. I.], 2017. 103 p.
3. Ососов А. В. Постановка кривых в расчетное положение. Паспортизация кривых // Путь и путевое хозяйство. 2020. № 4. С. 10–12.
4. Аляхмичев А. А. Нормативная база для организации скоростного и высокоскоростного движения. Постановка кривых в расчетное положение. Паспортизация кривых // Путь и путевое хозяйство. 2020. № 4. С. 35–38.
5. Об утверждении положения о порядке контроля состояния главных и станционных путей путеизмерительными средствами [Электронный ресурс]: распоряжение ОАО «РЖД» от 7 апр. 2017 г. № 678р // СПС «КонсультантПлюс». URL: <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=EXP&n=702042#0018286528027303017> (дата обращения: 03.06.2020 г.).
6. СП 119.13330.2017. Железные дороги колеи 1520 мм [Электронный ресурс]: актуализированная редакция СНиП 32-01-95 (с Изменением № 1). 59 с. URL: <http://docs.cntd.ru/document/550965737> (дата обращения: 03.06.2020 г.).
7. Инструкция по текущему содержанию железнодорожного пути [Электронный ресурс]: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 14 нояб. 2016 г. № 2288р (в ред. от 1 окт. 2018 г. № 2159р) // СПС «КонсультантПлюс». URL: <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=EXP&n=692153#046415998998487207> (дата обращения: 13.03.2020 г.).
8. Общие требования по паспортизации кривых участков главных путей ОАО «РЖД» [Электронный ресурс]: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 9 янв. 2008 г. № 7р // СПС «КонсультантПлюс». URL: <https://jd-doc.ru/2008/yanvar-2008/8921-rasporiazhenie-oao-rzhd-ot-09-01-2008-n-7r> (дата обращения: 13.03.2020 г.).
9. Певзнер В. О., Белоцветова О. Ю., Потапов А. В. Результаты наблюдений по оценке влияния эксплуатационных факторов на боковой износ рельсов // Вестник ВНИИЖТ. 2016. Т. 75. № 4. С. 242–247. DOI: <https://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2016-75-4-242-247>.
10. Оптимизация параметров устройства кривых и установление величины непогащенного ускорения на ВСМ / В. О. Певзнер [и др.] // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. 2018. Т. 12. № 12. С. 44–47.
11. Pevzner V., Romen Yu., Shapetko K. Control of energy aspects of track and rolling stock interaction // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 239: Siberian Transport Forum — TransSiberia 2018. 01044. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201823901044>.
12. Сластенин А. Ю., Ваганова О. Н. Совершенствование системы оценки положения пути в плане // Путь и путевое хозяйство. 2020. № 6. С. 9–13.

13. Каплин В. Н., Шапетько К. В., Мыслевец М. Н. Совершенствование конструкции пути с целью снижения интенсивности его расстройств // РСП Эксперт. 2019. № 3. С. 16–18.
14. Путевые машины: полный курс: учеб. для студентов вузов ж.-д. транспорта / М. В. Попович [и др.]; под ред. М. В. Поповича и В. М. Бугаенко. М.: Учеб.-метод. центр по образованию на ж.-д. транспорте, 2009. 820 с.
15. Корженевич И. П. Программа расчетов выправки плана железнодорожного пути в путевом хозяйстве «RWPLan»: метод. указания. Днепропетровск: Изд-во Днепропетровского нац. ун-та ж.-д. транспорта им. акад. В. Лазаряна, 2006. 84 с.
16. Freimann E. Beurteilung von Krümmungsfehlern in Gleisbögen // Eisenbahningenieur. 1985. Bd. 36. No. 9. S. 419–421.
17. Rail-Requirement Analysis Report: IFC Rail Project [Электронный ресурс]. 2019. 63 p. URL: <https://www.buildingsmart.org/standards/rooms/railway/ifc-rail-project> (дата обращения: 16.06.2020 г.).
18. Ершков О. П. Расчет рельса на действие боковых сил в кривых // Тр. ВНИИЖТ. М.: Трансжелдориздат, 1960. Вып. 192. С. 5–57.
19. Чибизова Н. Г. Воздействие грузовых полувагонов на путь в кривой, имеющей отступление в плане // Вестник ВНИИЖТ. 1966. № 8. С. 32–37.
20. Певзнер В. О., Ромен Ю. С. Основы разработки нормативов содержания пути и установления скоростей движения. М.: Интекст, 2013. 224 с. (Сб. тр. ученых ОАО «ВНИИЖТ»).
21. Певзнер В. О., Белоцветова О. Ю., Потапов А. В. Подуклонка рельсов и ее связь с безопасностью движения и боковым износом // Путь и путевое хозяйство. 2018. № 2. С. 30–33.
22. Саидова А. В., Орлова А. М. Уточнение параметров модели износа Арчарда для вычисления износа колес грузовых вагонов с осевой нагрузкой 25 тс // Вестник ВНИИЖТ. 2017. Т. 76. № 4. С. 202–208. DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2017-76-4-202-208>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

СИДОРОВА Елена Анатольевна,

канд. техн. наук, старший научный сотрудник, НЦ «ЦПРК», АО «ВНИИЖТ»

ВАГАНОВА Олеся Николаевна,

начальник нормативно-методологического отдела управления пути и сооружений Центральной дирекции инфраструктуры — филиала ОАО «РЖД»

СЛАСТЕНИН Александр Юрьевич,

ведущий инженер, НЦ «ЦПРК», АО «ВНИИЖТ»

Статья поступила в редакцию 14.07.2020 г., принята к публикации 21.09.2020 г.

Для цитирования: Сидорова Е. А., Ваганова О. Н., Сластенин А. Ю. Методы определения положения кривой в плане и влияние геометрии пути на показатели взаимодействия пути и подвижного состава // Вестник ВНИИЖТ. 2020. Т. 79. № 6. С. 365–372. DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2020-79-6-365-372>.

Methods for determining the position of the curve in the plan and the influence of the geometry of the track on the indicators of interaction between the track and the rolling stock

E. A. SIDOROVA¹, O. N. VAGANOVA², A. Yu. SLASTENIN¹

¹Joint Stock Company "Railway Research Institute" (JSC "VNIIZHT"), Moscow, 129626, Russia

²Central Directorate of Infrastructure — branch of the JSC "Russian Railways" (TsDI), Moscow, 107174, Russia

Abstract. The article substantiates the necessity of supplementing the existing estimate of the track position in the plan by the difference of adjacent bending arrows with an estimate of de-

viations from the fixed initial position, which ensures the constancy of the characteristics of a single-radius curve or the components of a multi-radius curve along their entire length.

As a fixed initial position of the reference base (base position), it is proposed to accept the design position or the position of the track after the repair performed according to the project, and in the absence of the project, the calculated position obtained using verified programs. The question of determining the values of the deviation of the position of the curves at individual points from the base position and their ranking for different variants of recording the curves is considered. As possible options for surveying are considered Geodetic measurement methods using Cartesian and polar coordinate systems, methods of obtaining information from transformed data from sensors of track measuring cars, as well as the classical method of measuring the arrows of the bend of a curve. The article presents the results of calculating the indicators of the interaction between the track and the rolling stock (frame and horizontal transverse forces, lateral deflections of rails) when modeling the motion of a freight car along curves, the parameters of which were obtained on the basis of analysis of data from experimental sections. The calculation results are correlated with the analyzed data on the presence of deviations from the base position in the curves.

Keywords: railway track; base position of the track in curves; the intensity of lateral wear of rails; frame forces in rolling stock

DOI: <https://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2020-79-6-365-372>

REFERENCES

1. Turovskiy I. Ya. *Calculation of the alignment of railway curves*. Moscow, Transport Publ., 1972, 213 p.
2. *Railway applications — Track — Track alignment design parameters — Track gauges 1435 mm and wider*. German version EN 13803:2017. [S. l.], 2017, 103 p.
3. Ososov A. V. *Setting curves in the calculated position. Certification of curves*. Railway Track and Facilities, 2020, no. 4, pp. 10–12.
4. Al'khimovich A. A. *Regulatory framework for the organization of rapid and high-speed traffic. Setting the curves to the calculated position. Certification of curves*. Railway Track and Facilities, 2020, no. 4, pp. 35–38.
5. *On the approval of the regulation on the procedure for monitoring the state of the main and station tracks by track measuring devices*. Order of the JSC "Russian Railways" dated April 7, 2017 No. 678r. SPS "ConsultantPlus". URL: <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=EXP&n=702042#0018286528027303017> (retrieved on 03.06.2020) (in Russ.).
6. SP 119.13330.2017. *1520 mm gauge railways*. Updated edition of SNiP 32-01-95 (with Amendment No. 1). 59 p. URL: <http://docs.cntd.ru/document/550965737> (retrieved on 03.06.2020) (in Russ.).
7. *Instructions on the current maintenance of the railway track*. Approved by order of the JSC "Russian Railways" dated November 14, 2016 No. 2288r (as amended on October 1, 2018, No. 2159r). SPS "ConsultantPlus". URL: <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=EXP&n=692153#046415998998487207> (retrieved on 13.03.2020) (in Russ.).
8. *General requirements for the certification of curved sections of the main tracks of the JSC "Russian Railways"*. Approved by order of the JSC "Russian Railways" dated January 9, 2008 No. 7r. SPS "ConsultantPlus". URL: <https://jd-doc.ru/2008/yanvar-2008/8921-rasporyazhenie-oao-rzhd-ot-09-01-2008-n-7r> (retrieved on 13.03.2020) (in Russ.).
9. Pevzner V. O., Belotsvetova O. Yu., Potapov A. V. *Results of observations to evaluate the impact of operational factors on the side rail wear*. Vestnik of the Railway Research Institute, 2016, Vol. 75, no. 4, pp. 242–247. DOI: <https://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2016-75-4-242-247>.

10. Pevzner V. O., Kartsev V. Ya., Tret'yakov V. V., Tret'yakov I. V., Shapet'ko K. V., Petropavlovskaya I. B., Gromova T. I., Smelyanskaya I. S. *Optimization of the parameters of the device curves and the establishment of the value of unbalanced acceleration on the high-speed railways*. Vnedrenie sovremennykh konstruktivnykh i pere-dovykh tekhnologiy v putevoe khozyaystvo, 2018, Vol. 12, no. 12, pp. 44–47.

11. Pevzner V., Romen Yu., Shapetko K. *Control of energy aspects of track and rolling stock interaction*. MATEC Web of Conferences, 2018, Vol. 239: Siberian Transport Forum – TransSiberia 2018, 01044. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201823901044>.

12. Slastenin A. Yu., Vaganova O. N. *Improving the system for assessing position of the track in the plan*. Railway Track and Facilities, 2020, no. 6, pp. 9–13.

13. Kaplin V. N., Shapet'ko K. V., Myslevets M. N. *Improvement of the track design in order to reduce the intensity of its disorders*. RSP Ekspert, 2019, no. 3, pp. 16–18.

14. Popovich M. V., Bugaenko V. M., Volkovoyinov B. G. et al. *Track machines. Complete course*. Textbook for students of higher educational institutions of railway transport. Moscow, Educational-methodical center for education in railway transport, 2009, 820 p.

15. Korzhenevich I. P. *Program for calculating the alignment of the plan of the railway track in the track facilities "RWPlan": Guidelines*. Dnepropetrovsk, Publishing House of Dnepropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, 2006, 84 p.

16. Freimann E. *Beurteilung von Krümmungsfehlern in Gleisbögen*. Eisenbahningenieur, 1985, Vol. 36, no. 9, pp. 419–421.

17. *Rail-Requirement Analysis Report: IFC Rail Project*. 2019. 63 p. URL <https://www.buildingsmart.org/standards/rooms/railway/ifc-rail-project> (retrieved on 16.06.2020).

18. Ershkov O. P. *Calculation of the rail on the action of lateral forces in curves*. Proceedings of the VNIIZhT. Moscow, Transzheldorizdat Publ., 1960, issue 192, pp. 5–57.

19. Chibizova N. G. *Impact of freight gondola cars on the track in curve that has a deviation in the plan*. Vestnik of the Railway Research Institute, 1966, no. 8, pp. 32–37.

20. Pevzner V. O., Romen Yu. S. *Basics of development of track maintenance standards and establishment of operation speeds*. Moscow, Intext Publ., 2013, 224 p.

21. Pevzner V. O., Belotsvetova O. Yu., Potapov A. V. *Rails canting and its connection with traffic safety and lateral wear*. Railway Track and Facilities, 2018, no. 2, pp. 30–33.

22. Saidova A. V., Orlova A. M. *Specification of the Archard's wear model parameters for calculating wheels wear of freight cars with an axial load of 25 tons*. Vestnik of the Railway Research Institute, 2017, Vol. 76, no. 4, pp. 202–208. DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2017-76-4-202-208>.

ABOUT THE AUTHORS

Elena A. SIDOROVA,

Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, SC "TsPRK", JSC "VNIIZHT"

Olesya N. VAGANOVA,

Head of the Normative and Methodological Department of the track and structure management of the Central Directorate of Infrastructure — branch of the Russian Railways

Aleksander Yu. SLASTENIN,

Leading Engineer, SC "TsPRK", JSC "VNIIZHT"

Received 14.07.2020

Accepted 21.09.2020

■ E-mail: Sidorova.Elena@vniizht.ru (E. A. Sidorova)

For citation: Sidorova E. A., Vaganova O. N., Slastenin A. Yu. Methods for determining the position of the curve in the plan and the influence of the geometry of the track on the indicators of interaction between the track and the rolling stock // VNIIZHT Scientific Journal. 2020. 79 (6): 365–372 (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2020-79-6-365-372>.

К вопросу повышения эксплуатационной энергетической эффективности работы восьмиосных пассажирских электровозов постоянного тока

И. Н. НИКОНЧУК

Акционерное общество «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (АО «ВНИИЖТ»),
Москва, 129626, Россия

Аннотация. Задачу по повышению энергетической эффективности работы 8-осных пассажирских электровозов постоянного тока представляется возможным решить посредством отключения части тяговых электродвигателей и поддержания необходимой скорости движения согласно графику остающимися в режиме тяги электродвигателями, благодаря чему существенно сокращается расход электроэнергии на тягу поездов.

Предложенный метод актуален при вождении электровозами серии ЧС7 поездов, масса которых в несколько раз ниже установленных для определенных участков норм, а также для скоростных поездов, имеющих на своем пути следования минимальное количество остановок или не имеющих их вообще. Следует отметить, что трогание поезда с места и разгон до максимальной скорости движения производится на «полной схеме» — с участием в режиме разгона всех восьми тяговых электродвигателей, после чего в зависимости от массы поезда и графика движения в работе остаются от четырех до шести тяговых электродвигателей. Разработан вариант модернизации силовой схемы электровоза при отключении двух тяговых электродвигателей, увеличивающий мощность электровоза в данном режиме.

Ключевые слова: электровоз; коллекторные тяговые двигатели; силовая схема; энергопотребление; отключение части тяговых электродвигателей; кинетическая энергия движения поезда; масса поезда

Введение. На данный момент парк пассажирских электровозов постоянного тока ОАО «РЖД» обновляется электровозами ЭП2К мощностью 4,8 МВт, которые пришли на смену выработавшим свой ресурс электровозам ЧС2, ЧС2К и ЧС2^Т. Эти электровозы выпускаются серийно, произведено более 430 единиц.

На участках железных дорог, электрифицированных на постоянном токе, для тяги поездов используются электровозы с коллекторным тяговым приводом (КТП): 6-осные ЧС2^Т и ЭП2К и более мощные 8-осные электровозы ЧС7. Все три серии электровозов рассчитаны на максимальную скорость в эксплуатации до 160 км/ч, однако максимальная скорость движения пассажирских поездов на сети ОАО «РЖД» в зависимости от оснащённости составов автотормозами не превышает 120–140 км/ч. При этом мощность электровозов ЧС7 на 30 % выше мощности электровозов ЭП2К (6,16 против 4,8 МВт), а также они имеют меньшее

передаточное отношение редуктора (1,733 против 2,45) и, следовательно, более скоростные характеристики.

В связи с вышеизложенным складывается ситуация с недоиспользованием мощности электровозов ЧС7, особенно при их эксплуатации с пассажирскими поездами малой и средней массы (420...780 т — 7...13 вагонов), а также на участках с ограничением скорости движения до 120 км/ч. Соответственно, обладающие более скоростными качествами электровозы ЧС7 оптимально использовать для вождения скоростных [1] поездов, обращающихся со скоростью до 140 км/ч. Мощности электровозов ЭП2К недостаточно для вождения поездов массой более 840 т (14 вагонов) на участках с тяжелым профилем пути [2], например: Челябинск—Кропачёво Южно-Уральской железной дороги, Екатеринбург—Пермь Свердловской железной дороги, Белорусское, Киевское, Павелецкое и Рижское направления Московской железной дороги.

В статье предлагается вариант проведения модернизации силовой схемы отключения части тяговых электродвигателей (ТЭД) электровозов серии ЧС7 при проведении их капитального ремонта, что позволит более рационально использовать мощность электровоза в зависимости от массы состава и будет способствовать снижению удельного расхода электроэнергии на тягу поездов.

История вопроса. В середине 1970-х гг. максимальная масса пассажирских поездов, обращающихся на сети железных дорог, достигла своего предела в 1440 т (24 вагона). Дальнейшее увеличение массы пассажирских поездов (составов) было ограничено длиной приемоотправочных путей пассажирских станций и платформ. В то время для вождения пассажирских поездов использовались 6-осные электровозы серий ЧС2 и ЧС2^Т мощностью 4,2 и 4,62 МВт соответственно. Тяговые характеристики этих электровозов рассчитывались на максимальную массу пассажирских поездов в 1100 т (18 вагонов) и легкий профиль пути [2].

Вождение пассажирских поездов массой более 1100 т, особенно на участках с тяжелым профилем

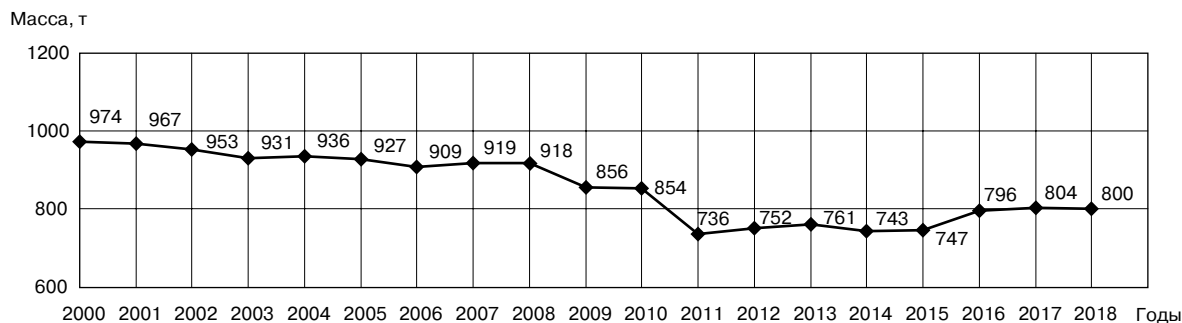


Рис. 1. Средняя масса пассажирского поезда
Fig. 1. Average mass of a passenger train

пути Южно-Уральской, Свердловской и Московской железных дорог, осуществлялось на пределе тяговых возможностей электровозов ЧС2. Поэтому локомотивные депо были вынуждены формировать сплотки из электровозов, работающих по системе многих единиц.

В середине 1970-х гг. по заказу МПС СССР на заводах «Шкода» (с 1995 г. — Škoda Transportation) в Чехословакии были созданы более мощные 8-осные пассажирские электровозы постоянного тока с КТП серии ЧС200 и ЧС6 мощностью 8,4 МВт. В 1983 г. был начат серийный выпуск пассажирских электровозов ЧС7 мощностью 6,16 МВт, за 15 лет производства был выпущен 321 электровоз данной серии.

Электровозы ЧС7 в первую очередь стали использоваться на участках с тяжелым профилем пути с интенсивным движением пассажирских поездов повышенной массы до 1440 т (24 вагона). При этом их энергоэффективность была удовлетворительной, поскольку тяговые характеристики электровоза при вождении поездов такой массы использовались практически полностью.

Начиная с 2000-х гг. интенсивное развитие внутреннего авиасообщения в России способствовало снижению пассажирооборота железнодорожного транспорта в поездах дальнего следования, что повлекло за собой

сокращение количества вагонов в пассажирских поездах и, следовательно, уменьшение средней массы составов. Средняя масса поезда в пассажирском движении по сети железных дорог снизилась за период 2000–2018 гг. на 21 % (рис. 1). В связи с этим и энергоэффективность 8-осных электровозов ЧС7 при вождении поездов меньшей массы уменьшилась по сравнению с 6-осными электровозами ЧС2^Т и ЭП2К. Снижение энергоэффективности электровозов ЧС7 при вождении ими поездов массой 840 т и менее в одном графике с электровозами ЧС2^Т и ЭП2К привело к перерасходу электроэнергии ввиду избыточной мощности ЧС7 (рис. 2).

Электровозы ЭП2К в плане снижения расхода электроэнергии на тягу поездов лучше использовать для вождения составов средней массы до 840 т (14 вагонов) на участках с легким профилем пути и максимальной скоростью движения до 120 км/ч. Таким образом, наиболее соответствующими требованиям вождения скоростных поездов, обращающихся со скоростью движения до 140 км/ч и имеющих массу, близкую к предельно допустимой на участках с тяжелым профилем пути, являются электровозы серии ЧС7.

Пассажирские перевозки сегодня. В настоящее время средняя масса пассажирских поездов в России составляет 600–840 т (10–14 вагонов) [3], а максимальная, даже в пиковые периоды перевозок, не превышает 1080–1200 т (18–20 вагонов), причем в период межсезонья она снижается до 360–480 т (6–8 вагонов). Как следствие, при вождении большинства пассажирских поездов мощность и конструкционная скорость 8-осных электровозов постоянного тока серии ЧС7 недоиспользуется.

Для вождения пассажирских поездов в Восточной Европе широкое применение получили 4-осные электровозы с КТП мощностью 3,4–4,2 МВт. Такие электровозы являются энергоэффективными, так как их мощности достаточно для вождения поездов массой до 840 т (14 вагонов) на участках с тяжелым профилем пути и с максимальной скоростью до 140–160 км/ч [4]. В нашей стране 4-осные электровозы в пассажирском движении не применяются. Однако этот опыт свидетельствует о целесообразности вождения пассажирских

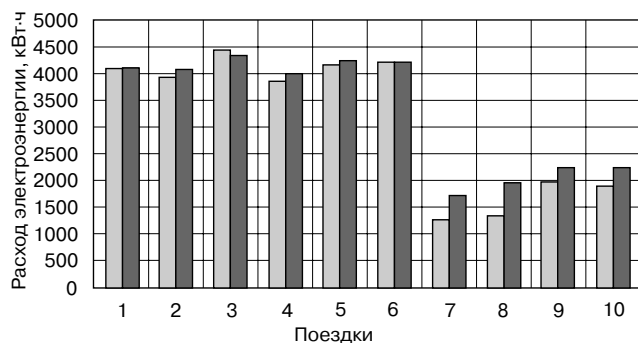


Рис. 2. Сравнительный расход электроэнергии электровозами ЭП2К и ЧС7:

■ — ЭП2К; ■ — ЧС7

Fig. 2. Comparative power consumption of EP2K and ChS7 electric locomotives:
■ — EP2K; ■ — ChS7

поездов массой до 840 т на сети ОАО «РЖД» 8-осными электровозами со схемой отключения части ТЭД (от двух до четырех из восьми), при этом энергопотребление электровоза на тягу поездов может быть снижено.

Силовой схемой электровоза ЧС7 предусматривается возможность отключения любой одной из двух секций локомотива с четырьмя ТЭД (рис. 3). Существует аварийный режим, в котором предусмотрено отключение тележки электровоза (двух неисправных ТЭД) (рис. 4, 5). В этом случае при трогании с места и разгоне до ходовой позиции последовательного (серийного — С) соединения электрическая схема 8-осного электровоза ЧС7 с оставшимися в работе шестью ТЭД полностью аналогична схеме 6-осного электровоза (рис. 4, а и 5, а). Однако далее при переходе на реостатные позиции последовательно-параллельного (серийно-параллельного — СП) соединения на секции с отключенной (неисправной) парой ТЭД (7–8) другая, не отключенная (исправная) пара ТЭД (5–6) на СП-соединении в тяге не участвует (рис. 4, б). Затем при переходе на параллельное (П) соединение не участвующая в работе на СП-соединении пара ТЭД (5–6) вновь включается в работу (рис. 4, в и 5, в).

Отключение при работе на СП-соединении двух (исправных) ТЭД в секции, на которой отключаются два других (неисправных), является вынужденной мерой, предназначенной для недопущения приложения к ним напряжения, вдвое большего по сравнению с работой в аварийном режиме на СП-соединении секции электровоза, на которой ТЭД не отключаются. Данное обстоятельство вызывает «провал» электровоза по силе тяги на СП-соединении (в режиме отключения пары ТЭД). Для устранения данного недостатка и более оптимального управления режимами отключения ТЭД электровоза ЧС7 предлагается модернизация его силовой схемы.

Сравнивая зарубежный и отечественный опыт эксплуатации пассажирских электровозов с поездами малой и средней массы — 360–720 т (6–12 вагонов), можно сделать вывод о том, что целесообразно осуществлять вождение таких поездов электровозами ЧС7, используя схему работы электровоза на четырех ТЭД при безусловном соблюдении графика движения поездов; при увеличении массы поезда до 780–960 т (13–16 вагонов) следует применять схему его работы на шести ТЭД.

В обоих случаях отключение необходимого количества ТЭД (двух или четырех), в зависимости от массы состава, осуществляется только после разгона поезда до максимальной скорости движения с участием в режиме тяги всех восьми ТЭД электровоза. Отключение части ТЭД и ведение электровоза в режиме тяги на более высоких соединениях ТЭД с применением ступеней ослабления возбуждения позволит в целом существенно снизить расход электроэнергии на тягу поездов. Ниже рассмотрим учет расхода электроэнергии пассажирскими электровозами в депо.

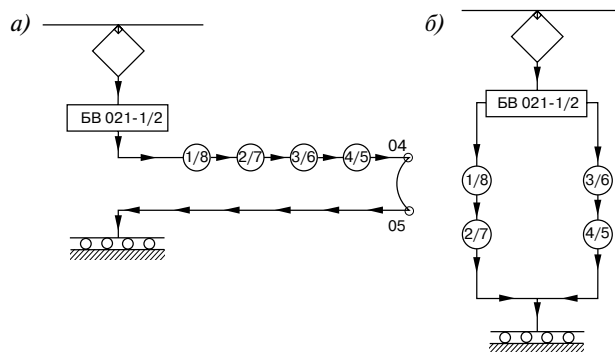


Рис. 3. Схемы перегруппировки ТЭД электровоза ЧС7 при отключении секции: а — С- и СП-соединение, $U_{\text{ТЭД}} = 750$ В; б — П-соединение, $U_{\text{ТЭД}} = 1500$ В; 1–8 — ТЭД

Fig. 3. Diagrams of rearranging traction electric motors (TEM) of the ChS7 electric locomotive when the section is switched off: а — serial connection (C) and serial-parallel connection (СП), $U_{\text{TEM}} = 750$ V; б — parallel connection (П), $U_{\text{TEM}} = 1500$ V; 1–8 — TEM

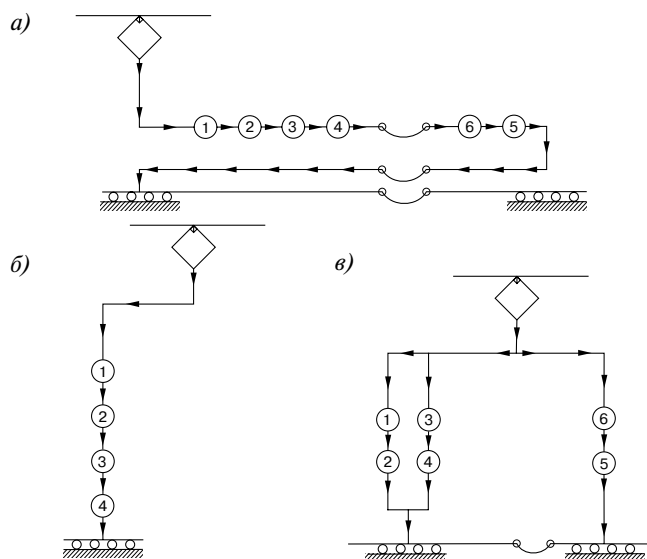


Рис. 4. Схемы перегруппировки ТЭД электровоза ЧС7 с отключенной парой ТЭД (7 и 8) в заводской схеме: а — С-соединение, $U_{\text{ТЭД}} = 500$ В; б — СП-соединение, $U_{\text{ТЭД}} = 750$ В; в — П-соединение, $U_{\text{ТЭД}} = 1500$ В; 1–6 — ТЭД

Fig. 4. Schemes for rearranging TEM of the ChS7 electric locomotive with the disconnected pair of TEM (7 and 8) in the factory circuit: а — C-connection, $U_{\text{TEM}} = 500$ V; б — СП-connection, $U_{\text{TEM}} = 750$ V; в — П-connection, $U_{\text{TEM}} = 1500$ V; 1–6 — TEM

Сравнительный статистический анализ расхода электроэнергии пассажирскими электровозами постоянного тока в локомотивных депо. На сети ОАО «РЖД» учет удельного расхода электроэнергии (УРЭ) пассажирскими электровозами в эксплуатационных локомотивных депо осуществляется с помощью регистраторов параметров движения и автоведения (РПДА), установленных на каждом электровозе эксплуатируемого парка депо и подлежащих регулярной проверке в утвержденном порядке. Полученные за каждую поездку данные анализируются на предмет их отклонения от действующих норм УРЭ по каждой серии электровозов.

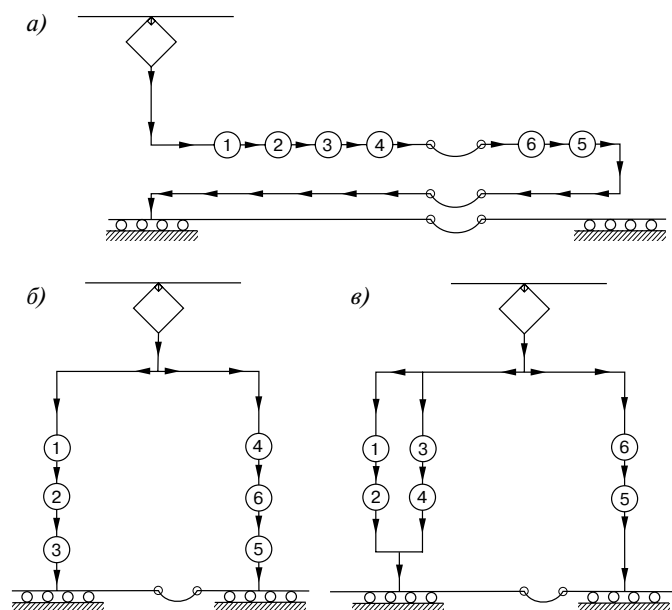


Рис. 5. Схемы перегруппировки ТЭД электроваза ЧС7 с отключенной парой ТЭД (7 и 8) при модернизации:

а — С-соединение, $U_{\text{ТЭД}} = 500 \text{ В}$; б — СП-соединение, $U_{\text{ТЭД}} = 1000 \text{ В}$; в — П-соединение, $U_{\text{ТЭД}} = 1500 \text{ В}$; 1–6 — ТЭД

Fig. 5. Schemes for rearranging TEM of the ChS7 electric locomotive with disconnected pair of TEM (7 and 8) during modernization:

а — C-connection, $U_{\text{TEM}} = 500 \text{ В}$; б — СП-connection, $U_{\text{TEM}} = 1000 \text{ В}$; в — П-connection, $U_{\text{TEM}} = 1500 \text{ В}$; 1–6 — TEM

Необходимо отметить, что учет УРЭ ведется без указания серии электроваза, на котором была совершена поездка. Фактический расход по поездке учитывается следующим образом: при экономии электроэнергии записывается положительная величина в кВт·ч/ 10^4 т·км брутто, при пережоге — отрицательная величина. Далее показатели УРЭ за поездку каждого машиниста алгебраически суммируются. Если машинист водит поездку со знакопеременными результатами, то значения сэкономленной электроэнергии суммируются, а пережог потом вычитается из полученной суммы по экономии.

Для сравнительного анализа УРЭ по сериям электровазов ЧС7 и ЭП2К на участке Москва—Вековка (легкий профиль пути) осуществлена выборка данных по учету электроэнергии РПДА за ноябрь 2018 г. в депо Москва-Сортировочная Московской железной дороги и произведено сопоставление данных при вождении одних и тех же поездов равной массы на одном и том же участке в выбранном направлении при отсутствии предупреждений об ограничении скорости на всем пути следования.

Эксплуатация 6-осных электровазов ЭП2К (мощность 4,8 МВт) совместно с 8-осными электровазами ЧС7 (мощность 6,16 МВт) показывает следующее. УРЭ примерно одинаков для массы составов 960 т как для электровазов ЭП2К, так и для ЧС7 (см. рис. 2, поездки 1–6), разброс величин менее 4%. Для поездок 9 и 10 с

массой составов 740 т УРЭ электровазов ЧС7 больше на 12,5–16,5% по сравнению с УРЭ электровазов ЭП2К, а для поездок 7 и 8 (масса 540 т) — больше на 26–32%.

Данный анализ показывает, что на легких по профилю участках пути для тяги поездов массой до 960 т (16 вагонов) включительно целесообразно использовать 6-осные электровазы ЭП2К. Однако их тяговые характеристики при вождении пассажирских поездов массой более 840 т (14 вагонов) на тяжелых по профилю участках пути используются практически полностью. Поэтому на участках с тяжелым профилем пути при вождении поездов, масса которых превышает 840 т, а также со скоростными поездами целесообразно использовать обладающие необходимыми тяговыми характеристиками более мощные электровазы ЧС7.

Как известно, масса пассажирских поездов во встречных направлениях одного обслуживаемого участка, закрепленного за электровазами, может отличаться в 4 раза (от 360 до 1440 т). Поэтому в одном из направлений обслуживаемого участка 8-осный электроваз ЧС7 при работе в режиме тяги всех ТЭД на всем пути следования будет недоиспользован по мощности при ведении поезда, масса которого в несколько раз меньше максимально установленной для данного типа локомотива.

Для рационального использования мощного 8-осного электроваза ЧС7 предлагается при вождении пассажирских поездов применять два способа отключения части ТЭД в зависимости от массы состава и средней скорости движения поезда на участке обращения электроваза.

Первый способ заключается в отключении одной секции электроваза и дальнейшем продолжении движения (после разгона до максимальной скорости на восьми ТЭД) в режиме тяги на четырех ТЭД. Данный способ возможно использовать с сохранением заводской схемы электроваза, в которой предусмотрена возможность отключения секции (рис. 3).

Второй способ заключается в отключении пары ТЭД электроваза, однако в данном случае для работы в режиме тяги на СП-соединении шести ТЭД необходима модернизация силовой схемы электроваза, которую предлагается осуществить при капитальном ремонте электровазов серии ЧС7 на локомотиворемонтном заводе (рис. 5, б).

В приписном парке ОАО «РЖД» в настоящее время находится около 220 электровазов серии ЧС7, их средний возраст составляет 29 лет. Максимальный срок эксплуатации для данной серии электровазов, не прошедших процедуру продления срока службы, установлен в 32 года. Половина от общего количества электровазов прошли процедуру продления срока службы до 2014 г. и могут эксплуатироваться до 45–50-летнего возраста. После вступления в силу 02.08.2014 г. Технического регламента Таможенного

союза ТР ТС 001/2011 «О безопасности железнодорожного подвижного состава» процедура продления срока службы локомотивов при выполнении капитальных ремонтов на заводах больше не производится. Выработавшие свой установленный срок службы электровозы серии ЧС7, не имеющие его продления, на данный момент отставлены в запас, и их общее число постоянно увеличивается.

Как для вновь изготавливаемых, так и для модернизируемых электровозов согласно п. 8.5 ГОСТ Р 55364–2012 [5] комплексная система управления и диагностики должна обеспечивать нагружение двигателя по характеристике экономичных режимов работы путем раздельного оперативного управления группами ТЭД в режиме тяги. Поэтому при проведении заводских ремонтов электровозов ЧС7 предложен вариант модернизации их силовой схемы при работе на СП-соединении и изначально отключенной паре ТЭД. После модернизации силовая схема электровоза ЧС7 работает аналогично схеме 6-осных электровозов постоянного тока с КТП. Это улучшает их тяговые свойства и способствует сокращению УРЭ на тягу пассажирских поездов средней и малой массы.

Мероприятия по сокращению УРЭ на тягу поездов. Стратегическими документами по развитию железнодорожного транспорта [6, 7] запланировано последовательное снижение УРЭ на тягу поездов, значение которого должно сокращаться на 0,4 % по сравнению с фактическим значением предыдущего года [8]. Рассмотрим основной способ сокращения УРЭ — отключение части ТЭД после разгона поезда до максимальной скорости движения с участием в режиме тяги всех ТЭД электровоза.

Предусматривается отключение одной 4-осной секции 8-осных электровозов серии ЧС7 или ТЭД одной 2-осной тележки в процессе движения [9]. Методы отключения части ТЭД [9–12] предлагались для грузовых электровозов с КТП, на которых требовался монтаж дополнительного оборудования, производящего отключение ТЭД. При этом экономия электроэнергии достигалась только при их работе с поездами, масса которых была в 2–3 раза ниже установленной нормы на конкретном участке линии. Отключение ТЭД секции электровоза осуществлялось только после разгона поезда до скорости 80 км/ч при работе в режиме тяги всех восьми ТЭД электровоза.

Как отмечается в [11], при увеличении массы состава экономия электроэнергии снижается при переходе на работу одной 4-осной секцией. При дальнейшем повышении массы экономии электроэнергии не происходит, может появиться ее перерасход, возрастающий при увеличении скорости движения. Это подтверждается расчетными данными [13]. Однако результаты испытаний [11] и расчетов [13] справедливы для грузовых поездов, имеющих значительные ве-

личины основного сопротивления движению, возрастающие с увеличением скорости движения грузовых поездов. Согласно данным [14] порожние грузовые составы имеют повышенный УРЭ, примерно в 4 раза больший, чем груженные поезда. Необходимо отметить, что в работах [9–12] возможность отключения пары ТЭД и последующей работе 8-осного электровоза (после разгона им поезда до максимальной скорости) на шести ТЭД не рассматривалась вообще.

До недавнего времени вопрос экономии электроэнергии на тягу поездов в пассажирском движении при использовании 8-осных электровозов постоянного тока с КТП практически не рассматривался, так как они эксплуатировались с составами большой массы (до 1440 т — 24 вагона). Однако представленная на рис. 1 прогрессирующая отрицательная динамика изменения средней массы пассажирского поезда и сравнительные данные УРЭ эксплуатирующихся в одном графике 6-осных электровозов ЭП2К и 8-осных электровозов ЧС7 (рис. 2) свидетельствуют о необходимости снижения УРЭ путем изыскания дополнительных резервов экономии электроэнергии при обслуживании пассажирских поездов массой 600–840 т (с 10–14 вагонами и менее) электровозами ЧС7.

Экономия расхода электроэнергии за счет снижения сил сопротивления движению поезда. На величину расхода электроэнергии сильное влияние оказывает сопротивление движению поезда, так как большая часть электроэнергии идет на его преодоление. Значения основного сопротивления движению поезда возможно прогнозировать по эмпирическим формулам, применяемым в тяговых расчетах [15]. В реальности величины сопротивления движению отдельных вагонов и поезда в целом имеют существенный разброс. Причина разброса — различный тип и техническое состояние подвижного состава, используемого в данный момент.

Опытные машинисты локомотивного депо им. Ильича (Белорусское направление) добились получения дополнительной экономии электроэнергии при вождении поездов за счет их формирования из вагонов габарита РИЦ-200 без подвагонных осевых генераторов, имеющих значительно меньшее сопротивление движению (рис. 6).

Известно, что с увеличением скорости движения удельное сопротивление ему увеличивается, и это вызывает значительный рост УРЭ. Однако ускоренные пассажирские поезда, которые двигаются с увеличенной технической скоростью, сформированные исключительно из вагонов без подвагонных осевых генераторов, имеют меньше разгонов, замедлений и остановок, что отчасти ведет к снижению УРЭ. Поэтому количество электроэнергии, затрачиваемое на преодоление основного сопротивления движению такого поезда, порой оказывается меньше, чем количество

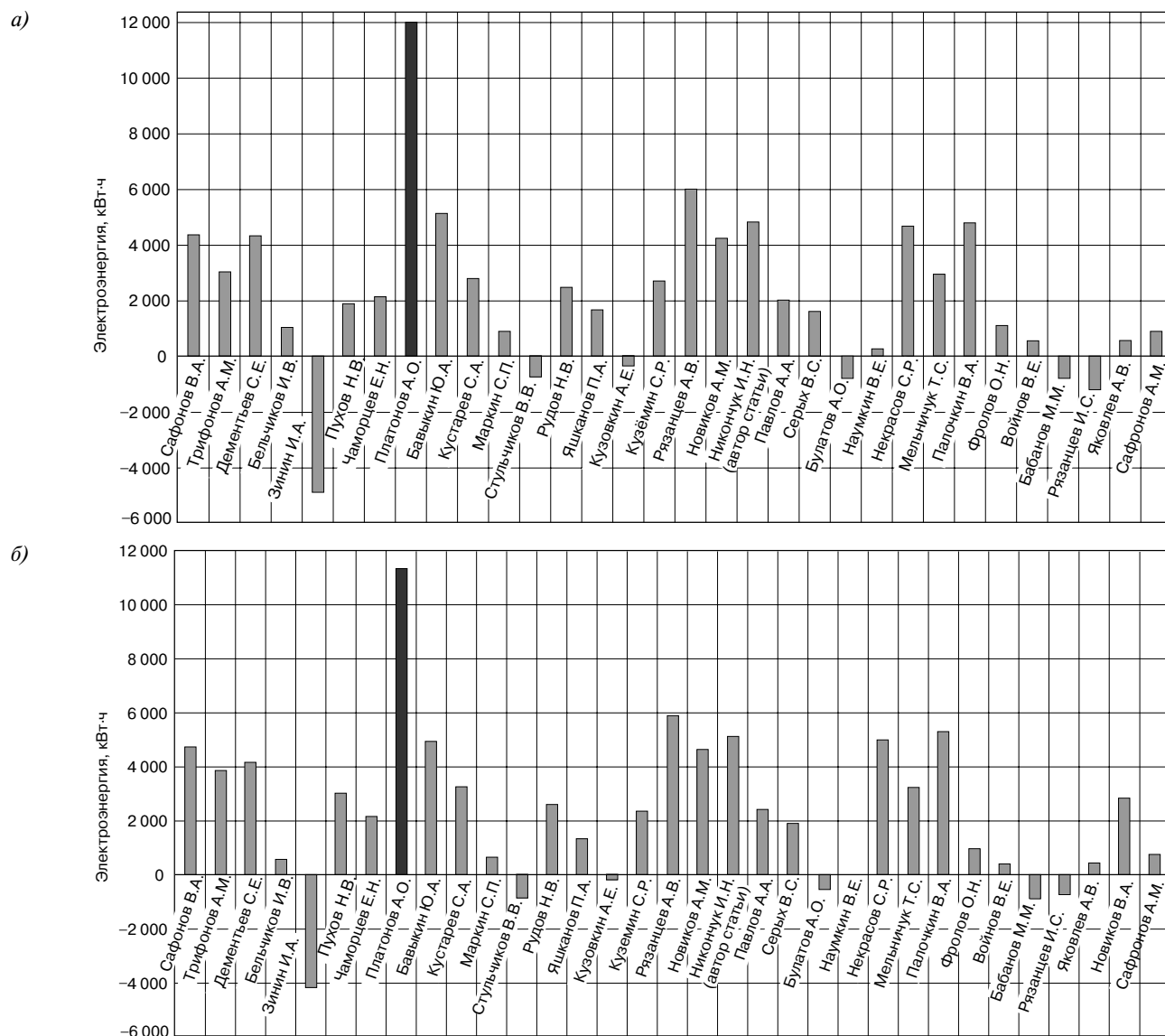


Рис. 6. Экран экономии электроэнергии: а — июль 2013 г.; б — август 2013 г.

Fig. 6. Energy saving screen: a — July 2013; б — August 2013

электроэнергии, затрачиваемое на дополнительные пуски, разгоны и остановки.

Такая картина наблюдается при вождении скоростных пассажирских международных поездов, не имеющих в пути следования графиковых остановок и состав которых сформирован из вагонов РИЦ-200. Подобный опыт имеется на тяговом плече Москва—Вязьма, протяженностью в 243 км, где при максимальной разрешенной скорости 140 км/ч техническая скорость поездов массой 420–780 т (7–13 вагонов) реализуется на уровне 107 км/ч [16]. Эксплуатация показала, что после разгона на «полной схеме» (с использованием в режиме тяги восьми ТЭД) до необходимой скорости движения и последующего отключения секции мощности остающихся в работе четырех ТЭД одной секции электроваза ЧС7 оказывается достаточно для поддержания

необходимой скорости движения поезда по участку с безусловным выполнением графика движения.

Отключение секции электроваза ЧС7. Электрической схемой электроваза ЧС7 предусмотрено дистанционное отключение секции электроваза в случае возникновения неисправностей силового оборудования в одной из секций. По мере выпуска электровазов ЧС7, начиная с № 076, переключатель «Отключение секции» дополнен позицией «Разгон СП», которая предназначалась для пуска электроваза с первой позиции СП-соединения ТЭД в случае повреждения линейных или реостатных контакторов, участвующих в работе на С-соединении.

Отключение исправной секции может быть использовано с целью экономии УРЭ на тягу поездов при условии поддержания скорости движения поезда согласно графику. Так, например, в локомотивном

депо им. Ильича, где автор статьи работал в свое время в должности машиниста электровоза, первым, кто применил данный способ, стал машинист 1-го класса А. О. Платонов. Следует отметить, что отключение секции электровоза машинист применял только после разгона поезда до максимальной скорости движения на «полной схеме» (с участием в режиме тяги всех восьми ТЭД электровоза). Другие машинисты таким приемом вождения поездов электровозом ЧС7 не пользовались. Сравнительные данные по УРЭ машинистами в депо им. Ильича за 2 месяца приведены на рис. 6.

Движение пассажирских поездов с отключенной секцией электровоза рационально использовать только после разгона поезда на «полной схеме» электровоза с использованием в режиме тяги всех восьми ТЭД. Только по достижении необходимой скорости движения рекомендуется отключать секцию и продолжать поддержание средней скорости движения на более высоком соединении ТЭД и ступенях ослабления возбуждения. Отключение ТЭД одной секции электровоза следует применять при вождении пассажирских поездов малой и средней массы 420–780 т (7–13 вагонов), а также поездов, состав которых в большинстве сформирован из вагонов без подвагонных осевых генераторов и не имеет на пути следования графиковых остановок.

При вождении поездов массой 840–1020 т (14–16 вагонов) мощности четырех ТЭД, остающихся в работе после разгона на «полной схеме», иногда оказывается недостаточно для поддержания необходимой скорости движения поезда в соответствии с графиком. В этом случае целесообразно использовать предлагаемую модернизированную схему отключения пары ТЭД одной секции (рис. 5, б), при применении которой в режиме тяги остается шесть ТЭД электровоза.

Способы отключения части ТЭД электровоза ЧС7 для экономии УРЭ. Как отмечалось выше, отключение секции 8-осного электровоза как в грузовых, так и в пассажирских поездах рационально использовать при вождении поездов средней и малой массы. Однако в целях экономии энергии на тягу более эффективным является 6-осный электровоз. Связано это в первую очередь с меньшим количеством реостатных пусковых позиций, а также с большим напряжением на коллекторах ТЭД 6-осных машин по сравнению с 8-осными на ходовых позициях С- и СП-соединения.

На рис. 7 даны схемы перегруппировки ТЭД 8-осного электровоза ЧС7, на рис. 8 — 6-осных электровозов ЧС2^Т и ЭП2К. Величины напряжения на коллекторах ТЭД для каждого из соединений рассматриваемых схем электровозов (рис. 3, 4, 5, 7, 8) представлены в таблице. Из таблицы видно, что у электровоза ЧС7 в нормальном режиме работы напряжение на коллекторах ТЭД на С- и СП-соединении соответственно на 125 и 250 В меньше по сравнению с электровозами ЧС2^Т и ЭП2К. Следовательно, 8-осный электровоз имеет меньшую

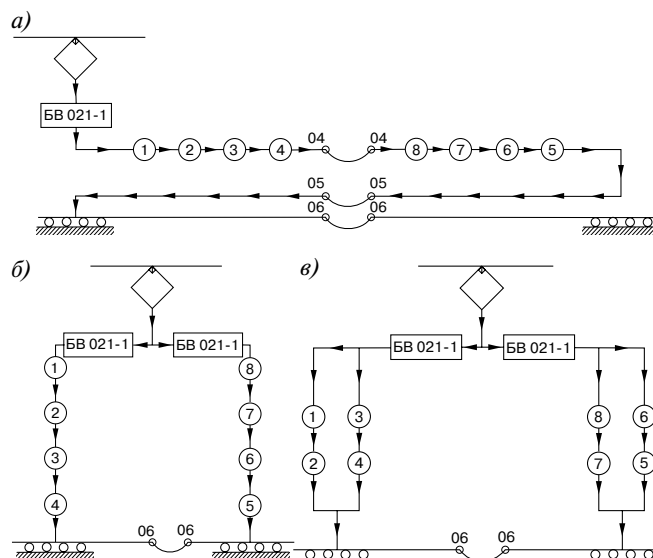


Рис. 7. Схемы перегруппировки ТЭД электровоза ЧС7 в нормальном режиме работы:

а — С-соединение, $U_{ТЭД} = 375$ В; б — СП-соединение, $U_{ТЭД} = 750$ В; в — П-соединение, $U_{ТЭД} = 1500$ В; 1–8 — ТЭД

Fig. 7. Schemes for rearranging TEM of the electric locomotive ChS7 in normal operation:

а — C-connection, $U_{TEM} = 375$ В; б — СП-connection, $U_{TEM} = 750$ В; в — P-connection, $U_{TEM} = 1500$ В; 1–8 — TEM

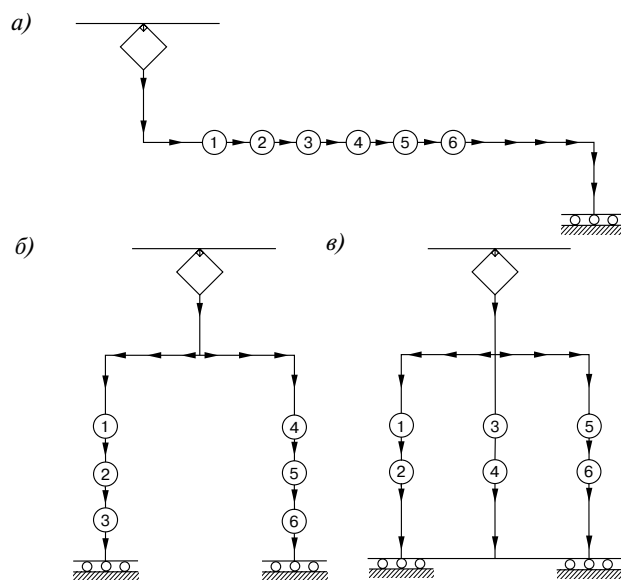


Рис. 8. Схемы перегруппировки ТЭД электровозов ЧС2^Т и ЭП2К в нормальном режиме работы: а — С-соединение, $U_{ТЭД} = 500$ В; б — СП-соединение, $U_{ТЭД} = 1000$ В; в — П-соединение, $U_{ТЭД} = 1500$ В; 1–6 — ТЭД

Fig. 8. Schemes of rearranging TEM of electric locomotives ChS2^T and EP2K in normal operation: а — C-connection, $U_{TEM} = 500$ В; б — СП-connection, $U_{TEM} = 1000$ В; в — П-connection, $U_{TEM} = 1500$ В; 1–6 — TEM

скорость движения на ходовых позициях С- и СП-соединения по сравнению с 6-осным.

На рис. 3 приведена силовая схема работы электровоза ЧС7 при отключении одной из секций. Здесь работа

Величины напряжения (В) на коллекторах ТЭД для каждого из соединений рассматриваемых схем электровозов (рис. 3, 4, 5, 7, 8)

Voltage values (V) on the TEM collectors for each of the connections of the considered electric locomotive schemes (fig. 3, 4, 5, 7, 8)

Наименование соединения	ЧС7 в нормальном режиме работы (рис. 7)	ЧС2 ^Т и ЭП2К в нормальном режиме работы (рис. 8)	ЧС7 при отключении секции (рис. 3)	ЧС7 при отключении пары ТЭД в заводской схеме (рис. 4)	ЧС7 при отключении пары ТЭД после модернизации (рис. 5)
С-соединение	375	500	750	500	500
СП-соединение	750	1000	750	750*	1000
П-соединение	1500	1500	1500	1500	1500

* В тяге на СП-соединении участвуют только четыре ТЭД.

электровоза на С- и СП-соединении при равном напряжении на ходовых позициях отличается вдвое меньшим значением пускового сопротивления (на рисунке не показано), вводимого при переходе на реостатные позиции СП-соединения, по сравнению с С-соединением.

Рис. 4 показывает работу силовой схемы при отключении пары ТЭД электровоза, реализованной заводом-изготовителем, рис. 5 — работу силовой схемы после проведения предложенной модернизации. Сравнивая работу силовой схемы электровоза до и после проведения модернизации (рис. 4, б и 5, б), мы видим, что в результате модернизации на СП-соединении (при отключенной паре ТЭД) напряжение на коллекторах ТЭД удалось повысить до 1000 В (см. таблицу), а также в режиме тяги участвуют уже шесть ТЭД (вместо четырех при заводской схеме), что значительно увеличивает силу тяги и скорость электровоза в данном режиме.

Дополнительные резервы по экономии УРЭ достигаются регулировкой производительности мотор-вентиляторов (МВ) охлаждения ТЭД. Во избежание перегрева коллектора отключенных по силовой части ТЭД из-за трения щеток без нагрузки требуется поддерживать их вентиляцию. В связи с ростом нагрузки оставшихся в работе ТЭД следует точно определить производительность МВ, необходимую для исключения перегрева их обмоток.

На электровозе ЧС7 штатно имеются две ступени частоты вращения электродвигателей МВ, которые регулируются соответствующим положением расположенного на пульте машиниста переключателя «Вентиляторы»: «НС» (низкая скорость) или «ВС» (высокая скорость). При включении в положение «ВС» электрической схемой формируются две ветви по два последовательно соединенных электродвигателя МВ с питающим напряжением на коллекторе 1500 В. В положении «НС» все электродвигатели МВ соединяются последовательно, и напряжение на их коллекторах составляет 750 В. Питание всех четырех электродвигателей МВ электровоза напрямую осуществляется от первого быстродействующего выключателя (БВ-1) и никак не зависит от положения выключателя секции. То есть

при отключении по силовой схеме ТЭД любой из секций их охлаждение сохраняется с выбранной частотой вращения электродвигателей МВ.

Снижение частоты вращения электродвигателей МВ в 2 раза приводит к уменьшению потребляемой ими мощности в 4 раза. Следовательно, в режиме низкой производительности, равной $\frac{1}{2}$ от номинальной, их общая мощность снижается с 36 кВт (номинальный режим работы) до 9 кВт. Соответственно, снижается и УРЭ на собственные нужды, который в этом случае составит 1,5–1,8 % от общего расхода на тягу вместо 6–7 % при номинальном режиме работы электродвигателей МВ.

Сравнительный анализ УРЭ электровозов ЧС7 и ЭП2К с различными массами поездов показывает преимущества электровоза ЭП2К при вождении поездов средней массы 840 т (14 вагонов и менее) на участках с легким профилем пути и относительно невысокой средней скоростью движения. На участках пути с тяжелым профилем для вождения поездов, масса которых более 840 т, а также скоростных поездов предпочтительнее использовать электровозы серии ЧС7.

При вождении поездов, масса которых составляет около $\frac{3}{4}$ от максимально установленной на участке, предложенный автором вариант модернизации силовой схемы электровоза ЧС7 позволит иметь возможность оперативного отключения пары ТЭД с рациональной схемой их перегруппировки, в результате чего планируемый показатель УРЭ может сократиться на величину до 15 %. В случае снижения массы состава от $\frac{1}{2}$ до $\frac{1}{4}$ целесообразно использовать отключение секции (четырех) ТЭД, при этом показатель УРЭ может быть снижен до 25 %.

Выводы. 1. Вождение средних (600–840 т) и легких (360–480 т) пассажирских поездов 8-осными электровозами постоянного тока с использованием в режиме тяги восьми ТЭД приводит к недоиспользованию их мощности и повышенному расходу электроэнергии по сравнению с 6-осными электровозами с КТП.

2. Заводская схема электровоза ЧС7 предусматривает без потери мощности отключение четырех ТЭД (одной

из секций электровоза). Предложен проект модернизации силовой схемы электровоза, предусматривающий возможность работы как в составе восьми, четырех, так и шести ТЭД с рациональной схемой их перегруппировки.

3. Ожидаемая экономия УРЭ при работе 8-осного электровоза с пассажирскими поездами средней и малой массы на шести или четырех ТЭД может достигать соответственно 15 или 25 % по сравнению с его работой с данными поездами в штатном режиме (постоянном использовании в режиме тяги восьми ТЭД).

4. Для вождения скоростных поездов, курсирующих со скоростью до 140 км/ч, а также на участках с тяжелым профилем пути и массой состава более 840 т (14 вагонов) целесообразно использовать электровозы ЧС7. Электровозы ЭП2К следует использовать для вождения пассажирских поездов, максимальная скорость которых не превышает 120 км/ч, на участках с легким профилем пути и массой состава не более 1080 т (18 вагонов).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. О нумерации поездов для графика движения [Электронный ресурс]: распоряжение ОАО «РЖД» от 5 апр. 2014 г. № 859р. URL: <https://jd-doc.ru/2014/aprel-2014/13502-rasporyazhenie-oao-rzhd-ot-05-04-2014-n-859r> (дата обращения: 15.02.2019 г.).
2. Режимы работы магистральных электровозов / О. А. Некрасов [и др.]; под. ред. О. А. Некрасова. М.: Транспорт, 1983. С. 174.
3. Служебное расписание движения пассажирских поездов с 8 дек. 2019 г. / Московская железная дорога — филиал ОАО «РЖД». М., 2019.
4. Lokomotivy rady ES 499.0/350 / J. Pernicka [et al.]. Praha: Hart Press, 2005. S. 216.
5. ГОСТ Р 55364—2012. Электровозы. Общие технические требования: нац. стандарт Российской Федерации: утв. и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 19 дек. 2012 г. № 1916-ст: дата введения 2014-01-01. М.: Стандартинформ, 2013. С. 35.
6. Энергетическая стратегия ОАО «РЖД» на период до 2010 года и на перспективу до 2030 года [Электронный ресурс]. URL: http://doc.rzd.ru/doc/public/ru?STRUCTURE_ID=704&layer_id=5104&id=4043#6007 (дата обращения: 15.02.2019 г.).

doc.rzd.ru/doc/public/ru?STRUCTURE_ID=704&layer_id=5104&id=4043#6007 (дата обращения: 15.02.2019 г.).

7. Транспортная стратегия РФ на период до 2030 года: утв. распоряжением Правительства РФ от 22 нояб. 2008 г. № 1734р [Электронный ресурс]. URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/94460> (дата обращения: 15.02.2019 г.).
8. Валинский О. С. Повышая эффективность управления локомотивным комплексом // Локомотив. 2017. № 1. С. 3—6.
9. Анализ научных подходов к повышению эффективности использования грузовых электровозов / А. В. Заручейский [и др.] // Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО «РЖД». 2014. № 1. С. 37—41.
10. Анализ затрат электроэнергии на тягу электровозами со схемой дистанционного отключения части двигателей / Г. Я. Класен [и др.] // Исследование работы электрооборудования и вопросы прочности электроподвижного состава: науч. тр. / Омский ин-т инженеров ж.-д. транспорта. Омск: ОМИИТ, 1974. Т. 163. С. 45—51.
11. Сенаторов В. А. Отключение части тяговых электродвигателей электровоза с целью экономии электроэнергии на тягу при ведении легковесного поезда // Вестник ВНИИЖТ. 2003. № 1. С. 15—19.
12. Медлин Р. Я., Рождественский С. М., Усманов Ю. А. Экономия энергии при отключении части тяговых двигателей на электровозах постоянного тока и методика ее определения // Исследование работы электрооборудования и вопросы прочности электроподвижного состава: науч. тр. / Омский ин-т инженеров ж.-д. транспорта. Омск, 1974. Т. 163. С. 33—44.
13. И все же двигатели отключать не следует / П. И. Борцов [и др.] // Электрическая и тепловозная тяга. 1978. № 10. С. 35—37.
14. Калинин Ю. С., Исаев А. В. Как создавался первый в мире автомашинист // Локотранс. 2013. № 3. С. 26—37, 43—46.
15. Правила тяговых расчетов для поездной работы. М.: Транспорт, 1985. 288 с.
16. Борисенков С. С. Обоснование параметров режимов движения скоростных пассажирских поездов с минимизацией энергозатрат при локальных ограничениях скорости: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07. М., 2013. 154 с.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

НИКОНЧУК Иван Николаевич,
аспирант, АО «ВНИИЖТ»

Статья поступила в редакцию 14.03.2019 г., актуализирована 13.06.2020 г. принята к публикации 21.09.2020 г.

Для цитирования: Никончук И. Н. К вопросу повышения эксплуатационной энергетической эффективности работы восьмиосных пассажирских электровозов постоянного тока // Вестник ВНИИЖТ. 2020. Т. 79. № 6. С. 373—382. DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2020-79-6-373-382>.

On the issue of increasing operational energy efficiency of eight-axle passenger DC electric locomotives

I. N. NIKONCHUK

Joint Stock Company "Railway Research Institute" (JSC "VNIIZHT"), Moscow, 129626, Russia

Abstract. Mass of a passenger train and, accordingly, number of cars in its composition is selected based on the amount of passenger traffic on the section, determined by the seasonal demand for transportation in each direction. In one direction of the section serviced by an electric locomotive, the mass of a passenger train may differ several times from the opposite direction, which depends on the destination station of the train and the period of its circulation.

At present, in addition to 6-axle electric locomotives of the ChS2T and EP2K series, more powerful 8-axle electric locomotives of the ChS7 series operate in the same schedule for traction of passenger trains on railway sections electrified with direct current with a voltage of 3 kV catenary. All three series of the considered electric locomotives are designed for a maximum operating speed of up to 160 km/h. In this regard, there is a situation with the underutilization of the maximum speed and excess power of the ChS7 electric

locomotives, especially when operating with passenger trains of medium and low weight and a limited speed of 120 km/h.

The comparative data on the specific power consumption of the EP2K 6-axle electric locomotives and the ChS7 8-axle electric locomotives operating in the same schedule, presented in the article, indicate the need to find additional reserves for saving the specific power consumption when servicing passenger trains of medium and low weight with ChS7 electric locomotives.

The electric locomotive power system includes traction and auxiliary electric machines. The article discusses ways to turn off part of traction motors, which can be carried out with a standard electric locomotive circuit. However, when one section of the electric locomotive is turned off, the power of the four traction motors remaining in operation is not always sufficient to drive a passenger train according to the schedule. Therefore, a variant of improving the power circuit of an electric locomotive in the process of carrying out its overhaul is proposed. This option represents the modernization of the power circuit of the ChS7 electric locomotive when operating on a series-parallel connection with a pair of traction motors disconnected. As a result, the power circuit of the 8-axle electric locomotive operates similarly to the circuit of 6-axle DC electric locomotives with a collector traction drive. The expected savings in specific power consumption can reach 15 % in comparison with the operation of an 8-axle electric locomotive ChS7 in normal mode. Switching off one section of the electric locomotive and further running the train on four traction electric motors will reduce the specific power consumption by up to 25 %.

Keywords: electric locomotive; collector traction motors; power circuit; energy consumption; disconnecting part of the traction motors; kinetic energy of train motion; train mass

DOI: <https://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2020-79-6-373-382>

REFERENCES

1. *On the numbering of trains for the timetable*. Order of the JSC "Russian Railways" dated April 5, 2014, No. 859r. URL: <https://jd-doc.ru/2014/april-2014/13502-rasporyazhenie-oao-rzhd-ot-05-04-2014-n-859r> (retrieved on 15.02.2019) (in Russ.).
2. Nekrasov O. A., Lisitsyn A. L., Muginshteyn L. A., Rakhmaninov V. I. *Rezhimy raboty magistral'nykh elektrovozov* [Operating modes of mainline electric locomotives]. Moscow, Transport Publ., 1983, p. 174.
3. *Service timetable for passenger trains from December 8th, 2019*. Moscow Railway — branch of the JSC "Russian Railways", Moscow, 2019 (in Russ.).
4. Pernicka J., Kuchta T., Zapletal S., Kukucik P., Dujnic M., Flandera F. *Lokomotivy rady ES 499.0/350*. Praha, Hart Press, 2005, p. 216 (in Czech).
5. ГОСТ R 55364–2012. *Electric locomotives. General technical requirements*. National standard of the Russian Federation. Approved and put into effect by order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology dated December 19, 2012 No. 1916-st. Moscow, Standartinform Publ., 2013, p. 35 (in Russ.).
6. *Energy strategy of the JSC "Russian Railways" for the period until 2010 and for the future until 2030*. URL: http://doc.rzd.ru/doc/public/ru?STRUCTURE_ID=704&layer_id=5104&id=4043#6007 (retrieved on 15.02.2019) (in Russ.).
7. *Transport strategy of the Russian Federation for the period up to 2030*. Approved by order of the Government of the Russian Federation dated November 22, 2008 No. 1734r. URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/94460> (retrieved on 15.02.2019) (in Russ.).
8. Valinskiy O. S. *Povyshaya effektivnost' upravleniya lokomotivnym kompleksom* [Increasing the efficiency of management of the locomotive complex]. Lokomotiv, 2017, no. 1, pp. 3–6.
9. Zarucheskii A. V., Murzin R. V., Kuchumov V. A., Nikiforova N. B. *Analiz nauchnykh podkhodov k povysheniyu effektivnosti ispol'zovaniya gruzovykh elektrovozov* [Analysis of scientific approaches to increasing the efficiency of the use of freight electric locomotives]. Byulleten' Ob"edinennogo uchenogo soveta OAO "RZHD" [Bulletin of the Joint Scientific Council of the JSC "Russian Railways"], 2014, no. 1, pp. 37–41.
10. Klassen G. Ya., Medlin R. Ya., Rozhdestvenskiy S. M., Usmanov Yu. A. *Analiz zatrat elektroenergii na tyagu elektrovozami so skhemoy distantsionnogo otklyucheniya chasti dvigateley* [Analysis of electricity consumption for traction by electric locomotives with a scheme for remote shutdown of part of the engines]. Issledovanie raboty elektrooborudovaniya i voprosy prochnosti elektropodvizhnogo sostava: nauch. tr. [Research of the operation of electrical equipment and issues of strength of electric rolling stock: scientific works]. Omskiy in-t inzhenerov zh.-d. transporta [Omsk Institute of Railway Engineers]. Omsk, OmlIT Publ., 1974, Vol. 163, pp. 45–51.
11. Senatorov V. A. *Otklyuchenie chasti tyagovykh elektrodvigateley elektrovoza s tsel'yu ekonomii elektroenergii na tyagu pri vedenii legkovesnogo poezda* [Disconnecting part of the traction electric motors of an electric locomotive in order to save electricity for traction when driving a lightweight train]. Vestnik VNIIZHT [Vestnik of the Railway Research Institute], 2003, no. 1, pp. 15–19.
12. Medlin R. Ya., Rozhdestvenskiy S. M., Usmanov Yu. A. *Ekonomiya energii pri otklyuchenii chasti tyagovykh dvigateley na elektrovozhakh postoyannogo toka i metodika ee opredeleniya* [Energy saving when part of traction motors on direct current electric locomotives is turned off and the method of its determination]. Issledovanie raboty elektrooborudovaniya i voprosy prochnosti elektropodvizhnogo sostava: nauch. tr. [Research of the operation of electrical equipment and issues of strength of electric rolling stock: scientific works]. Omskiy in-t inzhenerov zh.-d. transporta [Omsk Institute of Railway Engineers]. Omsk, 1974, Vol. 163, pp. 33–44.
13. Bortsov P. I., Dubrovskiy Z. N., Kurbasov A. S., Bystritskiy Kh. Ya. *I vse zhe dvigateli otklyuchat' ne sleduet* [And yet the engines should not be turned off]. Elektricheskaya i teplovoznaya tyaga, 1978, no. 10, pp. 35–37.
14. Kalinin Yu. S., Isaev A. V. *Kak sozdavalsya pervyy v mire avtomashinist* [How the world's first car driver was created]. Lokotrans, 2013, no. 3, pp. 26–37, 43–46.
15. *Rules for traction calculations for train operation*. Moscow, Transport Publ., 1985, 288 p. (in Russ.).
16. Borisenkov S. S. *Obosnovanie parametrov rezhimov dvizheniya skorostnykh passazhirskikh poezdov s minimizatsiey energozatrat pri lokal'nykh ogranicheniyakh skorosti. Dis. ... kand. tekhn. nauk* [Substantiation of the parameters of the modes of high-speed passenger trains motion with minimization of energy consumption at local speed limits. Cand. tech. sci. diss.]. Moscow, 2013, 154 p.

ABOUT THE AUTHOR

Ivan N. NIKONCHUK,
Postgraduate, JSC "VNIIZHT"

Received 14.03.2019
Revised 13.06.2020
Accepted 21.09.2020

■ E-mail: nikonchukivan1985@gmail.com (I. N. Nikonchuk)

For citation: Nikonchuk I. N. On the issue of increasing operational energy efficiency of eight-axle passenger DC electric locomotives // VNIIZHT Scientific Journal. 2020. 79 (6): 373–382 (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2020-79-6-373-382>.

Содержание журнала «Вестник ВНИИЖТ» за 2020 год

№ 1

Е. А. Сотников, М. М. Гоник, С. В. Хомяков, С. В. Михайлов. Нормирование размеров неснижаемого резерва локомотивов на станциях их оборота	3–8
В. С. Коссов, О. Г. Краснов, М. Г. Акашев. Влияние смятия в зоне сварных стыков на силовое воздействие подвижного состава на путь	9–16
С. В. Власьевский, О. А. Малышева, Н. Г. Шабалин, В. В. Семченко. Оценка энергетической эффективности электровозов ЗЭС5К при использовании технологии интервального регулирования движения по типу «виртуальная сцепка»	17–25
С. В. Петров. Управление эффективностью стратегических решений по рационализации системы технического обслуживания и ремонта пассажирских вагонов	26–33
Г. М. Стоякин, А. В. Костин, С. Н. Науменко. Пути улучшения характеристик климатических систем пассажирского подвижного состава	34–38
И. В. Сиротенко, Е. Е. Коссов. К вопросу повышения надежности крышки цилиндра тепловозного дизеля	39–47
А. М. Лыков, В. П. Иванов, Д. Д. Лыков. Расчет теплообмена при изготовлении железнодорожных колес повышенной твердости	48–55
Правила оформления статей, публикуемых в журнале «Вестник ВНИИЖТ»	56

№ 2

М. И. Мехедов, Л. А. Мугинштейн. О процессе взаимодействия технических станций и перегонов при пропуске поездопотоков	59–65
Т. А. Винокурова, А. Б. Галушкин. Исследование влияния климатических факторов на работоспособность пневмооболочек, закрепляющих груз при перевозке железнодорожным транспортом	66–73
В. Н. Каплин, А. А. Абрашито, Е. Н. Гринь. Технология и определение применимости пневмосуфляжа при текущем содержании пути	74–79
Л. А. Герман, А. С. Серебряков, В. Л. Осокин, Д. В. Якунин. Переключаемая фильтрокомпенсирующая установка в тяговой сети переменного тока	80–87
Т. И. Набатчикова, С. Н. Науменко, Г. Б. Гусев. О влиянии внешних факторов на коэффициент теплопередачи кузова специализированного транспортного средства для перевозки скоропортящихся грузов	88–92
Ю. М. Кулинич, Д. Ю. Дрогоров. Исследование электромагнитных процессов в системе «контактная сеть — электровоз» при уменьшении	

минимального угла открытия тиристоров в выпрямительно-инверторном преобразователе	93–102
В. А. Баранов, И. П. Викулов, А. А. Киселев, А. С. Мазнев. Исследование функциональной схемы и алгоритма работы следящей системы электродинамического торможения электропоезда постоянного тока	103–116

№ 3

Ю. С. Ромен, Б. Э. Глюзберг, Е. А. Тимакова, В. А. Быков. Особенности математического моделирования динамических процессов прохождения вагоном стрелочного перевода	119–126
В. В. Королев, А. А. Локтев, И. В. Шишкина, Е. А. Гридасова. Особенности работы пролетного строения мостового перехода при смещении оси рельсошпальной решетки	127–138
Е. П. Фигурнов, Ю. И. Жарков, Н. А. Попова. К выбору вида схемы замещения тяговой подстанции при расчете токов короткого замыкания в системе электроснабжения 25 кВ	139–144
Е. А. Сидорова. Исследование влияния параметров железнодорожного пути в плане и профиле на показатели взаимодействия пути и подвижного состава	145–153
С. В. Чунин, В. И. Шабуневич, А. Н. Савоськин. Экспериментальное исследование собственных частот и форм колебаний рельса	154–160
А. С. Космодамианский, В. И. Воробьев, М. Ю. Капустин, О. В. Измеров, Д. Н. Шевченко. Проблемы создания перспективной двухосной тележки маневрового тепловоза	161–170
Д. О. Давыдов. Методика проведения испытаний по определению изотермических свойств кузова грузовых вагонов, предназначенных для перевозок скоропортящихся грузов, в условиях отсутствия специализированной климатической камеры	171–179
Правила оформления статей, публикуемых в журнале «Вестник ВНИИЖТ»	180

№ 4

М. И. Мехедов, Е. А. Сотников, Е. А. Мехедова. Развитие системы нормирования и учета показателей выполнения расписаний движения пассажирских и пригородных поездов для железных дорог и сети в целом	183–190
С. Л. Самошкин, С. С. Миронов, О. С. Самошкин, М. В. Ходенков, А. С. Сариков. Общие принципы расширения скоростного диапазона работы систем автономного энергоснабжения пассажирских вагонов	191–201

Б.Э. Глюзберг, М.И. Титаренко, Е.А. Тимакова, А.А. Савченко, С.В. Кузнецов, А.М. Калачев. Динамическое воздействие вагонов, имеющих колесные пары с тонкими гребнями, на стрелочные переводы	202–208
В.О. Певзнер, В.В. Кочергин, В.В. Третьяков, К.В. Колесников, Е.А. Полунина. Оценка работы пути, находящегося под воздействием продольных сил при реализации максимальных тяговых режимов при использовании электровазов с асинхронным тяговым приводом	209–216
А.Е. Миронов, Г.Г. Антюхин, Е.И. Гершман, П.А. Подрабинник, Е.В. Кузнецова, Н.Ю. Перетягин. Новые антифрикционные алюминиевые сплавы для литых монометаллических подшипников скольжения. Стендовые испытания	217–223
Ю.М. Лазаренко, Д.Н. Аршинцев, В.В. Семерханов, Е.А. Митина, Е.В. Капускина. О двухъярусной перевозке крупнотоннажных контейнеров: начало работ, приостановка программы, мероприятия по ее пролонгации	224–229
С.Ю. Кириллова, К.Ю. Николаев. К определению коэффициентов съема пропускной способности участков железных дорог	230–238
Д.В. Комнатный. Анализ и прогнозирование устойчивости систем управления движением поездов к сверхширокополосным электромагнитным импульсам преднамеренного воздействия	239–244
К.С. Субханвердиев. Расчет специфических режимов работы релейной защиты тяговых сетей переменного тока	245–248

№ 5

С.В. Петров, И.В. Назаров, О.Н. Назаров. Целостная модель формирования требований к грузовым вагонам на примере проекта «Северный широтный ход»	251–260
Н.Ф. Сирина, В.П. Першин. Реляционная модель государственно-частного партнерства на железнодорожном транспорте	261–270
В.О. Певзнер, А.И. Чечельницкий, К.В. Шапетько, Е.А. Сидорова, А.Ю. Сластенин. Влияние длинных неровностей продольного профиля на безопасность движения в условиях интенсификации перевозочного процесса	271–275
Б.М. Лapidус. О создании Интеллектуальной мультимодальной транспортной системы России и проекта «Интеллектуальный контейнерный конвейер»	276–281
С.Л. Самошкин, С.Д. Коршунов, О.С. Самошкин, А.Г. Удельнов, Д.В. Семенов. Разработка и внедрение первых отечественных вагонов-автомобилевозов для перевозки	

легковых автомобилей в составе пассажирских поездов	282–291
А.Б. Косарев, И.А. Ребров, С.Н. Науменко, А.В. Барч. Научные приоритеты использования альтернативных источников энергии на железнодорожном транспорте	293–300
Е.Е. Коссов, В.В. Асабин, А.Г. Силота, А.Н. Журавлев, Л.Е. Коссова. Некоторые аспекты применения газомоторного топлива на дизелях тепловозов	301–309
А.М. Лукьянов, А.А. Лукьянова. Об элементах конструкции полимерных изоляторов контактной сети	310–316

№ 6

С.П. Вакуленко, Д.Ю. Роменский, М.И. Мехедов, А.А. Гавриленков, А.М. Насыбуллин, В.В. Соловьев. Экономические параметры перевозок поездами «Холодный экспресс» на примере маршрута Владивосток—Москва—Санкт-Петербург	319–326
А.Н. Савоськин, Н.С. Лавлинская. Проверка адекватности методики генерации случайного процесса возмущения колебаний рельсовых экипажей по импульсной характеристике формирующего фильтра	327–336
А.Э. Габидуллин, Д.В. Горский, И.В. Назаров, В.А. Никитин. Расчет зависимости коэффициента трения композиционных гребневых колодок для локомотивов от силы нажатия и скорости торможения	337–342
Г.Л. Венедиктов, В.М. Кочетков. Комплексная оптимизация эксплуатации пассажирских поездов на базе автоматизированной системы управления рентабельностью пассажирских перевозок	343–350
Г.И. Гаджиметов, Г.И. Петров, Ю.А. Панин, И.Е. Ильин. К вопросу выбора вертикальных и горизонтальных связей в тележке для грузовых вагонов скоростных поездов	351–359
Т.И. Набатчикова, С.Н. Науменко, А.В. Костин, Г.Б. Гусев. Выбор специального транспортного средства для перевозки скоропортящихся грузов по железной дороге	360–364
Е.А. Сидорова, О.Н. Ваганова, А.Ю. Сластенин. Методы определения положения кривой в плане и влияние геометрии пути на показатели взаимодействия пути и подвижного состава	365–372
И.Н. Никончук. К вопросу повышения эксплуатационной энергетической эффективности работы восьмиосных пассажирских электровазов постоянного тока	373–382
Содержание журнала «Вестник ВНИИЖТ» за 2020 год	383–384

2 Great Shows 1 Exciting Rail Event

Book Your Stand Now

**Joining forces
to shape the future of UK rail**

In 2021 Railtex will play host to Infrarail.

The UK's most important events in the rail calendar will come together to form the ultimate show for the rail industry.

To be part of the most comprehensive rail exhibition of 2021 contact the team on **+44 (0)1727 814 400** or via email **uk-railhub@mackbrooks.co.uk**

**11-13 May 2021
NEC, Birmingham**

www.uk-railhub.com



RAILTEX

**15th International Exhibition of
Railway Equipment, Systems & Services**



INFRARAIL

**13th International Railway
Infrastructure Exhibition**



Электроника Транспорт 2021

14-я специализированная выставка электроники и информационных технологий
для пассажирского транспорта и транспортной инфраструктуры

Проводится в рамках Российской недели общественного транспорта www.publictransportweek.ru



12-14 МАЯ, МОСКВА
КВЦ «СОКОЛЬНИКИ»
WWW.E-TRANSPORT.RU