НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

ИЗВЕСТИЯ ПЕТЕРБУРГСКОГО УНИВЕРСИТЕТА ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ, том 16, выпуск 2, 2019

ISSN (Print) 1815-588X

ISSN (Online) 2658-6851

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

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

Адрес редакции
190031, СПб., Московский пр., 9,
тел. (812) 314-92-32
e-mail: izvestia@izvestiapgups.org

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

Журнал зарегистрирован
в Российском индексе научного цитирования (РИНЦ)

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

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

Журнал имеет институт рецензирования

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

РЕДАКЦИЯ ЖУРНАЛА

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

Заместитель главного редактора
В. В. Сапожников, д-р техн. наук, профессор

Научный редактор
А. К. Канаев, д-р техн. наук, доцент

Выпускающий редактор
Э. А. Горелик

Перевод на английский язык
Ю. А. Фаттахова, Д. И. Иванов

Верстка
А. А. Стуканова

Редактор
В. И. Сайфутдинова

МЕЖДУНАРОДНЫЙ РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

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

Юсупов Рафаэль Мидхатович, д-р техн. наук, профессор, чл.-корр. РАН, Институт информатики и автоматизации РАН, Санкт-Петербург, Россия

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

Ситаж Марек, профессор, Силезский технический университет, Польша

Христов Христо, профессор, Технический университет, София, Болгария

РЕДКОЛЛЕГИЯ

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

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

Подписано в печать с оригинал-макета 20.06.2019.
Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная. Печать МФУ.
Усл. печ. л. 19,125. Установочный тираж 300 экз.

Заказ . Цена свободная.
Отпечатано в типографии ПГУПС
190031, СПб., Московский пр., 9.

© ФГБОУ ВО ПГУПС, 2019

SCIENTIFIC PUBLICATION

PROCEEDINGS OF PETERSBURG TRANSPORT UNIVERSITY, volume 16, issue 2, 2019

ISSN (Print) 1815-588X

ISSN (Online) 2658-6851

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

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

Editorial address
190031, St. Petersburg, Moskovskiy pr., 9, (812) 314-92-32
e-mail: izvestia@izvestiapgups.org

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

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

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

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

The Journal has the Peer-review division

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

JOURNAL STAFF

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

Deputy chief editor
V. Sapozhnikov, D.Eng., Professor

Science editor
A. Kanayev, D.Eng., Associate Professor

Executive editor
E. Gorelik

English translation
Yu. Fattakhova, D. Ivanov

Layout
A. Stukanova

Editor
V. Sayfutdinova

INTERNATIONAL EDITORIAL BOARD

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

Rafael Yusupov, D. Eng. Sci., Professor, corresponding member of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia

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

Marek Sitazh, Professor, Silesian University of Technology, Poland

Khristo Khristov, Professor, Technical University of Sofia, Bulgaria

EDITORIAL TEAM

Valeriy Sapozhnikov, D. Eng. Sci., Professor, Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia, Chairman of Editorial team
Mikhail Badyer, D. Eng. Sci., Professor, Moscow State University of Railway Engineering, Moscow, Russia
Tatiana Belash, D. Eng. Sci., Professor, Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia
Yury Belentsov, D. Eng. Sci., Professor, Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia
Lyudmila Blazhko, D. Eng. Sci., Professor, Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia
Mikhail Bryn', D. Eng. Sci., Professor, Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia
Larisa Gubachyeva, D. Eng. Sci., Professor, Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, Luhansk, Ukraine
Aleksander Guda, D. Eng. Sci., Professor, Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russia
Vladimir Egorov, D. Eng. Sci., Associate Professor, Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia
Andrey Kanayev, D. Eng. Sci., Associate Professor, Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia
Aleksander Ledyayev, D. Eng. Sci., Professor, Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia
Tatiana Petrova, D. Eng. Sci., Professor, Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia
Vladimir Smirnov, D. Eng. Sci., Professor, Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia
Valentina Solovyova, D. Eng. Sci., Professor, Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia
Klara Talantova, D. Eng. Sci., Associate Professor, Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia
Tamila Titova, D. Eng. Sci., Professor, Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia
Yury Frolov, D. Eng. Sci., Professor, Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia
Nina Shangina, D. Eng. Sci., Professor, Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia
Valeriy Shtykov, D. Eng. Sci., Professor, Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Published by Petersburg State Transport University
190031, St. Petersburg., Moskovskiy pr., 9
Open price

© Petersburg State Transport University, 2019

СОДЕРЖАНИЕ

→ ПРОБЛЕМАТИКА ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

О. Д. Покровская, Т. С. Титова

Инструментарий логистического нормирования для проведения аудита транспортно-складских систем 175

→ СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ – ТРАНСПОРТУ

А. М. Орлова, Е. А. Рудакова, Д. В. Шевченко, А. В. Гусев, С. И. Попович, Р. А. Савушкин

Анализ методик расчета горизонтальной жесткости пружин рессорного подвешивания грузовых вагонов 191

А. А. Киселев, Л. С. Блажко, А. С. Гапоненко, А. В. Романов

Влияние геометрических параметров железнодорожного пути на величину эквивалентной коничности колесной пары 202

С. В. Кротов, Д. П. Кононов, А. А. Соболев

Влияние трения на контактно-усталостную долговечность образцов из рельсовой и колесной сталей 212

А. И. Адылходжаев, С. С. Шаумаров, Н. Р. Мухаммадиев

Аналитическое и экспериментальное исследование структурной организации теплоизоляционно-конструктивных строительных материалов для железнодорожных зданий и сооружений 220

И. В. Назаров, Е. И. Артамонов, А. Л. Ковязин

Разработка метода ресурсных испытаний тормозной системы тележки 230

В. И. Смирнов, С. А. Видюшенков, А. С. Кухарева

Динамические особенности скатывания вагонов с сортировочной горки 241

О. Р. Хамидов

Диагностирование и моделирование несимметричных режимов асинхронных тяговых электродвигателей локомотивов с применением искусственных нейронных сетей 251

К. К. Ким, И. Р. Крон, Я. С. Ватулин, Е. Я. Ватулина

Разработка метода по уменьшению лобового аэродинамического сопротивления капсулы трубопроводного транспорта 263

Цаплин А. Е., Васильев В. А., Фомин С. А.

Совершенствование контроля узлов механической части электрического подвижного состава применением интеллектуальной системы тепловизионного контроля 268

А. Н. Савоськин, Ю. С. Ромен, А. П. Васильев

Характеристики упруго-фрикционных комплектов рессорного подвешивания 275

А. С. Гасюк, Э. С. Оганьян

Расчетно-экспериментальные методы оценки ресурса базовых частей подвижного состава 285

В. Б. Вилков, А. И. Дергачев, А. К. Черных, А. О. Кравцов

Об одном подходе к созданию информационно-безопасных систем связи 292

→ **ОБЩЕТЕХНИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ**

С. В. Микони, Д. П. Бураков

Отладка типовых одномерных функций полезности в модели многомерной полезности 301

Н. В. Гребенников

Математическая модель для анализа электромагнитных процессов в реактивных индукторных машинах с сильным взаимным влиянием фаз 315

CONTENTS

→ PROBLEMATIC OF TRANSPORT SYSTEM

O. D. Pokrovskaya, T. S. Titova
The tools of logistic rationing for conducting audit of storage-retrieval systems 175

→ HIGH TECHNOLOGIES FOR TRANSPORT

A. M. Orlova, E. A. Rudakova, D. V. Shevchenko, A. V. Gusev, C. I. Popovich, R. A. Savushkin
Analysis of design procedures for horizontal spring stiffness of bogie suspension of freight cars 191

A. A. Kiselev, L. S. Blazhko, A. S. Gaponenko, A. V. Romanov
Geometrical effects of the track on the size of the equivalent conicity of the set of wheels 202

S. V. Krotov, D. P. Kononov, A. A. Sobolev
The influence of friction on contact fatigue endurance of samples from rail and wheel steel 212

A. I. Adylkhodzhayev, S. S. Shaumarov, N. R. Mukhammadiyev
Analytical and experimental study of the structural organization of heat-insulating construction materials for railway buildings and structures 220

I. V. Nazarov, E. I. Artamonov, A. L. Kovyazin
Development of the life test method for a bogie brake system 230

V. I. Smirnov, S. A. Vidyushenkov, A. S. Kukhareva
Dynamic peculiarities of wagon movement over a marshalling hump 241

O. R. Khamidov
Diagnosing and modeling asymmetric modes of locomotive asynchronous traction electric motors using artificial neural networks 251

K. K. Kim, I. R. Kron, Ya. S. Vatulin, E. Ya. Vatulina
The development of the method on the reduction of aerodynamic drag of the pipeline transport capsule 263

A. E. Tsaplin, V. A. Vasiliev, S. A. Fomin
Improving the monitoring of mechanical elements of electric rolling stock by application of the intelligent thermal imaging system 268

A. N. Savoskin, Yu. S. Romen, A. P. Vasiliev
Characteristics of elastic friction sets of bogie suspension 275

A. S. Gasyuk, E. S. Ogan'yan
Computational and experimental methods of assessing the useful life of basic rolling stock components 285

V. B. Vilkov, A. I. Dergachev, A. K. Chernykh, A. O. Kravtsov

On an approach to data-secure communication systems 292

→ **GENERAL TECHNICAL PROBLEMS AND SOLUTION APPROACH**

S. V. Mikoni, D. P. Burakov

Setting up the typical one-dimensional utility functions in a multi-dimensional utility model 301

N. V. Grebennikov

Mathematical model for the analysis of electromagnetic processes in switched reluctance machines with strong mutual influence of phases 315

УДК 656.073:658.8

Инструментарий логистического нормирования для проведения аудита транспортно-складских систем

О. Д. Покровская, Т. С. Титова

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

Для цитирования: *Покровская О. Д., Титова Т. С.* Инструментарий логистического нормирования для проведения аудита транспортно-складских систем // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2019. – Т. 16, вып. 2. – С. 175–190. DOI: 10.20295/1815-588X-2019-2-175-190

Аннотация

Цель: Разработка интегрированной системы показателей, с помощью которой возможно комплексно оценивать параметры деятельности логистических объектов (ЛО) различного типа и терминальных сетей (ТС) в целом. Научная новизна исследования заключается в создании системы показателей-индикаторов для логистического нормирования параметров деятельности объектов терминально-складской инфраструктуры железных дорог. **Методы:** Применяются методы системного анализа, логистики, синергетики, кластерного анализа, теории множеств, теории складских систем, теории терминалистики. **Результаты:** Обоснована актуальность и практическая необходимость внедрения предлагаемой системы логистического нормирования. Проведен анализ факторов, влияющих на морфологию ТС и особенности эксплуатации ЛО. Описана процедура проведения логистического аудита с использованием системы показателей-индикаторов. Охарактеризованы функциональные задачи системы логистического нормирования. Показано ее положение в известных системах нормирования и регулирования работы железнодорожного транспорта. **Практическая значимость:** Результаты исследования могут применяться Холдингом «РЖД» для решения целого спектра прикладных задач: идентификации типа ЛО; выбора стратегии развития ТС; оценки проектов создания и модернизации ЛО и их логистической деятельности; контроля и аудита терминально-логистической деятельности железнодорожного транспорта, что обеспечит рост доходов от логистической деятельности.

Ключевые слова: Система логистического нормирования, логистический объект, терминально-складская инфраструктура, комплексная оценка деятельности.

Введение

Объективная потребность в терминально-складских мощностях для реализации стратегических задач развития транспортно-логистического блока ОАО «РЖД» и комплексного транспортно-логистического сервиса определяет необходимость создания системы нормирования параметров рациональной эксплуатации логистических объектов (ЛО) – обеспечение оценки, исследования, проектирования и учета ЛО как узлов терминальной сети (ТС) ОАО «РЖД» (согласно документам [1–3]).

В настоящее время ОАО «РЖД» оказывает широкий перечень логистических услуг, имеет сеть собственных ЛО, однако при этом не располагает системой логистических показателей-индикаторов для их комплексной оценки. Холдинг «РЖД» реализует как базовую (перевозочную) услугу, так и дополнительные логистические услуги (добавленной стоимости). Это говорит об имеющейся необходимости рассматривать не только вопросы эксплуатации ЛО в «проблемном поле» управления работой железнодорожного транспорта, но и разработать комплекс показателей-индикаторов, позволяющих адекватно оценивать и рационально проектировать объекты терминально-складской инфраструктуры (ТСИ) железных дорог [4].

Был проведен анализ некоторых отечественных и зарубежных работ [5–20]. По его результатам можно сделать следующий вывод. Так, известные параметры «нацелены» на «локальные» группы оцениваемых сегментов деятельности ЛО, например, только на экономическую или на техническую группу. При этом большинство параметров не служат «индикаторами» состояния ЛО для его владельца и не позволяют клиенту выбрать из альтернативных вариантов подходящий для него объект. Кроме того, известные параметры не являются логистическими, поскольку не отражают особенности и состав сервиса, сложность систем доставки и пр. [21, 22].

Известные параметры связаны с целями владельца, арендатора и эксплуататора ЛО, но задачи других участников перевозочного процесса (железнодорожного транспорта, клиента) не учитываются. Они отражают только «совершенство» проектировочных решений и решений по выбору и организации технологии грузопереработки. С использованием расчетных показателей можно определить размер технологических зон, потребность в техническом оснащении, инвестициях и пр. Но не решается такой существенный блок задач как оценка повышения добавленной стоимости грузов, дислокации ЛО, комплексности сервиса, полезности логистической работы. Объективно требуется синтезировать в рамках единой оценочной методики как принципы клиентоориентированности, так и технические нормы работы железнодорожного транспорта, а также решить задачи по идентификации ЛО, обоснованию строящегося ЛО, определению инвестиционной привлекательности, выбору услуг, выбору поставщика логистического сервиса, оценке участков и узлов существующей и проектируемой ТС [23, 24]. С учетом указанного цель настоящей работы – разработка интегрированной системы показателей, при использовании инструментария которой можно всесторонне оценить параметры деятельности ЛО различного типа и ТС в целом.

Общие сведения о системе логистического нормирования

Система логистического нормирования» (СЛоН) – это «система показателей для оценки ключевых параметров функционирования и развития объектов терминально-складской инфраструктуры железнодорожного транспорта» [25, с. 143]. Она разработана в соответствии с принципами сетевого технического нормирования эксплуатационной работы железнодорожного транспорта, логистики, клиентоориентированности, а также согласно документам [1–3].

СЛоН предлагает «инструменты» по логистическому аудиту ТСИ ОАО «РЖД», а не отдельных складов/логистических цепей. Сегодня на рынке логистического консалтинга «спрос на логистический аудит складов – около 80 % заказов, цепи поставок – 15 %, управления запасами – 4 %, логистики транспорта – 1 %» [26, с. 12]. При этом единой методологии и «правил» реализации логистического аудита до сих пор не существует. На рис. 1 СЛоН показана как система показателей.

В последнее время ОАО «РЖД» ориентирует свою работу на обслуживание ключевых клиентов так, чтобы привлечь высокодоходные грузопотоки на железнодорожные ЛО, расположенные на базе грузовых станций. Так, известна и успешно применяется систе-

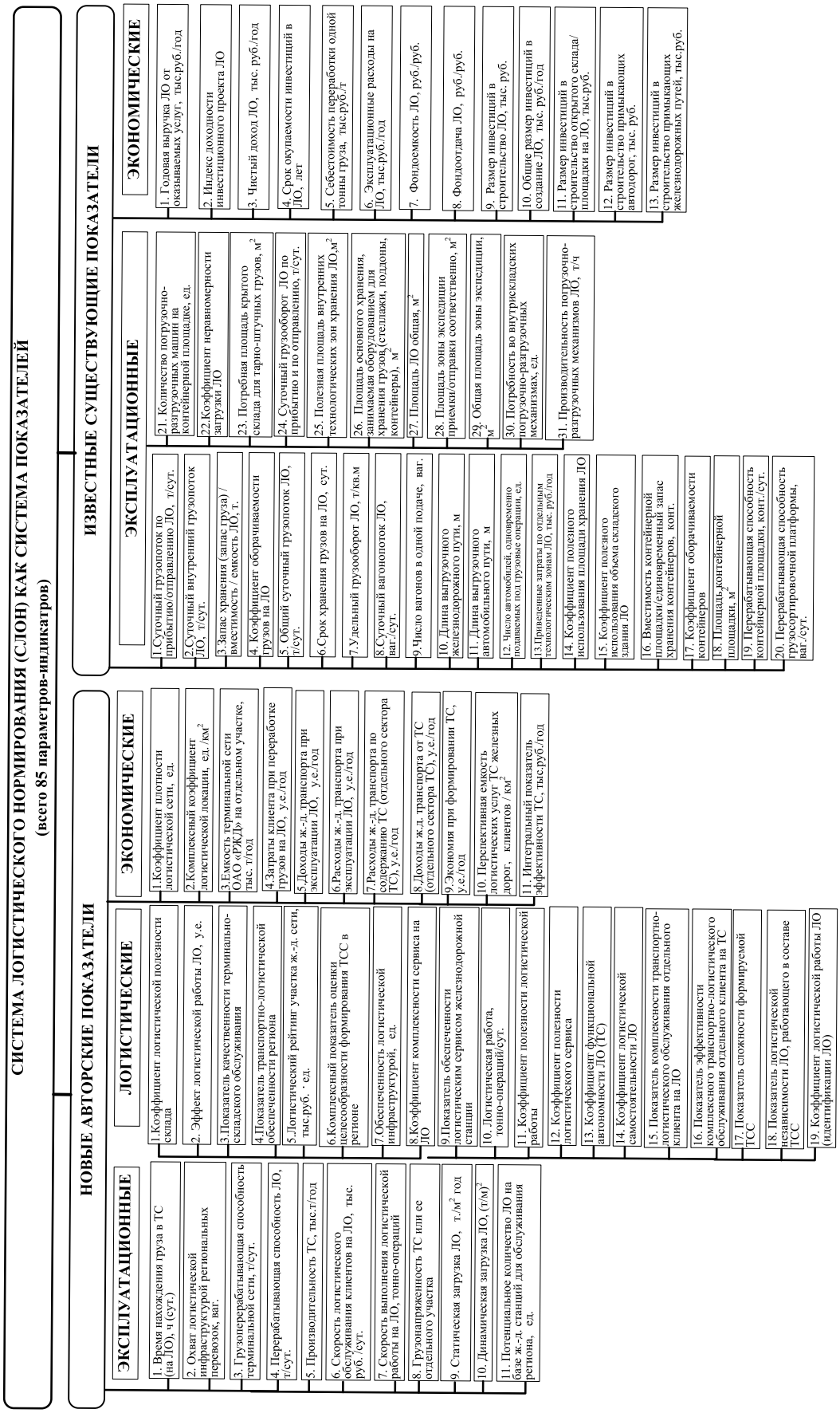


Рис.1. СЛоН как система показателей

ма технического нормирования показателей эксплуатационной работы железнодорожного транспорта. При этом ОАО «РЖД» уже давно трансформировала формат бизнеса из «транспортной» и «инфраструктурной» компании в «транспортно-логистический холдинг». Объемы предоставляемого клиентам железных дорог терминальных и транспортно-логистических услуг свидетельствуют о существенной роли ЛО в бизнесе отрасли, поскольку именно на них реализуются дополнительные сервисы и повышается добавленная стоимость грузов/товаров. Перечисленное предполагает использование системного подхода по параметризации, анализу, контролю, регулированию и оценке деятельности железнодорожных ЛО [27].

Обоснование необходимости и назначения СЛоН

Сформируем новую методологию для оценки и мониторинга показателей деятельности ТСИ в виде системы нормирования их эксплуатационных параметров.

Единая система показателей, адекватная требованиям всех участников транспортно-логистического рынка, обеспечит клиентоориентированность сервиса, оптимизацию технических и технологических решений ЛО всех типов. Это позволит рационально проектировать их и «подключать» к опорной сети и международным транспортным коридорам, разработать государственный стандарт в сфере деятельности логистической инфраструктуры России. В табл. 1 приведены факторы, влияющие на принятие решений по созданию в регионе ТС, на ее структуру и тип.

На основе факторного анализа нами была предложена новая система интегрированных показателей-индикаторов для экономического обоснования, целеполагания и проведения расчетов параметров ЛО и ТС. Можно полагать, что создание СЛоН в условиях актуализации проектов создания опорной терминальной сети ОАО «РЖД» и быстрого развития логистического сегмента в грузовых перевозках является требованием времени. «Увязывание» плана перевозок и логистического нормирования определяется максимальными размерами грузовой работы и выработкой мер по эффективному освоению заданных объемов.

Функциональная цель СЛоН: максимум доходов от терминально-складской деятельности при минимуме затрат или максимум дополнительного сервиса в грузопереработке при минимуме затрат на его реализацию.

Реализация цели СЛоН возможна в рамках терминалистики как новой методологии, в качестве ее прикладного инструментария (подробно она изложена в более ранних работах авторов [25–31]).

«Логистическими нормами» будем определять показатели, используемые для установления и поддержания необходимого уровня организации транспортно-логистического сервиса на железнодорожном транспорте для обеспечения выполнения комплекса дополнительных логистических услуг в рамках оказания «сквозного бесшовного сервиса» [25].

С помощью СЛоН можно решать такие задачи как:

• интенсивное использование складских площадей, погрузочно-разгрузочного оборудования ТС;

• распределение грузопотоков, грузовой и логистической работы железнодорожного транспорта с учетом объемов перерабатываемых грузов и конфигурации ТС, типа, количества, дислокации ЛО и их мощности;

• адекватное резервирование грузоперерабатывающих мощностей при высококачественном обслуживании клиентов и грузов;

• оценка полноты и эффективности использования наличной пропускной и перерабатывающей способности ТС, ее узлов и участков для рационального технико-технологического обеспечения и эксплуатации ТС при достижении ОАО «РЖД» уровня логистического провайдинга 4 PL;

• распределение грузопотоков по объектам ТС в соответствии с плановыми объемами работы ЛО, их типологией, функциональными

ТАБЛИЦА 1. Влияющие факторы на ТС (жирным выделены новые факторы)

Фактор	Описание	Измеритель
	Инфраструктурные $\Phi_{инф}$	
$P_{жд}$	Густота (плотность) железнодорожных коммуникаций в регионе	км/км^2
$P_{ад}$	Густота (плотность) автомобильных дорог в регионе	км/км^2
$I_{жд}$	Грузонапряженность железнодорожных линий	т/км
$L_{фад}$	Протяженность (при наличии) автомобильных трасс федерального значения в регионе	км
$N_{РЖД}$	Наличие в регионе объектов опорной сети ТСИ ОАО «РЖД» (в соответствии с «Концепцией создания сети ТЛЦ в РФ»)	ед.
$K_{скл}$	**Коэффициент качественности терминально-складского обслуживания** $$K_{скл} = \frac{S_{кач}}{\sum S_{рег}},$$ где $S_{кач}$ – общая площадь качественных складских площадей класса «А», «А+» по международным классификациям, тыс. м^2; $\sum S_{рег}$ – суммарная площадь складских комплексов в регионе, тыс. м	безразм.
$R_{инфр}$	Наличие резервов грузоперерабатывающей способности ТСИ региона	т/год
	Транспортные $\Phi_{тран}$	
$Q_{жт}$	Объемы перевозок грузов железнодорожным транспортом	тыс. т/год
$Q_{ат}$	Объемы перевозок грузов автомобильным транспортом	тыс. т/год
$Q_{др}$	Объемы перевозок грузов другими видами транспорта	тыс. т/год
$R_{тр}$	Наличие резервов пропускной способности транспортных коммуникаций	ед./год
$N_{ту}$	Количество крупных транспортных узлов в регионе	ед.
$K_{ТЛО}$	**Показатель транспортно-логистической обеспеченности региона** $$K_{ТЛО} = \frac{K_{скл}}{\sum\left(\frac{N_{РЖД}}{N_{скл}} + N_{скл}\right)},$$ где $K_{скл}$ – показатель качественности терминально-складского обслуживания; $N_{скл}$ – суммарное количество ЛО в регионе независимо от классности, ед.; $N_{РЖД}$ – суммарное количество ЛО ОАО «РЖД», ед.	%
	Рыночные $\Phi_{рын}$	
$N_{пр}$	Наличие в регионе реализуемых национальных экономических и транспортных проектов	ед.
$Q_{врп}$	Валовой региональный продукт	руб.
$Q_{опт}$	Объемы оптовой торговли	руб.
$Q_{тр}$	Объемы транспортных услуг	руб.
$N_{нас}$	Численность населения	млн чел.

и техническими возможностями, количеством и размещением на сети;

• рациональное формирование ТС с параметрами ЛО, обеспечивающими имеющиеся и перспективные потребности в широком с учетом распределения ассортименте транспортно-логистических услуг среди ЛО сети и др.

При этом СЛоН должна корреспондировать с требованиями системы технического нормирования. Это позволит СЛоН «включиться» в систему сетевого технического нормирования эксплуатационной работы и «расширить» горизонт нормирования и планирования дополненными показателями.

Предлагается следующая процедура работы СЛоН. Центром фирменного транспортного обслуживания формируется сводный заказ по сети железных дорог по типу вагонов и контейнерам не позднее 10 дней до начала планового месяца. Полигонам дороги, согласно постанционным заказам на перевозку и установленным дорогой нормам, следует распределить объемы грузовой и логистической работ по элементам ТС, а также рассчитать ключевые показатели СЛоН. Таким образом, в соответствии с заявками клиентов на дополнительные транспортно-логистические услуги и установленными нормами погрузки и выгрузки по станциям СЛоН обеспечит расчет качественных и количественных показателей использования ТСИ, принадлежащей холдингу.

Исходные данные для разработки «логистических норм» включают: план перевозок; наличие и расположение ЛО; перерабатывающая способность опорных станций и ЛО, технологические процессы их работы; действующий график движения и план формирования поездов; структура грузооборота; плановые объемы погрузки и выгрузки; статистические и маркетинговые данные.

Принципы функционирования СЛоН: 1) клиентоориентированность заключается в возможности получить экономическую оценку отдельного ЛО для конкретного ЛО, региона, участка ТС с точки зрения экономических выгод клиента железнодорожного транспорта; 2) комплексность оценки, проектирования и развития ЛО заключается в возможности одновременного учета нескольких значимых показателей при выборе ЛО, его проектировании и оценке; 3) полиаспектность анализируемых величин; 4) автоматизация заключается в автоматизации всех расчетных процедур, что определяет возможность практического применения; 5) адаптивность заключается в приспособленности методики расчета для интересов клиента, ОАО «РЖД» и региональной власти; 6) альтернативность вариантов формирования оценочных блоков, проведение выборочной и поэлементной оценок ЛО и ТС.

Логистический аудит с использованием системы логистического нормирования

Логистическим аудитом будем именовать процедуру поиска вариантов улучшения работы ЛО в рамках экспресс-исследования терминально-складских мощностей и процессов на всем протяжении логистической цепи [26]. Логистический аудит «нацелен» на нахождение недостатков в организации работы ТСИ и предложений по их устранению.

СЛоН как практический инструмент теории терминалистики и логистического аудита даст ответы на ряд вопросов, возникающих при управлении процессами перевозок с применением ЛО и их эксплуатации: какое количество ЛО и с какой дислокацией нужно иметь в составе ТС; какие виды транспортных средств следует использовать на каждом участке ТС; следует ли оснащать ЛО новыми механизмами, расширять площади, закупать новое оборудование, внедрять новые технологии грузопереработки; как определить эффективность формирования ТС в конкретном регионе; как улучшить технико-экономические показатели работы отдельных участков и узлов ТС; как провести технико-экономические расчеты и как принимать решения по ним при выборе к реализации альтернативного варианта ТС; в каком соотношении находятся текущие параметры работы ТС с эксплуатационными показателями работы железных дорог и др.

Таким образом, СЛоН в полной мере формирует экономико-математический арсенал, «подключенный» к системе эксплуатационных показателей железнодорожного транспорта, для реализации логистического аудита, а также для взаимодействия с клиентом.

Логистический аудит является важнейшим этапом оптимизации ЛО и ТС, включая решение задач оптимального конфигурирования ТС, проектирования ЛО и определения перспектив и сценариев их развития в целом. Проводить логистический аудит предлагается так, как показано на рис. 2.

Согласно рис. 2, этапы проведения логистического аудита следующие.

Этап 1. Формулирование задач, сбор и верификация исходных данных о работе транспортных участков и узлов ТС, описание функционирования отдельных ЛО.

Этап 2. Расчет ключевых показателей эффективности (KPI) по экспресс-методике.

Этап 3. Расчет индикаторов логистического, экономического и эксплуатационного типов по отдельным участкам, узлам и всей ТС.

Этап 4. Анализ полученных значений, выявление причин изменения, построение графических зависимостей, сопряжение полученных данных с реальными рабочими данными управления процессами перевозок в режиме онлайн.

Этап 5. Установление проблемных «узких мест» и «слабых звеньев» ТСС. Формулирование новых требований к их работе. Подготовка исходных данных.

Этап 6. Проведение итерации расчета индикаторов логистического, экономического и эксплуатационного типов по проблемным звеньям ТСС.

Этап 7. Корректировка плановых параметров, уточнение ассортимента и стоимости пакета услуг, вариация переменных значений. Формирование альтернативных вариантов к расчету.

Этап 8. Проведение заключительной итерации расчета по группам интересующих показателей. Принятие решений по каждому индикатору.

Этап 9. Разработка плана мероприятий по совершенствованию показателей по каждому узлу и участку ТС. Формирование стратегической программы развития ТС на следующий период.

Кроме того, СЛоН определяются прежде не существовавшие, но имеющие высокую актуальность параметры. При этом оценивается как реализация принципов *клиентоориентированности*, так и «сопряжение» логистических норм с системой *технического нормирования*, что позволит «установить вектор» принятия решений и управлять текущим состоянием ЛО на полигоне и качеством логистического сервиса.

В СЛоН интегрированы 3 блока значимых параметров (табл. 2).

СЛоН согласована с техническими нормами работы железнодорожного транспорта (табл. 3).

Таким образом, СЛоН обеспечивает выработку решений по обоснованию параметров ЛО, его инвестиционной привлекательности, комплексности услуг, оценке отдельных участков и узлов существующей и проектируемой ТС.

Экспериментальные данные и результаты

Анализ железнодорожных ЛО с применением инструментария СЛоН проводился в условиях Новосибирского транспортного узла (НТУ).

В структуре прибыли станций НТУ, открытых для грузовых операций, доля прибыли от дополнительных услуг (по стоимости, регулируемой государством и оказанных по соглашению) даже в динамике традиционно невысока (рис. 3, отражающий также структуру их сервиса).

Для сравнения приведем результаты расчета авторского показателя СЛоН – коэффициента комплексности сервиса на ЛО ($K_{лог}$) – для некоторых грузовых станций НТУ, на которых отсутствует ЛО:

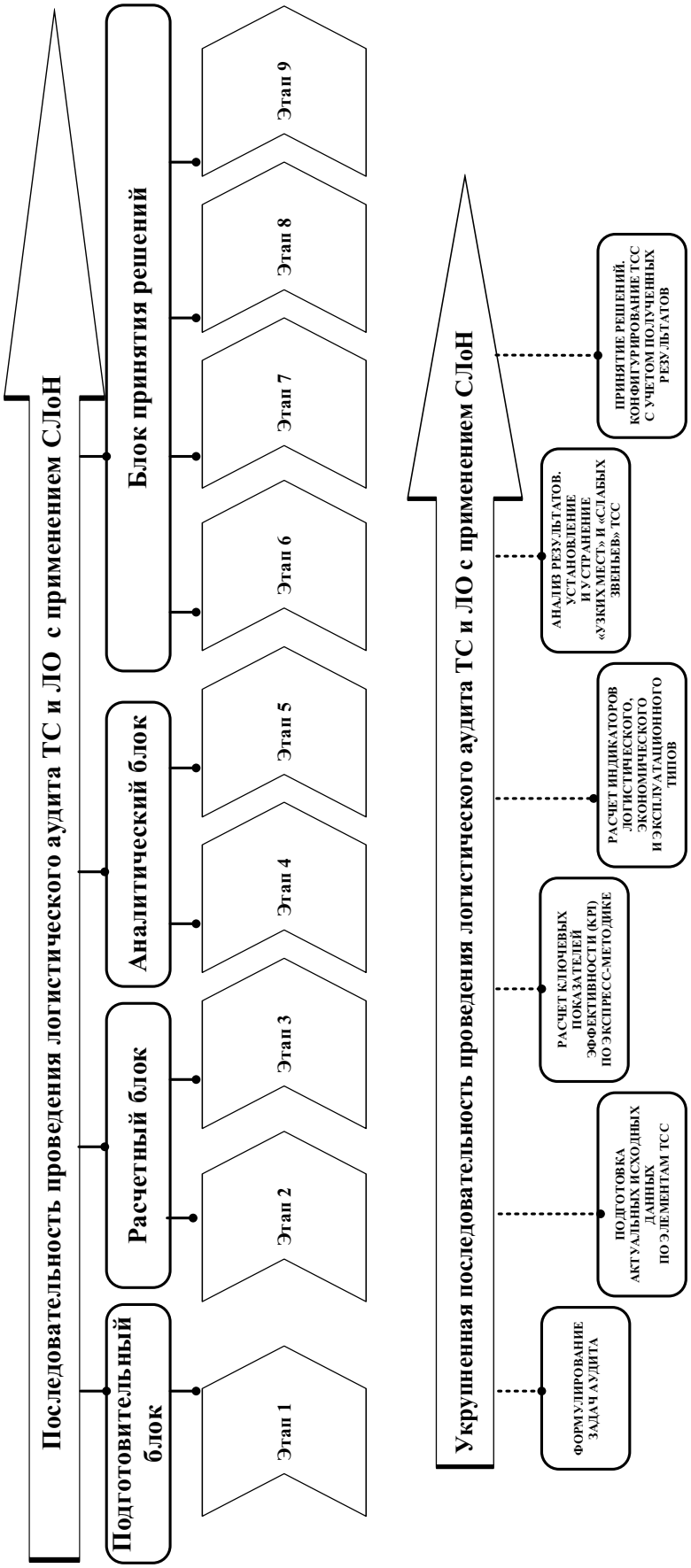


Рис. 2. Логистический аудит с применением СЛоН

ТАБЛИЦА 2. Задачи, решаемые СЛоН для отдельных участников процесса перевозок

Для клиента	Для ОАО «РЖД»	Для прочих участников процесса перевозок
Как выбрать соответствующий ЛО?	Как оценить работу объектов терминально-складской инфраструктуры на сети железных дорог? Как рационально запроектировать ТС? Как увязать работу транспортной и складской подсистем?	Для владельца: как оценить работу работающих/эксплуатируемых ЛО? Как рационально запроектировать ЛО? Для инвестора (торговые, промышленные и логистические компании): как выбрать альтернативный вариант размещения и типа ЛО для инвестирования? Для региональной власти: как оценить эффект в смежных отраслях и экономике региона от работы ЛО?

ТАБЛИЦА 3. Согласование параметров СЛоН с существующими

Клиент: что важно для клиента?	Техническое нормирование: что важно для железнодорожного транспорта?	Логистическое нормирование: клиент + ж.-д. транспорт = = увязка интересов
Срок доставки (с учетом грузопереработки), ассортимент и комплексность (от одного лица, по одному договору, в одном месте), стоимость услуг	Оборот вагона, пропускная способность, распределение грузовой работы, план перевозок, график движения, план формирования поездов, коэффициент местной работы, коэффициент сдвоенных операций	Интеграция транспортной и складской подсистем доставки, реализация в системе индикаторов принципов логистики и клиентоориентированности

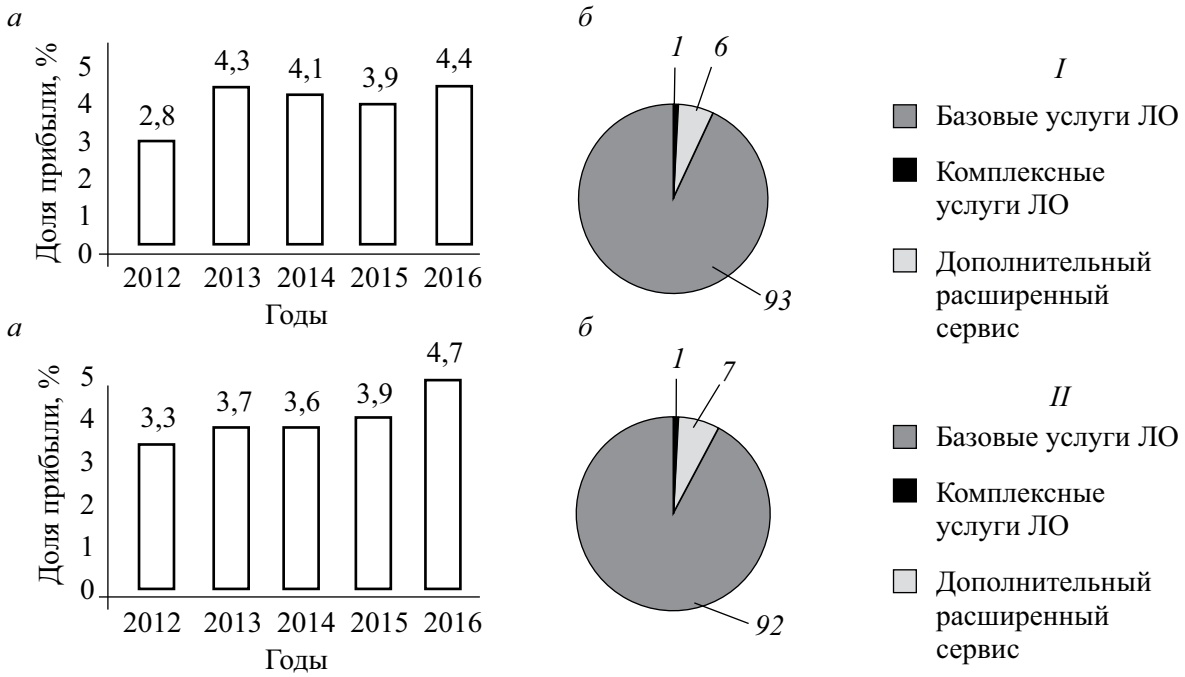


Рис. 3. Динамика прибыли от дополнительных услуг от общей прибыли (*а*) и структура реализуемого сервиса (*б*) на станциях И (*I*) и Н (*II*)

ЛО…….	1	2	3
Значение $K_{лог}$……	0,7	0,6	0,8

Можно заключить, что логистическая инфраструктура НТУ не в полной мере реализует богатейший потенциал сервиса ОАО «РЖД», также очевиден дефицит многофункциональных ЛО. Компании сложно увеличить прибыльность дополнительных услуг, располагая ЛО, не имеющими в настоящее время высококачественные складские помещения класса «А», особенно в условиях низкой клиентоориентированности предложений. Это связано с износом оборудования железнодорожных ЛО, ростом предложений автомобильным транспортом и приватными ЛО. В то же время для станции К, обладающей крупнейшим ЛО сетевого уровня, показатели выглядят, как показано на рис. 4.

К сожалению, комплексные услуги интегрированной логистики по ЛО на станции К составляют всего 5 % от общего объема сервиса. Это ниже, чем показатель годового отчета ПАО «Трансконтейнер» за 2016 г. – по компании такая доля составляет в «очищенной» прибыли 14,4 %. Данный показатель косвенно отражает комплексность транспортно-логистического сервиса. Из трех показателей только станция К обладает максимальным значением коэффициента комплексности логистического сервиса.

На рис. 5 показаны доли доходности дополнительных услуг в прибыли, доля комплексного обслуживания клиентов в общем объеме сервиса и коэффициент комплексности сервиса по трем станциям, обладающим ЛО.

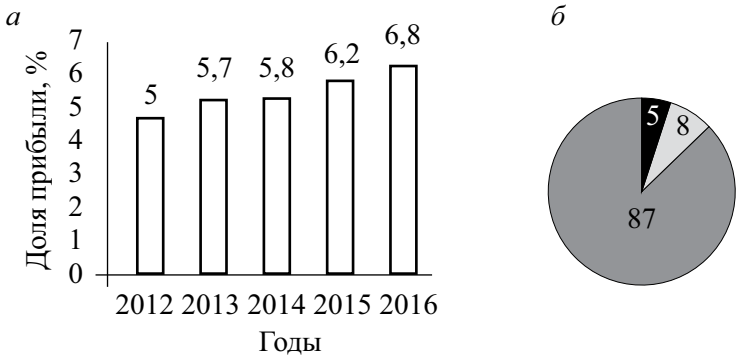


Рис. 4. Прибыльность логистической деятельности станции К:
а – доля прибыли от дополнительных услуг в общей прибыли, %; *б* – структура сервиса, реализуемого на станции

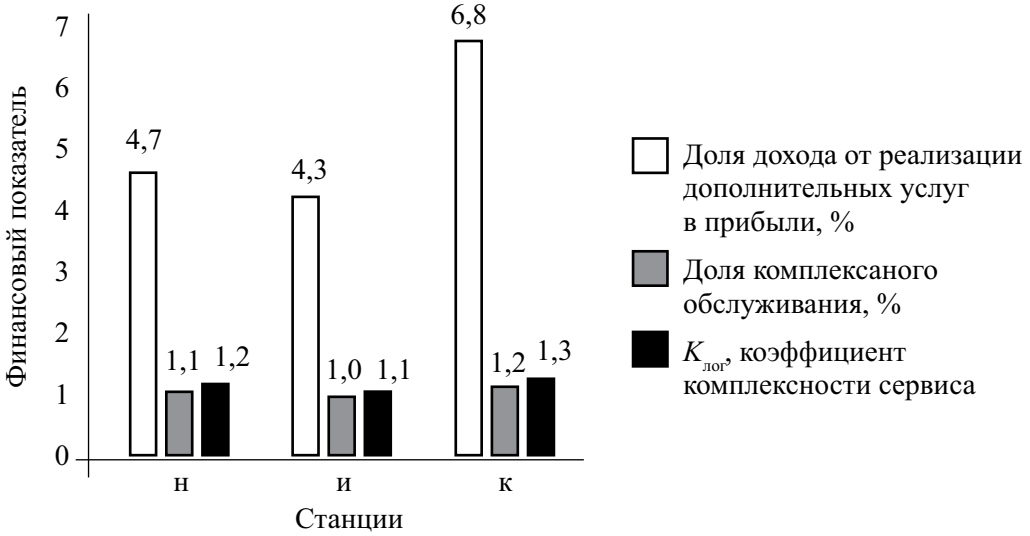


Рис. 5. Усредненные финансовые показатели по анализируемым станциям

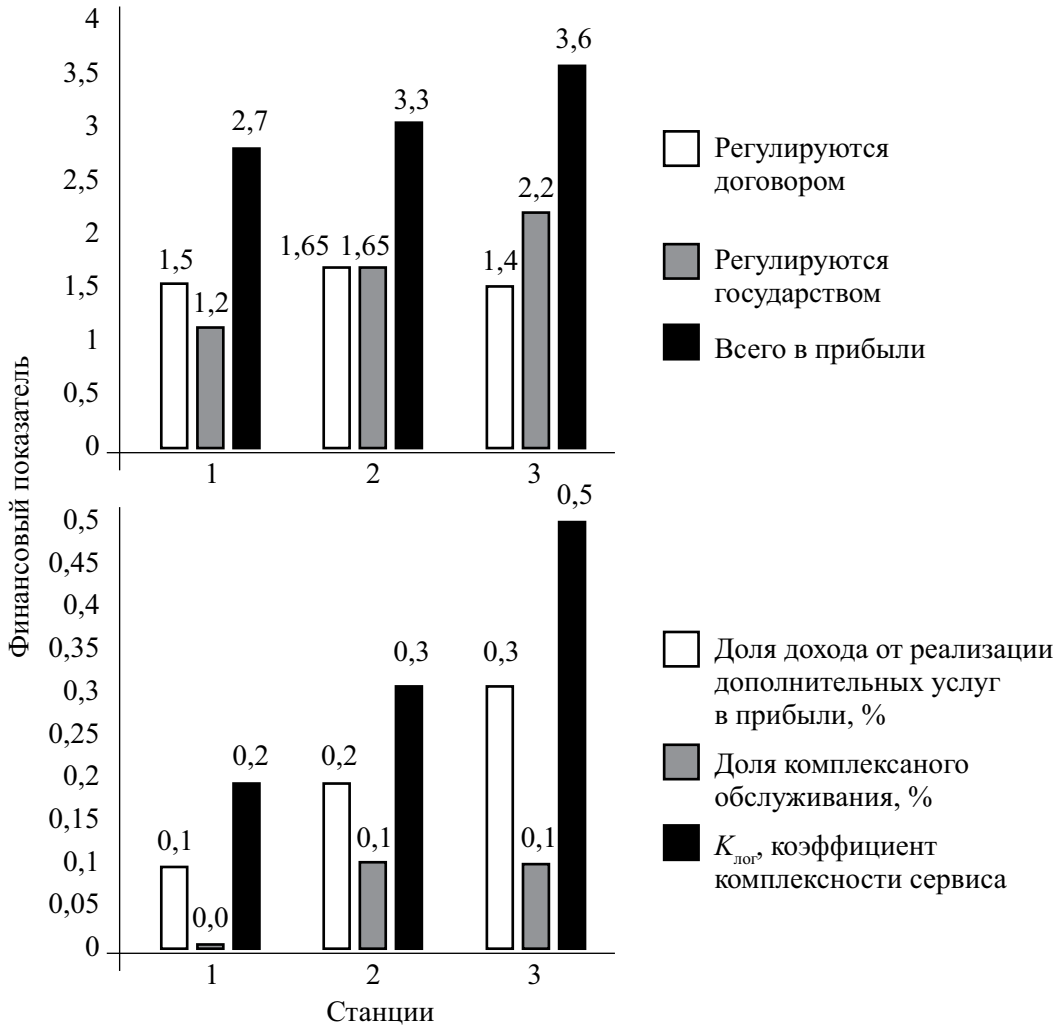


Рис. 6. Усредненные финансовые показатели по станциям узла

Для сравнения на рис. 6 дана доля доходов от дополнительных услуг по другим трем грузовым станциям, не обладающим ЛО.

Заключение

К полученным в данном исследовании результатам можно отнести:

1) практически апробирована методика СЛоН, оценена клиентоориентированность, проведены классификация и идентификация ЛО;

2) критический анализ логистической инфраструктуры НТУ, включая маркетинговый, подтвердил тенденции развития рынка транспортно-логистических услуг на региональном уровне работы Холдинга РЖД;

3) предлагаемая система логистических показателей может использоваться как экономико-математический инструментарий для:

– идентификации ЛО с учетом конструкции, вида складирования, размеров, технической оснащенности и др.,

– выбора ЛО с учетом его функциональных возможностей, дислокации и др.,

– определения роли ЛО в процессах перевозок,

– оценки проектов строительства и реконструкции объектов ТСИ железных дорог,

– оценки логистической деятельности ОАО «РЖД»,

– проектирования ЛО с оптимальными параметрами,

– прогнозирования и стратегического планирования работы железнодорожного транспорта.

По итогам исследования можно заключить, что применение показателей СЛоН в практике железнодорожного терминально-логистического бизнеса повысит эффективность управленческих решений и обеспечит рост доходов от логистической деятельности ОАО «РЖД».

Библиографический список

1. Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 г. – Утв. распоряжением Правительства Российской Федерации от 22.11.2008 г. № 1734-р. – М. : Красный пролетарий, 2008. – 166 с.

2. Концепция комплексного развития контейнерного бизнеса в холдинге ОАО «РЖД». – М. : ОАО «РЖД», 2012. – 71 с.

3. Концепция создания терминально-логистических центров на территории РФ. – М. : ОАО «РЖД», 2012. – 79 с.

4. Покровская О. Д. «Сбитый прицел» клиентоориентированности / О. Д. Покровская // РЖД-Партнер. – 2016. – 20.06.

5. Апатцев В. И. Методология организации транспортного производства и управления объектами железнодорожных узлов : дис. … д-ра техн. наук, специальность : 08.00.28. – М. : Мос. гос. ун-т путей сообщения, 2000. – 306 с.

6. Маликов О. Б. Перевозки и складирование товаров в цепях поставок : монография / О. Б. Маликов. – М. : Учеб.-метод. центр по образованию на ж.-д. транспорте, 2014. – 536 с.

7. Правдин Н. В. Проектирование инфраструктуры железнодорожного транспорта (станции, железнодорожные и транспортные узлы) / Н. В. Правдин, С. П. Вакуленко, А. К. Головнич и др. ; под ред. Н. В. Правдина, С. П. Вакуленко. – М. : Маршрут, 2014. – 1086 с.

8. Самуйлов В. М. Организационно-технические решения при проектировании грузовых терминалов в составе международных транспортных коридоров / В. М. Самуйлов, О. Д. Покровская // Инновационный транспорт. – 2015. – № 4. – С. 13–24.

9. Маликов О. Б. Вопросы логистической иерархии железнодорожных объектов / О. Б. Маликов, О. Д. Покровская // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. – СПб. : ПГУПС, 2016. – Вып. 4 (49). – С. 521–531.

10. Самуйлов В. М. Практика и эффективность формирования транспортно-логистических кластеров / В. М. Самуйлов, О. Д. Покровская // Вестн. Урал. гос. ун-та путей сообщения. – Екатеринбург : УрГУПС, 2016. – № 4 (32). – С. 76–88.

11. Гаджинский А. М. Современный склад. Организация, технологии, управление и логистика / А. М. Гаджинский. – М. : ТК Велби; Проспект, 2007. – 176 с.

12. Елисеев С. Ю. Система логистического управления взаимодействием с морскими и речными портами и другими видами транспорта : монография / С. Ю. Елисеев. – М. : ВИНИТИ РАН, 2005. – 96 с.

13. Прокофьева Т. А. Логистические центры в транспортной системе России : учеб. пособие / Т. А. Прокофьева, В. И. Сергеев. – М. : Издат. дом «Экономическая газета», 2012. – 522 с.

14. Миротин Л. Б. Логистика, технология, проектирование складов, транспортных узлов и терминалов / Л. Б. Миротин, А. В. Бульба, В. А. Демин. – Ростов н/Д. : Феникс, 2009. – 408 с.

15. Дыбская В. В. Управление складированием в цепях поставок / В. В. Дыбская. – М. : Альфа-Пресс, 2009. – 720 с.

16. Балалаев А. С. Транспортно-логистическое взаимодействие при мультимодальных перевозках / А. С. Балалаев, Р. Г. Леонтьев. – М. : Учеб.-метод. центр по образованию на ж.-д. транспорте, 2012. – 268 с.

17. Rodrigue J.-P. The geography of transport systems. – Ch. 5. International Trade and Freight Distribution / J.-P. Rodrigue. – New York : Routledge, 2013. – 416 p.

18. Notteboom T. Inland terminals within North American and European supply chains / T. Notteboom, J-P. Rodrigue // Transport and Communications. Bull. for Asia and the Pacific. – 2009. – N 78. – P. 1–39.

19. Бауэрсокс Д. Дж. Логистика : интегрированная цепь поставок / Д. Дж. Бауэрсокс, Д. Дж. Клосс ;

пер. с англ. Н. Н. Барышниковой, Б. С. Линскера. – 2-е изд. – М. : Олимп-Бизнес, 2006. – 640 с.

20. Линдерс М. Управление закупками и поставками : учебник для студентов высш. учеб. заведений / М. Линдерс, Ф. Джонсон, А. Флинн, Г. Фирон ; пер. с англ. под ред. В. Н. Егорова, Ю. А. Щербанина. – 13-е изд. – М. : ЮНИТИ, 2007. – 723 с. – (Сер. Зарубежный учебник).

21. Покровская О. Д. Классификация объектов железнодорожной терминально-складской инфраструктуры / О. Д. Покровская // Вестн. Урал. гос. ун-та путей сообщения. – Екатеринбург : УрГУПС, 2017. – № 1 (33). – С. 70–83.

22. Покровская О. Д. Классификация узлов и станций как компонентов транспортной логистики / О. Д. Покровская // Вестн. транспорта Поволжья. – Самара : СамГУПС, 2016. – № 5 (59). – С. 77–86.

23. Инновационный потенциал национальной экономики: приоритетные направления реализации : монография ; под общ. ред. С. С. Чернова. – Новосибирск : ЦРНС, 2015. – 164 с.

24. Экономика России : прошлое, настоящее, будущее : монография / под общ. ред. Н. А. Адамова. – М. : ИТКОР, 2014. – 248 с.

25. Покровская О. Д. Логистическое руководство : математические основы терминалистики, маркировка, классификация и идентификация логистических объектов железнодорожного транспорта : монография / О. Д. Покровская. – Казань : Бук, 2017. – 281 с.

26. Sustainable economic development of regions : Monograph. Vol. 3 / ed. by L. Shlossman. – Vienna : “East West” Association for Advanced Studies and Higher Education GmbH, 2014. – 261 p.

27. Покровская О. Д. О терминологии объектов терминально-складской инфраструктуры / О. Д. Покровская // Мир транспорта. – 2017. – № 1. – С. 152–163.

28. Титова Т. С. Организация транспортно-складских систем / Т. С. Титова, О. Д. Покровская // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. – СПб. : ПГУПС, 2018. – Т. 15, вып. 3. – С. 327–343.

29. Титова Т. С. Методика оценки клиентоориентированности железнодорожного транспорта / Т. С. Титова, О. Д. Покровская // Бюл. результатов научных исследований. – 2018. – Вып. 3. – С. 84–106.

30. Титова Т. С. Междисциплинарное положение теории терминалистики / Т. С. Титова, О. Д. Покровская // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. – СПб. : ПГУПС, 2018. – Т. 15, вып. 2. – С. 248–260.

31. Титова Т. С. Понятийный аппарат терминалистики / Т. С. Титова, О. Д. Покровская // Бюл. результатов научных исследований. – 2018. – Вып. 2. – С. 29–43.

Дата поступления: 06.05.2019
Решение о публикации: 31.05.2019

Контактная информация:
ПОКРОВСКАЯ Оксана Дмитриевна – доктор техн. наук, доцент, insight1986@inbox.ru
ТИТОВА Тамила Семеновна – доктор техн. наук, профессор, titova@pgups.ru

The tools of logistic rationing for conducting audit of storage–retrieval systems

O. D. Pokrovskaya, T. S. Titova

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

For citation: Pokrovskaya O. D., Titova T. S. The tools of logistic rationing for conducting audit of storage-retrieval systems. *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2019, vol. 16, iss. 2, pp. 175–190. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2019-2-175-190

Summary

Objective: To develop an integrated system of indicators by means of which it will be possible to fully estimate the performance parameters of logistic facilities (LF) of different types and terminal network (TN) in general. Scientific novelty of the study in question is in creating the system of parameters and indicators for logistics rationing of performance parameters of railway storage-retrieval infrastructure facilities. **Methods:** The methods of systems analysis, logistics, synergetics, clustering analysis, set theory, warehouse management theory as well as the theory of terminalistics were applied. **Results:** The topicality and practical necessity of applying the introduced system of logistics rationing was justified. The analysis of factors influencing the morphology of TN and the specificities of LF operation activity was conducted. The procedure of conducting logistics audit involving the use of the system of indicators was described. Functional tasks of the system of logistics rationing were characterized. Its place in the current systems of rail activity regulation was demonstrated. **Practical importance:** Research results can be applied by the holding company "Russian Railways" for the solution of the spectrum of application tasks: identification of the type of LF; the choice of the development strategy for TN; the assessment of design and modernization projects for LF and logistics activity; control and audit of terminal and logistics activity of the railroad transport, thus providing the growth of income from logistics activity.

Keywords: System of logistics rationing, logistics facility, storage-retrieval infrastructure, integral performance assessment.

References

1. *Transportnaya strategiya Rossiyskoy Federatsii na period do 2030 goda* [*Transport strategy of the Russian Federation for the period until 2030*]. Utv. Rasporyazheniyem Pravitelstva Rossiyskoy Federatsii ot 22.11.2008 g. no. 1734-p [Appr. by the Order of the Government of the Russian Federation dated November 22nd, 2008, N 1734-p]. Moscow, Krasniy proletariy Publ., 2008, 166 p. (In Russian)

2. *Kontseptsiya kompleksnogo razvitiya konteinernogo biznesa v kholdinge OAO "RZhD"* [*Comprehensive development framework of container industry in OAO "Russian Railways" holding company*]. Moscow, OAO "Russian Railways" Publ., 2012, 71 p. (In Russian)

3. *Kontseptsiya sozdaniya terminalno-logisticheskykh tsentrov na territorii RF* [*The concept of creating terminal and logistics centers on the territory of the Russian Federation*]. Moscow, OAO "Russian Railways" Publ., 2012, 79 p. (In Russian)

4. Pokrovskaya O. D. "Sbytiy prytsel" kliyentooriyentirovannosty ["Upset sight" of customer-oriented approach]. *RZhD-Partner*, 2016, June 20th. (In Russian)

5. Apatsev V. I. *Metodologiya organizatsii transportnogo proizvodstva i upravleniya obyektamy zheleznodorozhnykh uzlov* [*Organization strategy of transport production and management of railway junction facilities*]. Dis… D. Eng., specialty: 08.00.28. Moscow, Moscow State Transport University Publ., 2000, 306 p. (In Russian)

6. Malikov O. B. *Perevozky i skladirovaniye tovarov v tsepyakh postavok* [*Transportation and storage of goods in supply chains*]. Moscow, Uchebno-metodicheskiy tzentr po obrazovaniju na zheleznodorozhnom transporte [Learning and teaching educational center of railway transport] Publ., 2014, 536 p. (In Russian)

7. Pravdin N. V., Vakulenko S. P., Golovnich A. K. et al. *Proektirovaniye infrastruktury zheleznodorozhnogo transporta (stantsii, zheleznodorozhniye i transportniye uzly)* [*Engineering of railroad infrastructure (stations, railway junctions and transportation hubs)*]. Eds by N. V. Pravdin, S. P. Vakulenko. Moscow, Uchebno-metodycheskiy tsentr po obrazovaniju na zheleznodorozhnom transporte [Learning and teaching educational center of railway transport] Publ., 2012, 1086 p. (In Russian)

8. Samuilov V. M. & Pokrovskaya O. D. Organizatsionno-tekhnicheskiye resheniya pry proektirovanii gruzovykh terminalov v sostave mezhdunarodnykh transportnykh koridorov [Organizational and technical solutions for the design of cargo terminals

being a part of international transport corridors]. *Innovatsionniy transport* [*Innovative transport*], 2015, no. 4, pp. 13–24. (In Russian)

9. Malikov O. B. & Pokrovskaya O. D. Voprosy logisticheskoy ierarkhii zheleznodorozhnykh obyektov [The issues of logistics hierarchy of railroad facilities]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [*Proceedings of Petersburg State Transport University*]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2016, iss. 4, pp. 521–531. (In Russian)

10. Samuilov V. M. & Pokrovskaya O. D. Praktika i effektivnost formirovaniya transportno-logisticheskikh klasterov [Operating experience and efficiency of building logistics clusters]. *Vestnik Ural. gos. instituta putey soobshcheniya* [*Ural State University of Railway Transport Bulletin*]. Yekaterinburg, UrGUPS [Ural State University of Railway Transport] Publ., 2016, no. 4 (32), pp. 76–88. (In Russian)

11. Gadzhinsky A. M. *Sovremenniy sklad. Organizatsiya, tekhnologii, upravleniye i logistika* [*Modern goods depot. Organization, technologies, management and logistics*]. Moscow, TK (Trading Company) Velby, Prospect Publ., 2007, 176 p. (In Russian)

12. Eliseyev S. Y. *Systema logisticheskogo upravleniya vzaimodeystviyem s morskymy i rechnymy portamy i drugymy vydamy transporta* [*The system of logistical control of sea ports and river ports and other types of transport interaction*]. Moscow, VINITI RAN [All-Union Institute of Scientific and Technical Information RAS] Publ., 2005, 96 p. (In Russian)

13. Prokofiyeva T. A. & Sergeyev V. I. *Logisticheskiye tsentry v transportnoy sisteme Rossii* [*Logistical centers in the Russian transportation system*]. Ucheb. posobiye [tutorial]. Moscow, Ekonomicheskaya gazeta [Economic journal] Publ., 2012, 522 p. (In Russian)

14. Mirotyn L. B., Bulba A. V. & Demin V. A. *Logistika, tekhnologiya, proektirovaniye skladov, transportnykh uzlov i terminalov* [*Logistics, technology, designing of stores, transport nodal points and railheads*]. Rostov-on-Don, Phoenix Publ., 2009, 408 p. (In Russian)

15. Dybskaya V. V. *Upravleniye skladirovaniyem v tsepyakh postavok* [*Storing management in supply chains*]. Moscow, Alpha-Press Publ., 2009, 720 p. (In Russian)

16. Balalaev A. S. & Leontiyev R. G. *Transportno-logisticheskoye vzaimodeistviye pry multimodalnykh perevozkakh* [*Transport and logistics interaction in multimodal traffic*]. Moscow, Uchebno-metodycheskiy tsentr po obrazovaniju na zheleznodorozhnom transporte [Learning and teaching educational center of railway transport] Publ., 2012, 268 p. (In Russian)

17. Rodrigue J.-P. *The geography of transport systems. Ch. 5. International Trade and Freight Distribution*. New York, Routledge Publ., 2013, 416 p.

18. Notteboom T. & Rodrigue J-P. Inland terminals within North American and European supply chains. *Transport and Communications. Bull. for Asia and the Pacific*, 2009, no. 78, pp. 1–39.

19. Bowersox D. J. & Closs D. J. *Logistika: integrirovannaya tsep postavok* [*Logistical management: The integrated supply chain process*]. Tr. from eng. by N. N. Baryshnikova, B. S. Linsker. 2nd ed. Moscow, Olimp-Business Publ., 2006, 640 p. (In Russian)

20. Leenders M., Johnson F., Flynn A. & Fearon H. *Uptavleniye zakupkamy i postavkamy* [*Purchasing and supply management*]. Textbook for college students. Tr. from eng. under ed. of V. N. Egorov, Yu. A. Shcherbanin. 13th ed. Moscow, UNITI Publ., 2007, 723 p. (In Russian)

21. Pokrovskaya O. D. Klassifikatsiya obyektov zheleznodorozhnoy terminalno-skladskoy infrastruktury [Classification of facilities of terminal and storage infrastructure]. *Vestnik Ural. gos. instituta putey soobshcheniya* [*The Urals State University of Railway Transport Bulletin*]. Yekaterinburg, UrGUPS Publ., 2017, no. 1 (33), pp.70–83. (In Russian)

22. Pokrovskaya O. D. Klassifikatsiya uzlov i stantsiy kak komponentov transportnoy logistiky [Classification of railroad junctions and stations as the components of transport logistics]. *Vestnik transporta Povolzhya* [*The Volga region transport bulletin*]. Samara, SamGUPS Publ., 2016, no. 5 (59), pp. 77–86. (In Russian)

23. *Innovatsionniy potentsial natsionalnoy ekonomiky: prioritetniye napravleniya realizatsii* [*Innovative potential of the national economy: prio-*

rity guidelines of realization]. Under gen. ed. of S. S. Chernov. Novosibirsk, TsRNS [Cooperation in Science Development Centre] Publ., 2015, 164 p. (In Russian)

24. *Ekonomika Rossii: proshloye, nastoyashcheye, budushcheye:* monografiya [*The economy of Russia: past, present, future:* monograph]. Under gen. ed. of N. A. Adamov. Moscow, ITKOR [Research Institute of Distribution and Wholesale Market Condition] Publ., 2014, 248 p. (In Russian)

25. Pokrovskaya O. D. *Logisticheskoye rukovodstvo: matematicheskiye osnovy terminalistiky, markirovka, klassifikatsiya i identifikatsiya logisticheskykh obyektov zheleznodorozhnogo transporta:* monographiya [*Logistic guide: mathematical foundations of terminalistics, marking, classification and identification of logistical objects of railway transport:* study]. Kazan, Publ. office "Book", 2017, 281 p. (In Russian)

26. *Sustainable economic development of regions.* Monograph, vol. 3. Ed. by L. Shlossman. Vienna, "East West" Association for Advanced Studies and Higher Education GmbH Publ., 2014, 261 p.

27. Pokrovskaya O. D. O terminologii obyektov terminalno-skladskoy infrastruktury [On terminology of storage-retrieval infrastructure]. *Mir transporta* [*The world of transport*], 2017, no. 1, pp. 152–163. (In Russian)

28. Titova T. S. & Pokrovskaya O. D. Organizatsiya transportno-skladskykh sistem [Organization of railroad storage-retrieval systems]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [*Proceedings of Petersburg State Transport University*]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2018, vol. 15, iss. 3, pp. 327–343. (In Russian)

29. Titova T. S. & Pokrovskaya O. D. Metodika otsenky klientoorientirovannosty zheleznodorozhnogo transporta [Client-oriented railway transport service: estimation procedure]. *Byull. rezultatov nauchnykh issledovaniy* [*Bulletin of research scientific results*], 2018, iss. 3, pp. 84–106. (In Russian)

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

31. Titova T. S. & Pokrovskaya O. D. Ponyatiyniy apparat terminalistiky [Research vocabulary of terminalistics]. *Byull. rezultatov nauchnykh issledovaniy* [*Bulletin of research scientific results*], 2018, iss. 2, pp. 29–43. (In Russian)

Received: May 06, 2019
Accepted: May 31, 2019

Author's information:
Oksana D. POKROVSKAYA – D. Sci. in Engineering, Professor, insight1986@inbox.ru
Tamila S. TITOVA – D. Sci. in Engineering, Professor, titova@pgups.ru

УДК 62-272.2

Анализ методик расчета горизонтальной жесткости пружин рессорного подвешивания грузовых вагонов

А. М. Орлова [1], Е. А. Рудакова [2], Д. В. Шевченко [2], А. В. Гусев [2], С. И. Попович [2], Р. А. Савушкин [3]

[1] ПАО «Научно-производственная корпорация «Объединенная Вагонная Компания», Российская Федерация, 115184, Москва, ул. Новокузнецкая, 7/11, стр. 1
[2] ООО «Всесоюзный научно-исследовательский центр транспортных технологий», Российская Федерация, 199106, Санкт-Петербург, 23-я линия В. О., 2, лит. А
[3] Российский университет транспорта (МИИТ), Российская Федерация, 127994, Москва, ул. Образцова, 9, стр. 9

Для цитирования: *Орлова А. М., Рудакова Е. А., Шевченко Д. В., Гусев А. В., Попович С. И., Савушкин Р. А.* Анализ методик расчета горизонтальной жесткости пружин рессорного подвешивания грузовых вагонов // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2019. – Т. 16, вып. 2. – С. 191–201. DOI: 10.20295/1815-588X-2019-2-191-201

Аннотация

Цель: Определение горизонтальной жесткости пружин рессорного подвешивания тележки грузового вагона, основанное на аналитических подходах и методе конечно-элементного моделирования. **Методы:** Применяются аналитические выражения и методы конечных элементов. **Результаты:** Аналитический подход к расчету горизонтальной жесткости пружин рекомендуется использовать на предварительном этапе для экспресс-анализа характеристик пружин. Конечно-элементное моделирование позволяет учесть особенности закрепления пружины при работе ее в рессорном подвешивании и точнее определить горизонтальную жесткость. **Практическая значимость:** Разработанная конечно-элементная модель пружины с граничными условиями может применяться для определения горизонтальной жесткости пружин рессорного подвешивания различных типов подвижного состава.

Ключевые слова: Пружины рессорного подвешивания, тележка грузового вагона, горизонтальная жесткость, формула Рело, формула Бурдика, метод конечных элементов, кинематические и силовые граничные условия для пружины.

Введение

Вертикальная и горизонтальная жесткости цилиндрических винтовых пружин (далее – пружина) рессорного подвешивания тележек грузовых вагонов рассчитываются для установления вертикальной силовой характеристики подвешивания и оценки напряженно-деформированного состояния пружины под действием вертикальной и горизонтальной сил. Вертикальная жесткость пружин, применяемых в рессорном подвешивании тележек грузовых вагонов, в основном определяется из выражения, полученного преобразованием

формулы Рело [1, 2] и приведенного в различных нормативных документах [3–6], однако способы расчета горизонтальной жесткости пружин различны [4, 6–8]. В связи с этим сравнительный анализ результатов расчета горизонтальной жесткости пружин с использованием различных аналитических выражений и метода конечных элементов для установления рациональной формулы применительно к пружинам рессорного подвешивания тележек грузовых вагонов является актуальным.

Обзор исследований по расчету горизонтальной жесткости пружин

Основные подходы к определению характеристик пружин и методы расчета их на прочность и долговечность были разработаны советскими учеными еще в первой половине XX в. Так, в трудах С. Д. Пономарева и Н. А. Чернышева [1, 9, 10] приведены расчет пружин на основе прикладной теории упругости и пластичности, а также сведения о материалах для упругих элементов и способах их изготовления. В данных работах установлено, что при расчете цилиндрическую пружину можно представить в виде эквивалентного бруса, ось которого зависит от трех независимых параметров: диаметра образующего цилиндра (среднего диаметра пружины), угла подъема оси винтового бруса, длины оси рабочей части винтового бруса (длины по рабочим виткам пружины). Данное упрощение в последующих работах применялось Л. А. Андреевой, В. М. Макушиным, М. В. Хвингией и др. [11–13] при определении горизонтальной жесткости пружины. Необходимость более точного расчета цилиндрических пружин применительно к конкретному типу подвижного состава привело к возникновению различных полуэмпирических выражений для определения горизонтальной жесткости [14–16]. При этом приведенные в указанных работах формулы, отличающиеся схемами нагружения пружин, носят противоречивый характер.

Аналитический расчет горизонтальной жесткости пружин рессорного подвешивания тележки грузового вагона

На основании теоретических исследований горизонтальная жесткость цилиндрической пружины может быть получена по различным аналитическим выражениям, которые, по мнению их авторов, обеспечивают достаточную сходимость результатов с экспериментами:

– формула, предложенная Бурдиком (W. E. Burdick) и др. [17];

– формула (13.1) ГОСТ 34093–2017 [7];

– формула (13) РД 32.51–95, учитывающая поправочный коэффициент, определяемый по номограмме [4];

– формула (23) DIN EN 13906-1 [6].

Общеизвестная и широко применяемая формула Бурдика, которая в видоизмененной форме также приведена в Нормах [8] (далее – формула из Норм), МН/м, представляет собой выражение

$$C_{1y} = \frac{3Ed^4}{8Dn\left[H_{\mathrm{d}}^{\,2}(2+\mu)+3D^2\right]}, \qquad (1)$$

здесь E – модуль Юнга материала пружины, МПа:

$$E = 2G(1+\mu), \qquad (2)$$

где μ – коэффициент Пуассона; G – модуль сдвига материала пружины, МПа; D – средний диаметр пружины, м; d – диаметр прутка пружины, м; n – число рабочих витков пружины; H_{d} – высота пружины (рабочая) под действием вертикальной силы, м, определяемая по формуле

$$H_{\mathrm{d}} = l_0 - f_{\text{пор/гр}} - d, \qquad (3)$$

l_0 – высота пружины в свободном состоянии, м; $f_{\text{пор/гр}}$ – прогиб пружины подвешивания под весом порожнего или груженого кузова вагона, м.

Необходимо отметить, что формула Бурдика в первоначальном виде [17] включала в себя высоту пружины в свободном состоянии за вычетом диаметра одного витка. Результаты экспериментов показали, что под действием вертикальной силы опорные витки могут отклоняться в горизонтальной плоскости. В результате сопоставления аналитических расчетов с данными экспериментов, при которых горизонтальная жесткость определялась под действием вертикальной и горизонтальной сил, был получен коэффициент масштабирования, рекомендованный для использования в аналитических расчетах.

Формула для расчета горизонтальной жесткости пружины (C_{2y}), приведенная в ГОСТ 34093–2017, отличается от выражения, представленного в Нормах, учетом высоты пружины в свободном состоянии (l_0) вместо (H_d). При этом разработчики ГОСТ 34093–2017 объясняют это изменение тем, что формула из Норм получена при рассмотрении пружины в виде бруса малой кривизны, что приводит к завышенному значению горизонтальной жесткости. Потому для наибольшей сходимости результатов расчета и эксперимента в формуле (1) предложено принять это, на первый взгляд, нелогичное изменение в виде $H_d = l_0$.

Выражение для определения горизонтальной жесткости пружины, приведенное в РД 32.51–95, которое представляет собой видоизмененную формулу Шпаринга (W. Sparing) [18] (переведена из английской системы (дюйм) в СИ (м)), МН/м, распространяется на случай жесткого опирания пружин и не учитывает деформацию концов опорных витков при действии сил:

$$C_{3y} = \frac{2,62C_z}{A\left[1+0,77\left(\frac{H_d}{D}\right)^2\right]}, \qquad (4)$$

здесь C_z – вертикальная жесткость пружины, МН/м, определяемая по формуле Рело

$$C_z = G\frac{d^4}{8D^3n}, \qquad (5)$$

A – поправочный коэффициент, который определяется по номограмме, приведенной на рис. А.4 в РД 32.51–95 и учитывает геометрические параметры пружин.

Горизонтальная жесткость пружины в соответствии с DIN EN 13906-1, МН/м, рассчитывается по формуле

$$C_{4y} = \eta \cdot C_z, \qquad (6)$$

в которой η – коэффициент перехода от вертикальной жесткости пружины к горизонтальной, определяемый из выражения

$$\eta = \xi \times \left[\xi - 1 + \frac{\frac{1}{\lambda}}{\frac{1}{2}+\frac{G}{E}}\sqrt{\left(\frac{1}{2}+\frac{G}{E}\right)}\left(\frac{G}{E}+\frac{1-\xi}{\xi}\right)\times \times \mathrm{tg}\left\{\lambda\xi\sqrt{\left(\frac{1}{2}+\frac{G}{E}\right)}\left(\frac{G}{E}+\frac{1-\xi}{\xi}\right)\right\}\right]^{-1}, \qquad (7)$$

где ξ – коэффициент относительной деформации пружины

$$\xi = \frac{f_{\text{пор/гр}}}{l_0}, \qquad (8)$$

λ – коэффициент гибкости

$$\lambda = \frac{l_0}{D}. \qquad (9)$$

Для сравнения аналитических выражений был проведен расчет горизонтальной жесткости для наружной 100.30.002-0 и внутренней 100.30.004-0 пружин тележки 18-100 под действием сил, соответствующих вагону с минимальной 21 т и максимальной (осевая нагрузка 23,5 тс) расчетными массами (далее – порожний («Т») и груженый («Бр») соответственно). Дополнительно были рассмотрены пружины типа D5 (наружная и внутренняя, расположенные под надрессорной балкой) [19], устанавливаемые в тележку Motion Control [20], под действием сил, соответствующих

ТАБЛИЦА 1. Геометрические параметры пружин

Пружина	l_0, м	d, м	D, м	Параметры согласно РД 32.51–95 для определения поправочного коэффициента A				
				$\frac{l_0 - d}{D}$	$\frac{f_{пор/гр}}{l_0 - d}$		A	
					Т	Бр	Т	Бр
Тележка 18-100								
Наружная	0,249	0,030	0,170	1,29	0,032	0,217	1,05	1,15
Внутренняя		0,021	0,111	2,05	0,031	0,208	1,10	1,42
Тележка Motion Control								
Наружная	0,260	0,024	0,116	2,03	0,006	0,278	–	1,58
Внутренняя	0,262	0,016	0,070	3,51	0,014	0,275	–	–

ТАБЛИЦА 2. Значения вертикальных сил, действующих на пружины

Пружина	Вертикальная сила, действующая на пружину, кН			
	Тележка 18-100		Тележка Motion Control	
	Т	Бр	Т	Бр
Наружная	2,90	19,56	0,53	23,65
Внутренняя	1,55	10,46	0,70	13,58

ТАБЛИЦА 3. Результаты расчета горизонтальной жесткости пружин

Пружина	Формула Норм		ГОСТ 34093–2017		РД 32.51–95		DIN EN 13906-1	
	C_{1y}, кН/м		C_{2y}, кН/м		C_{3y}, кН/м		C_{4y}, кН/м	
	Т	Бр	Т	Бр	Т	Бр	Т	Бр
Тележка 18-100								
Наружная	488,9 (–)	601,8 (–)	405,2 (–17,1)	(–32,7)	468,1 (–4,2)	526,3 (–12,5)	408,7 (–16,4)	433,9 (–27,9)
Внутренняя	141,9 (–)	189,3 (–)	118,0 (–16,7)	(–37,7)	129,6 (–8,7)	133,9 (–29,3)	116,5 (–17,9)	108,2 (–42,8)
Тележка Motion Control								
Наружная	227,0 (–)	353,3 (–)	193,4 (–14,8)	(–45,3)	–	224,7 (–36,4)	192,9 (–15,0)	172,6 (–51,1)
Внутренняя	51,2 (–)	87,4 (–)	44,5 (–13,1)	(–49,1)	–	–	42,5 (–17,0)	–

П р и м е ч а н и е. В скобках приведено расхождение (в процентах) значения горизонтальной жесткости в сравнении с C_{1y}.

вагону с минимальной 24 т и максимальной (осевая нагрузка 32,5 тс) расчетными массами.

Геометрические параметры пружин и величины действующих на них вертикальных сил для различных вариантов нагружения тележек 18-100 и Motion Control приведены в табл. 1, 2.

Результаты расчета горизонтальной жесткости пружин тележек 18-100 и Motion Control по приведенным выше формулам (см. (2)–(9)) представлены в табл. 3.

При расчете горизонтальной жесткости по формуле Норм прослеживается закономерность увеличения ее значения с ростом вертикальной силы, действующей на пружину, в среднем на 28 и 60% для тележек 18-100 и Motion Control соответственно. При этом результаты расчета, согласно ГОСТ 34093–2017, свидетельствуют, что горизонтальная жесткость не обусловливается режимом нагружения. В зависимости от геометрических параметров пружин для некоторых их сочетаний использование номограмм не дает возможность провести расчет горизонтальной жесткости пружин в соответствии с РД 32.51–95, что ограничивает внедрение данной методики, которая имеет место только для пружин с габаритами, применяемыми в основном в подвешивании локомотивов. Формула, представленная в DIN EN 13906-1, также не позволяет определить горизонтальную жесткость малогабаритных пружин (внутренняя для тележки Motion Control).

В результате исследований было установлено, что известные аналитические выражения по расчету горизонтальной жесткости пружин показывают существенное (до 50%) расхождение данных, при этом результат расчета также зависит от габаритов пружин, что ограничивает использование формул для конкретного типа подвижного состава. В связи с этим для уточненной оценки горизонтальной жесткости пружин был взят метод конечных элементов (МКЭ), позволяющий учесть особенности деформирования пружины при работе в рессорном подвешивании.

Определение горизонтальной жесткости пружин МКЭ

МКЭ является одним из наиболее популярных численных методов при решении задач теории упругости. Идея метода заключается в том, что непрерывная область, в которой находится решение дифференциальных уравнений, разбивается на конечное количество подобластей (элементов), затем перемещение узлов аппроксимируется дискретной моделью, состоящей из множества непрерывных в пределах каждого элемента функций.

Для создания конечно-элементной модели в программной системе Siemens NX [21] пространственные квадратичные элементы были представлены в форме криволинейных параллелепипедов и тетраэдров, т. е. в рамках каждого конечного элемента перемещения аппроксимировались полиномом второй степени. Типичная конечно-элементная модель для пружины тележки грузового вагона с двумя опорными телами приведена на рис. 1.

Габаритные размеры опорных тел выбирались таким образом, чтобы толщина каждого из них была не менее диаметра прутка пружины, а остальные размеры – не менее наружного диаметра пружины.

Для описания граничных условий была введена декартова система координат, расположенная в основании нижнего опорного тела, центр которой совпадает с осевой линией пружины. Ось z системы координат совпадает с осью пружины, ось x принадлежит плоскости, образованной основанием нижнего опорного тела, а ось y перпендикулярна осям x и z. При этом пружина сориентирована таким образом, что окончание ее нижнего опорного витка при проекции на плоскость, образованную осями x и y, совпадает с осью x.

Кинематические граничные условия, реализуемые для определения горизонтальной жесткости пружины, приближены к схеме, применяемой при испытаниях пружин, согласно DIN EN 13298:2003 [22], и приведенной на рис. 2. Для нижнего опорного тела запрещены перемещения всех точек

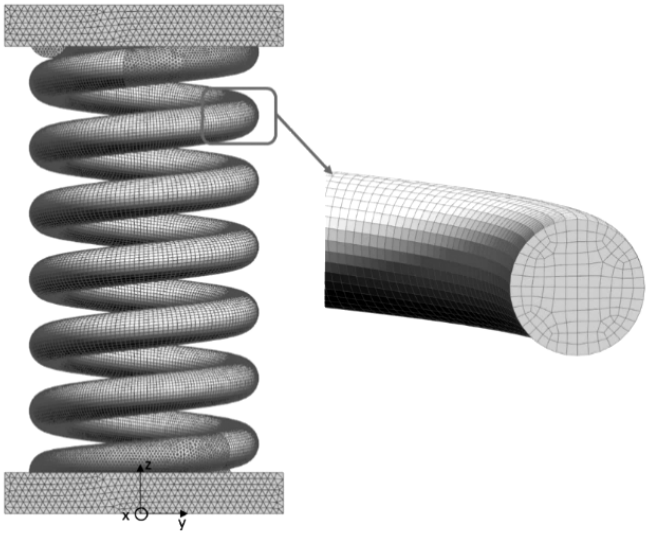


Рис. 1. Модель пружины с двумя опорными телами с нанесенной сеткой конечных элементов

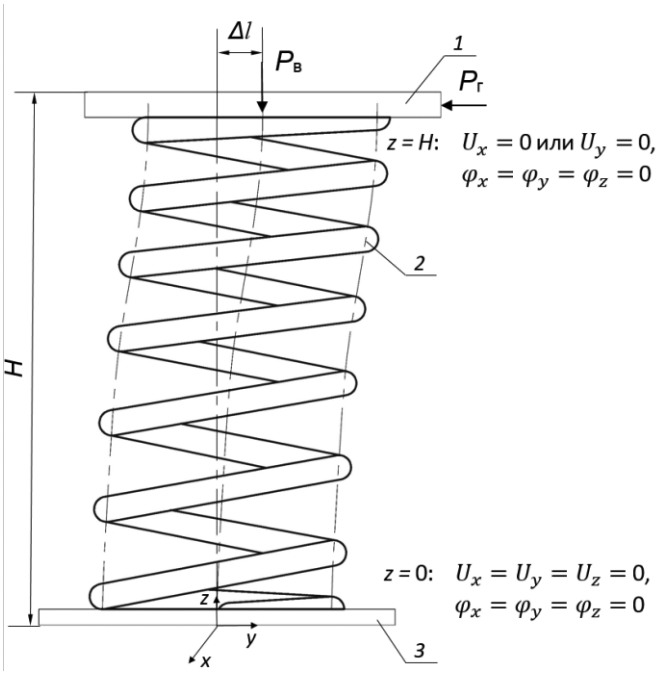


Рис. 2. Расчетная схема пружины для определения горизонтальной жесткости:
1 – верхнее опорное тело; *2* – пружина; *3* – нижнее опорное тело; *H* – высота пружины в свободном состоянии с учетом толщины нижнего и верхнего опорных тел

$U_x = U_y = U_z = 0$, для верхнего опорного тела – перемещение точек вдоль оси x ($U_x = 0$) либо оси y ($U_y = 0$), а также для этих тел – все повороты опорных поверхностей ($\varphi_x = \varphi_y = \varphi_z = 0$).

Между опорными поверхностями витков пружины и опорными телами учитывалась возможность возникновения контактного взаимодействия, для которого были реализованы граничные условия

$$U_{z\ \text{виток}} = U_{z\ \text{опора}}, \qquad (10)$$

$$\tau_{xy\ \text{виток}} - \tau_{xy\ \text{опора}} \le \mu P. \qquad (11)$$

В (10) и (11) $U_{z\ \text{виток}}$ и $U_{z\ \text{опора}}$ – перемещения на контактных поверхностях опорного тела и опорного витка пружины соответственно; $\tau_{xy\ \text{виток}}$, $\tau_{xy\ \text{опора}}$ – касательные напряжения на контактных поверхностях опорного тела и опорного витка пружины соответственно; μ – коэффициент трения (принят μ = 0,3); P – контактное давление, определяемое МКЭ.

Силовые граничные условия прикладывались к верхнему опорному телу в два этапа:

• под действием вертикальной силы $P_в$, Н, прикладываемой к верхней поверхности тела и соответствующей порожнему или груженому режиму загрузки вагона, пружина отклонялась в боковом направлении на величину Δl (вдоль оси y или x в зависимости от кинематических граничных условий), м;

• к торцевой поверхности верхнего опорного тела пружины (направление вдоль оси y или x), деформированной под действием вертикальной силы $P_в$, прикладывалась боковая сила $P_г$, Н, которая соответствовала силе, возвращающей пружину в исходное положение относительно вертикальной оси.

Горизонтальная жесткость пружины, МН/м, определялась по формуле

$$C_г = \frac{P_г}{\Delta l}.$$

С целью верификации конечно-элементной модели для пружины второй ступени пассажирского тепловоза было проведено сопоставление результатов расчета вертикальной и горизонтальной жесткостей МКЭ с экспериментальными данными, представленными в [4] и табл. 4. Расхождение экспериментального значения горизонтальной жесткости в сравнении с аналитическим расчетом и МКЭ составило 16 и 13,5 % соответственно, что позволило использовать разработанную модель для дальнейших исследований.

Результаты расчета МКЭ горизонтальной жесткости пружин тележек 18-100 и Motion Control представлены в табл. 5.

Анализ результатов, приведенных в табл. 5, показал, что с ростом вертикальной силы, действующей на пружину, горизонтальная жесткость наружной пружины тележки 18-100 увеличилась в среднем на 8 %, а для внутренней пружины тележки Motion Control уменьшилась на 55 %. При этом для внутренней пружины тележки 18-100 и наружной пружины тележки

ТАБЛИЦА 4. Сравнение значений жесткости пружины по результатам испытаний и конечно-элементного моделирования

Показатель	l_0, м	D, м	d, м	n	Вертикальная/горизонтальная жесткость пружины, кН/м		
					Аналитический расчет [4]	Эксперимент [4]	МКЭ
Пружина второй ступени пассажирского тепловоза	0,648	0,198	0,042	9	445/99	–/83	442/96

ТАБЛИЦА 5. Результаты расчета горизонтальной жесткости (в кН/м) пружин МКЭ

Пружина	Тележка 18-100		Тележка Motion Control	
	Т	Бр	Т	Бр
Наружная	453/439	489/473	212/208	212/208
Внутренняя	128/124	127/125	52/46	23/21

Примечание. Перед чертой указана жесткость вдоль оси x, после – жесткость вдоль оси y.

Motion Control с ростом вертикальной силы данный показатель не изменился, что позволяет сделать вывод о влиянии габаритов пружин на величину горизонтальной жесткости. Необходимо также отметить, что расхождение значений горизонтальной жесткости, определенных вдоль осей *x* и *y*, составляет не более 3% для всех пружин.

Наибольшая сходимость результатов расчета горизонтальной жесткости установлена при использовании формул из ГОСТ 34093–2017 и DIN EN 13906-1 в сравнении с МКЭ для крупногабаритных пружин тележек грузовых вагонов, у которых средний диаметр пружины свыше 100 мм (в большинстве случаев расхождение не более 16%).

Для пружин с меньшими габаритами (внутренняя пружина тележки Motion Control) расчет горизонтальной жесткости по формуле ГОСТ 34093–2017 приводит к существенному расхождению результатов (до 49%) по сравнению с МКЭ, а выражение из DIN EN 13906-1 дает возможность оценить горизонтальную жесткость пружины только под действием вертикальной силы, соответствующей порожнему режиму. Также укажем, что аналитический подход, представленный в РД 32.51–95, не позволяет определить горизонтальную жесткость пружин с некоторым сочетанием их геометрических параметров, что свойственно в основном малогабаритным пружинам (средний диаметр менее 100 мм) и пружинам под действием вертикальной силы, отвечающей порожнему режиму.

Заключение

Проведенные исследования горизонтальной жесткости пружин с применением аналитических подходов привели к получению наиболее точных выражений для расчета крупногабаритных пружин, у которых средний диаметр выше 100 мм, при этом аналитический метод дает лишь приблизительную оценку, чувствителен к геометрии пружин и вертикальной силе: расхождение результатов с МКЭ увеличивается при переходе от порожнего режима вагона (не более 10%) к груженому (до 11 и 50% для крупногабаритных и малогабаритных пружин соответственно).

Более точно деформационное поведение пружины, независимо от ее габаритов (включая пружины со средним диаметром менее 100 мм), позволяет оценить МКЭ, который следует применять в качестве арбитражного.

Библиографический список

1. Пономарев С. Д. Расчет и конструкция витых пружин / С. Д. Пономарев. – М. : ОНТИ НКТП СССР, 1938. – 351 с.

2. Wahl A. M. Mechanical springs / A. M. Wahl. – Cleveland, Ohio : Penton Publishing Company, 1944. – 463 p.

3. ГОСТ 13765–86. Пружины винтовые цилиндрические сжатия и растяжения из стали круглого сечения. Обозначение параметров, методика определения размеров. – М. : Стандартинформ, 1986. – 29 с.

4. РД 32.51–95. Методика расчета на прочность пружин рессорного подвешивания подвижного состава железных дорог при действии продольных и комбинированных нагрузок. Руководящий документ. – М. : ВНИТИ, 1995. – 41 с.

5. ASTM A 125–96. Standard Specification for Steel Springs, Helical, Heat-Treated. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018. – URL : https://www.astm.org, 2018 (дата обращения : 28.01.2019).

6. DIN EN 13906-1:2013. Cylindrical helical springs made from round wire and bar – Calculation and design – Pt 1 : Compression springs. – Brussels : European committee for standardization, 2013.

7. ГОСТ 34093–2017. Вагоны пассажирские локомотивной тяги. Требования к прочности и динамическим качествам. – М. : Стандартинформ, 2017. – 42 с.

8. Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 (несамоходных). – М. : ГосНИИВ–ВНИИЖТ, 1996. – 319 с.

9. Пономарев С. Д. Пружины, их расчет и конструирование / С. Д. Пономарев. – М. : ВНИТОМАШ, 1954. – 183 с.

10. Пономарев С. Д. Расчет упругих элементов машин и приборов / С. Д. Пономарев, Л. Е. Андреева. – М. : Машиностроение, 1980. – 326 с.

11. Андреева Л. Е. Упругие элементы приборов / Л. Е. Андреева ; под ред. В. И. Феодосьева. – М. : Машгиз, 1962. – 456 с.

12. Макушин В. М. Поперечные колебания и устойчивость цилиндрических витых пружин / В. М. Макушин // Динамика и прочность пружин : сб. статей ; под ред. С. В. Серенсена, С. Д. Пономарева. – Л. : Изд-во АН СССР, 1950. – С. 238–269.

13. Хвингия М. В. Поперечные колебания цилиндрических винтовых пружин, сжатых осевыми силами / М. В. Хвингия // Расчеты на прочность : сб. статей. – М. : Машгиз, 1964. – Вып. 10.– С. 307–323.

14. Коноваленко В. В. К расчету горизонтальной жесткости винтовых цилиндрических пружин / В. В. Коноваленко, Д. В. Пополов, Г. Л. Зайцев, И. В. Засельский // Вестн. Приазов. гос. технич. ун-та. – 2017. – № 35. – С. 110–117.

15. Олейник В. Л. Методика расчета поперечной жесткости крупных винтовых цилиндрических пружин / В. Л. Олейник // Вестн. Всерос. науч.-исслед. и проект.-конструкт. ин-та электровозостроения. – 2007. – № 2. – С. 174–184.

16. Krettek O. Zur Berechnung der Quer- und Biegekennung von Schraubenfedern für Schienenfahrzeuge / O. Krettek, M. Sobczak // ZEV-Glas. Ann. – 1988. – Bd 112, N 9. – S. 319–326.

17. Burdick W. E. Deflection of helical springs under Transverse Loadings / W. E. Burdick, F. S. Chaplinand, W. L. Sheppard // Trans. Amer. Soc. Mech. Engr. (Transactions A.S.M.E.). – 1939. – October. – P. 623–632.

18. Львов Д. В. О методике расчета на прочность пружин при действии комбинированных нагрузок / Д. В. Львов, В. И. Романов // Исследование динамики и прочности узлов и тепловозов : сб. трудов ; под ред. Л. К. Добрынина. – Коломна : ВНИТИ, 1976. – Вып. 43. – С. 68–74.

19. S-335 Spring – D5, 3 11/16-in. Travel (AAR Manual of Standards and Recommended Practices. Section D, Trucks and Truck Details, Update 2018).

20. US 7174837 B2. Three-piece motion control truck system. United States Patent.

21. Гончаров П. С. NX advanced simulation. Инженерный анализ / П. С. Гончаров, И. А. Артамонов, Т. Ф. Халитов, С. В. Динисихин, Д. Е. Сотник. – М. : ДМК Пресс, 2012. – 504 с.

22. DIN EN 13298:2003. Railway applications – Suspension components – Helical suspension springs, steel. – Brussels : European committee for standardization, 2003.

Дата поступления: 10.04.2019
Решение о публикации: 22.04.2019

Контактная информация:
ОРЛОВА Анна Михайловна – доктор техн. наук, заместитель генерального директора по научно-техническому развитию, aorlova@uniwagon.com
РУДАКОВА Екатерина Александровна – канд. техн. наук, руководитель отдела, ведущий научный сотрудник, erudakova@tt-center.ru
ШЕВЧЕНКО Денис Владимирович – канд. техн. наук, директор научно-исследовательской дирекции, заместитель исполнительного директора по науке, dshevchenko@tt-center.ru
ГУСЕВ Артем Владимирович – канд. техн. наук, научный сотрудник, agusev@tt-center.ru
ПОПОВИЧ Станислав Игоревич – старший инженер-исследователь, spopovich@tt-center.ru
САВУШКИН Роман Александрович – канд. техн. наук, профессор, tu@miit.ru

Analysis of design procedures for horizontal spring stiffness of bogie suspension of freight cars

A. M. Orlova[1], E. A. Rudakova[2], D. V. Shevchenko[2], A. V. Gusev[2], C. I. Popovich[2], R. A. Savushkin[3]

[1] PAO “Research and development corporation “United Wagon Company”, 7/11-1, Novokuznetsky ul., Moscow, 115184, Russian Federation

[2] OOO "All-Union Research and Development Center for Transport Technology", 2, lit. A, 23th line, Vasilievsky Island, Saint Petersburg, 199106, Russian Federation
[3] "Moscow State University of Railway Engineering (MIIT), 9, str. 9, Obraztsova ul., Moscow, 127994, Russian Federation

For citation: Orlova A. M., Rudakova E. A., Shevchenko D. V., Gusev A. V., Popovich S. I., Savushkin R. A. Analysis of design procedures for horizontal spring stiffness of bogie suspension of freight cars. *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2019, vol. 16, iss. 2, pp. 191–201. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2019-2-191-201

Summary

Objective: To determine horizontal stiffness of springs of bogie swing suspension of the freight car, based on analytical approaches and the method of finite-element modeling. **Methods:** Analytic expressions and methods of finite elements are applied. **Results:** It is recommended to use analytical approach to the analysis of horizontal stiffness of springs at the preliminary stage for rapid analysis of spring characteristics. Finite-element modeling makes it possible to take into account the specificities of spring fixture in the process of its operation in bogie suspension and to precisely determine horizontal stiffness. **Practical importance:** The developed finite-element model of the spring with boundary conditions can be applied in determination of horizontal stiffness of springs of bogie suspension for different types of the rolling stock.

Keywords: Bogie suspension springs, freight bogie, horizontal stiffness, Reuleaux formula, Burdick formula, finite-element method, essential and natural boundary conditions for springs.

References

1. Ponomarev S. D. *Raschet i konstruktsiya vitykh pruzhin* [*Coiled springs: analysis and design*]. Moscow, ONTI NKTP USSR Publ., 1938, 351 p. (In Russian)

2. Wahl A. M. *Mechanical springs*. Cleveland, Ohio, Penton Publishing Company, 1944, 463 p.

3. *GOST 13765–86. Pruzhiny vintoviye tsilindricheskiye szhatiya i rastyazheniya iz staly kruglogo secheniya. Oboznacheniye parametrov, metodika opredeleniya razmerov* [*State Standard 13765–86. Compression and tension cylindrical springs made of circular-section steel. Identification of parameters, procedure, dimensioning*]. Moscow, Standartinform Publ., 1986, 29 p. (In Russian)

4. *RD 32.51–95. Metodika rascheta na prochnost pruzhin ressornogo podveshivaniya podvizhnogo sostava zheleznykh dorog pry deistvii prodolnykh i kombinirovannykh nagruzok* [*RD 32.51–95. Design procedure of spring stiffness for bogie suspension of the railway rolling stock under the influence of transverse and combined loading*]. Regulation document. Moscow, VNITI Publ., 1995, 41 p. (In Russian)

5. *ASTM A 125–96. Standard Specification for Steel Springs, Helical, Heat-Treated*. ASTM International, West Conshohocken, PA Publ., 2018. Available at: https://www.astm.org (accessed: 28.01.2019).

6. *DIN EN 13906-1:2013. Cylindrical helical springs made from round wire and bar. Calculation and design. Pt 1. Compression springs.* Brussels, European committee for standardization Publ., 2013.

7. *GOST 34093–2017. Vagony passazhirskiye lokomotivnoy tyagy. Trebovaniya k prochnosty i dinamicheskym kachestvam* [*State Standard 34093–2017. Locomotive-hauled passenger cars. Requirements to serviceability and dynamic properties*]. Moscow, Standartinform Publ., 2017, 42 p. (In Russian)

8. *Normy dlya rascheta i proektirovaniya vagonov zheleznykh dorog MPS kolei 1520 (nesamokhodnykh)* [*Norms for calculation and design of cars for 1520 gauge railroads of the Ministry of Railways (unpowered)*]. Moscow, GosNIIV–VNIIZHT [All-Russian Research Institute of Railway Transport] Publ., 1996, 319 p. (In Russian)

9. Ponomarev S. D. *Pruzhiny, ikh raschet i konstruirovaniye* [*Springs: calculation and design*]. Moscow, VNITOMASH [All-Union Scientific engineering and technical community of mechanical engineers] Publ., 1954, 183 p. (In Russian)

10. Ponomarev S. D. & Andreeva L. E. *Raschet uprugikh elementov mashin i priborov* [*Design procedure of springs for vehicles and equipment*]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1980, 326 p. (In Russian)

11. Andreeva L. E. *Uprugiye elementy priborov* [*Spring elements of equipment*]. Ed. by V.I. Feodosieva. Moscow, Mashgiz Publ., 1962, 456 p. (In Russian)

12. Makushin V. M. Poperechniye kolebaniya i ustoichivost tsilindricheskikh vitykh pruzhin [Transverse vibrations and stability of coiled springs]. *Dinamika i prochnost pruzhin* [*Dynamics and durability of springs*]. Coll. papers, eds. by S. V. Serensen and S. D. Ponomarev. Leningrad, AS USSR Publ., 1950, pp. 238–269. (In Russian)

13. Khvingiya M. V. Poperechniye kolebaniya tsilindricheskikh vintovykh pruzhin, szhatykh osevymy sylamy [Transverse vibrations of coiled springs compressed by axial forces]. *Raschety na prochnost* [*Strength calculations*. Coll. papers]. Moscow, Machgis Publ., 1964, iss. 10, pp. 307–323. (In Russian)

14. Konovalenko V.V., Popolov D. V., Zaitzev G. L. & Zaselskiy I. V. K raschetu gorizontalnoy zhestkosty vintovykh tsilindricheskikh pruzhin [Design procedure of horizontal stiffness of coiled springs]. *Vestnik Priazov. gos. Tekhnich. Universiteta* [Proceedings of Priazovsky State Technical University], 2017, no. 35, pp. 110–117. (In Russian)

15. Oleinik V. L. Metodika rasheta poperechnoy zhestkosty krupnykh vintovykh tsilindricheskikh pruzhin [Design procedure of lateral stiffness for large size coiled springs]. *Vestnik Vseros. nauch.-issled. i proekt.-konstruktor. instituta elektrovozostroyeniya* [*Proceedings of All-Russian research and development engineering institute of electric locomotive building*], 2007, no. 2, pp. 174–184. (In Russian)

16. Krettek O. & Sobczak M. Zur Berechnung der Quer- und Biegekennung von Schraubenfedern für Schienenfahrzeuge. *ZEV-Glas*. *Ann*., 1988, Bd 112, no. 9, pp. 319–326.

17. Burdick W. E., Chaplinand F. S. & Sheppard W. L. Deflection of helical springs under Transverse Loadings. *Trans. Amer. Soc. Mech. Engr*. (*Transactions A.S.M.E.*), 1939, October, pp. 623–632.

18. Lvov D. V. & Romanov V. I. O metodike rascheta na prochnost pruzhin pry deistvii kombinirovannykh nagruzok [Design procedure of spring serviceability during combined loading]. *Issledovaniye dinamiky i prochnosty uzlov i teplovozov* [*The study of dynamics and serviceability of rolling assemblies and diesel locomotives.* Coll. papers]. Ed. by L. K. Dobrynin. Kolomna, VNITI Publ., 1976, iss. 43, pp. 68–74. (In Russian)

19. *S-335 Spring – D5*, 3 11/16-in. *Travel* (*AAR Manual of Standards and Recommended Practices. Section D, Trucks and Truck Details*, Update 2018).

20. *US 7174837 B2. Three-piece motion control truck system.* United States Patent.

21. Goncharov P. S., Artamonov I. A., Khalitov T. F., Dinisikhin S. V. & Sotnik D. E. *NX advanced simulation. Inzhenerniy analiz* [*Engineering analysis*]. Moscow, DMK Press, 2012, 504 p. (In Russian)

22. *DIN EN 13298:2003. Railway applications – Suspension components – Helical suspension springs, steel*. Brussels, European committee for standardization Publ., 2003.

Received: April 10, 2019
Accepted: April 22, 2019

Author's information:
Anna M. ORLOVA – D. Sci. in Engineering, Deputy General Manager in research and technological development, aorlova@uniwagon.com
Ekaterina A. RUDAKOVA – PhD in Engineering, Head of department, Senior Researcher, erudakova@tt-center.ru
Denis V. SHEVCHENKO – PhD in Engineering, Head of research and development managerial board, Deputy Executive Director of research, dshevchenko@tt-center.ru
Artem V. GUSEV – PhD in Engineering, Research Scientist, agusev@tt-center.ru
Stanislav I. POPOVICH – Senior Research Engineer, spopovich@tt-center.ru
Roman A. SAVUSHKIN – PhD in Engineering, Professor, tu@miit.ru

УДК 625.35

Влияние геометрических параметров железнодорожного пути на величину эквивалентной коничности колесной пары

А. А. Киселев, Л. С. Блажко, А. С. Гапоненко, А. В. Романов

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

Для цитирования: *Киселев А. А., Блажко Л. С., Гапоненко А. С., Романов А. В.* Влияние геометрических параметров железнодорожного пути на величину эквивалентной коничности колесной пары // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб. : ПГУПС, 2019. – Т. 16, вып. 2. – С. 202–211. DOI: 10.20295/1815-588X-2019-2-202-211

Аннотация

Цель: Определение зависимости эквивалентной коничности колесной пары от геометрических параметров рельсовой колеи (ширины колеи, подуклонки поверхности катания рельсов, формы поперечного профиля рельсов). Оценка влияния величины эквивалентной коничности колесной пары на уровень горизонтальных ускорений рамы тележки высокоскоростного подвижного состава. **Методы:** Использованы методы компьютерного и математического моделирования, методы математической статистики при обработке результатов эксперимента. **Результаты:** Получена зависимость эквивалентной коничности колесной пары от геометрических параметров рельсовой колеи. Определены причины появления повышенного уровня горизонтальных ускорений рамы тележки высокоскоростного подвижного состава. **Практическая значимость:** По результатам исследования выявлена необходимость учета параметра эквивалентной коничности при реализации высокоскоростного движения на железных дорогах России. Предложены методы приведения параметров эквивалентной коничности к параметрам эффективности.

Ключевые слова: Эквивалентная коничность, ширина колеи, подуклонка поверхности катания рельсов, профиль колеса, профиль рельса, горизонтальные ускорения рамы тележки.

Во всех странах существует практика периодического контроля динамики взаимодействия тележек высокоскоростного подвижного состава и пути. На железных дорогах Российской Федерации динамика тележек высокоскоростного подвижного состава «Сапсан» контролируется датчиками контроля устойчивости хода (КУХ).

Уровни срабатывания системы КУХ устанавливаются компанией «Сименс АГ» на основании рекомендации Международного союза железных дорог (МСЖД) в соответствии с требованиями Стандарта UIC-518 [1]. Стандарт нормирует максимальное одиночное ускорение рамы тележки в горизонтальной плоскости по условию безопасности, которое не должно превышать 11 м/с^2. Однако Стандартом UIC-515 [2] для тележек с достаточно неупругим шарнирным сочленением букс колесных пар установлено иное значение ускорения рамы тележки в горизонтальной плоскости, равное 8 м/с^2, которое можно применить при условии, что оно имеет место в более чем шести колебаниях, следующих друг за другом, при частоте этих колебаний в диапазоне от 4 до 8 Гц.

Стандартом UIC-518 также регламентируется среднеквадратическое значение ускорения рамы тележки в горизонтальной плоскости (скользящее среднее на базе 100 м), которое по условию устойчивости, т. е. для периодических гармонических колебаний в

диапазоне частот от 4 до 8 Гц, не должно превышать 5,5 м/с^2.

На вагонах с профилем колеса S3G, которые эксплуатировались на высокоскоростных поездах «Сапсан» на начальном этапе, число срабатываний системы КУХ было минимальным. Из-за появления и развития в процессе эксплуатации выщербин и выкрашиваний на поверхности катания колес данный профиль оказался неприемлем. После перехода на профиль колеса ВНИИЖТ-РМ-70 [3] был зафиксирован резкий рост срабатываний датчиков. Диаграмма количества срабатываний датчиков системы КУХ приведена на рис. 1.

С целью выявления причин срабатывания системы КУХ были произведены опытные поездки с измерением ускорений рамы тележки поездов «Сапсан» в горизонтальной плоскости прибором «Mactrack».

При следовании по I главному пути линии Санкт-Петербург–Москва на большей протяженности перегонов уровни горизонтального ускорения тележек на составах № 2-04 и 1-15 в среднем существенно не отличаются. Это подтверждается данными, приведенными на рис. 2, где линии среднеквадратических отклонений практически совпадают.

Однако на ряде участков пути у состава № 2-04 уровень горизонтального ускорения тележки оказался в 2–4 раза выше, чем у состава № 1-15, что видно на рис. 3, где линии среднеквадратических отклонений расходятся.

Причиной срабатывания датчиков КУХ стало неблагоприятное сочетание ряда факторов, важнейшие из которых объединены в две группы, относящиеся к пути и подвижному составу.

Факторы первой группы: износ головки рельса, изменение подуклонки рельса и, как следствие, наклона поверхности катания, сужение колеи, волнообразный износ рельсов, неравномерная жесткость подрельсового основания.

Факторы второй группы: износ гребней и поверхности катания колес подвижного состава, изменение характеристик гасителей, демпфирующих поперечные колебания, аэродинамика подвагонного пространства, загрузка поезда.

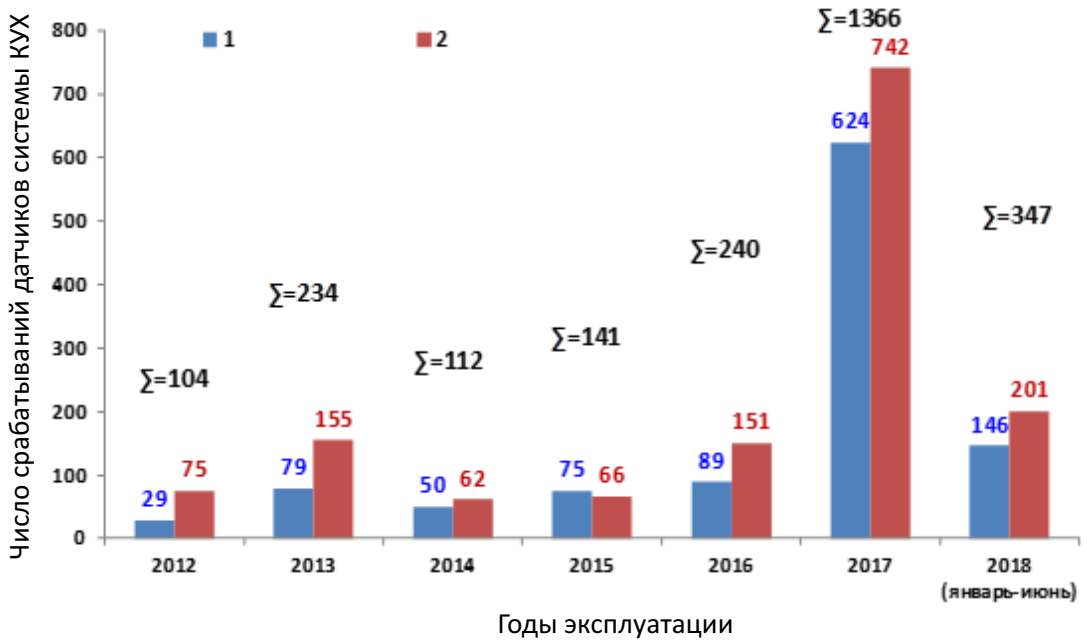
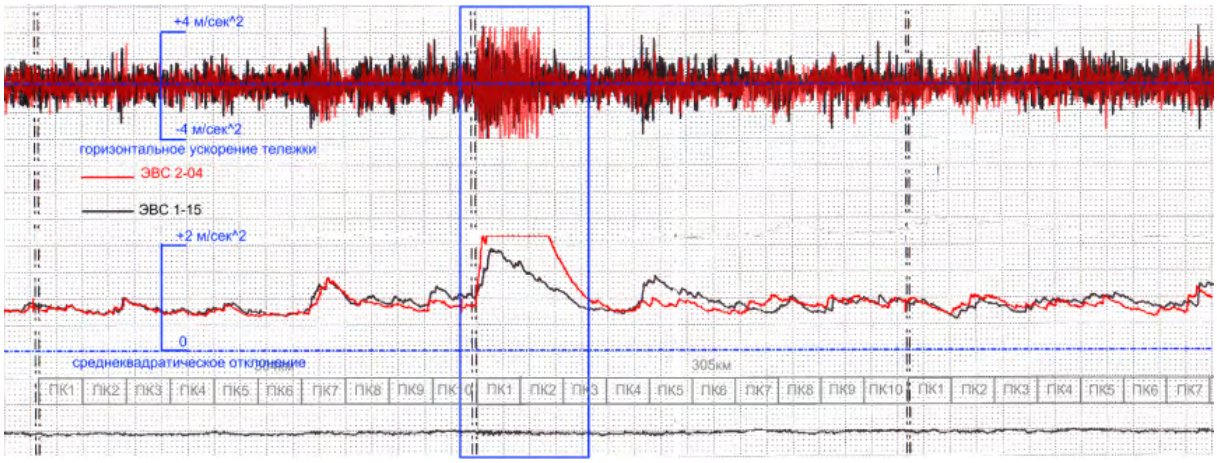
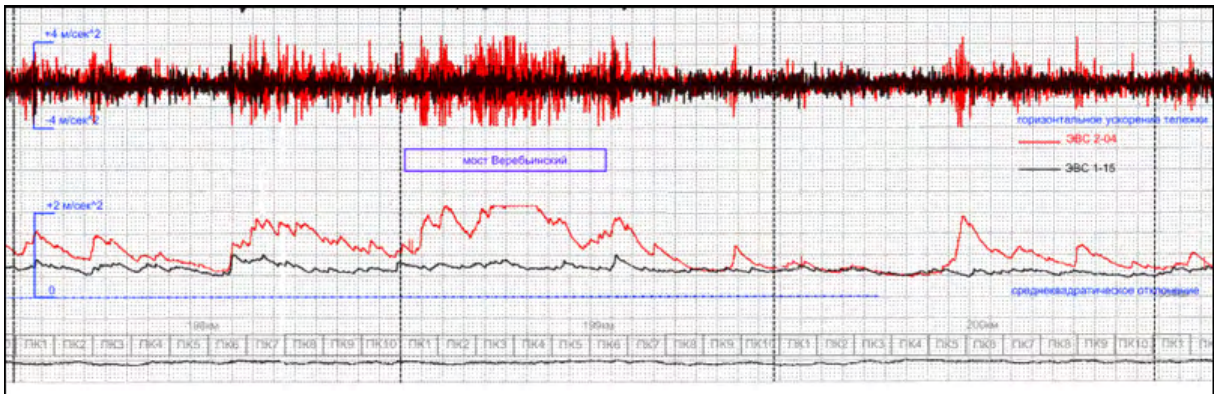


Рис. 1. Диаграмма количества случаев срабатывания датчиков системы контроля устойчивости хода ЭВС «Сапсан» на линии Санкт-Петербург–Москва:
1 – I главный путь; *2* – II главный путь



ЭВС № 2-04
ЭВС № 1-15

Рис. 2. Уровень горизонтальных ускорений тележки и среднеквадратических отклонений на участке 304–305 км I главного пути



ЭВС № 2-04
ЭВС № 1-15

Рис. 3. Уровень горизонтальных ускорений тележки и среднеквадратических отклонений на участке 198–200 км I главного пути

Воздействие этих факторов приводит к ухудшению плавности хода подвижного состава из-за увеличения сил инерции, возникающих из-за сложных колебаний кузова на рессорах и необрессоренных частей. В конечном итоге возникают интенсивные колебания виляния, в результате которых качение колес осуществляется по дискам разных радиусов.

В свою очередь, при движении колесной пары по рельсу проявляется дополнительная сила, направленная на преодоление горизонтальных неровностей. Именно она и служит источником критических поперечных ускорений тележки, рамных сил и распирающих усилий в рельсовой колее, что в конечном счете повышает риски интенсивного износа гребней колес и рабочей грани головки рельса [4].

Смещение колесной пары в поперечном направлении под действием горизонтальной силы приводит к изменению местоположения точек контакта на профилях колес, что вызывает изменение радиуса диска вращения

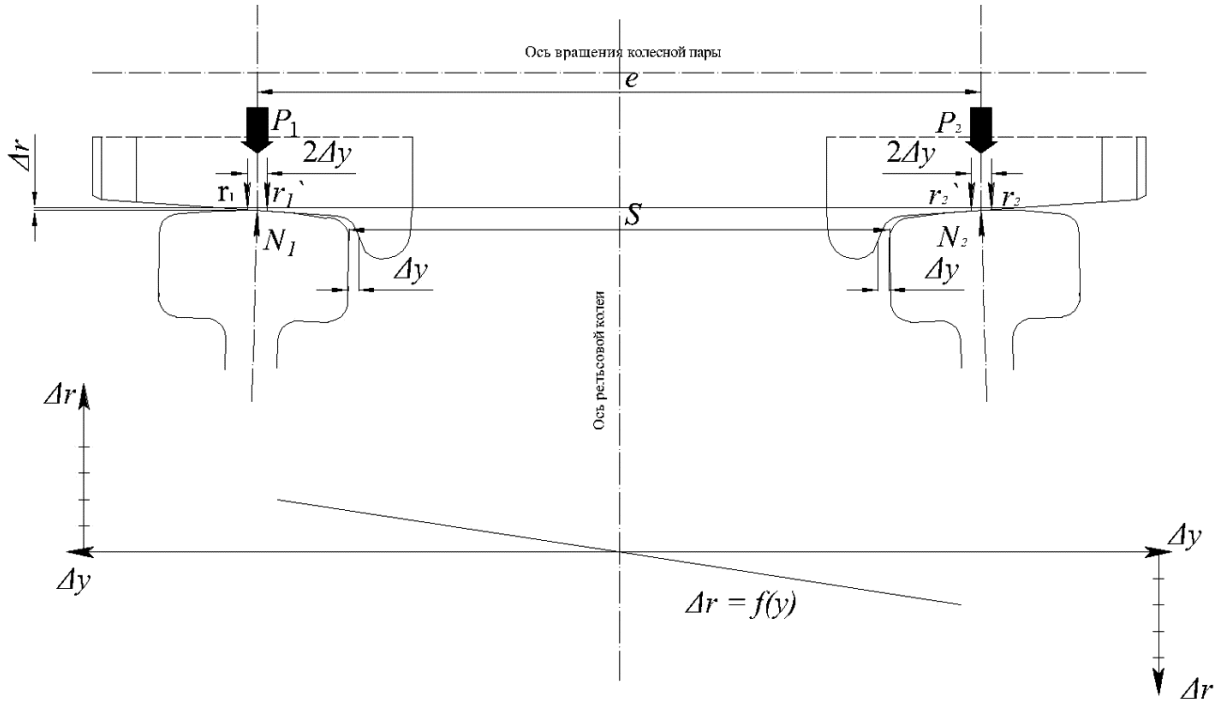


Рис. 4. Геометрические характеристики взаимодействия колесной пары с рельсовой колеей: e – расстояние между радиусами кругов катания колесной пары; S – ширина рельсовой колеи; Δy – величина зазора между гребнем колеса и боковой гранью рельсов; r_1 и r_2 – радиусы дисков вращения колес; Δr – разница радиусов диска вращения колес

колеса. Радиус диска вращения и угол наклона колесной пары относительно оси пути меняются по мере того, как колесная пара смещается в поперечном направлении в пределах зазора между гребнем колеса и рабочей гранью рельса. Функция разности радиусов кругов катания колес Δr от величины поперечного смещения y ($\Delta r = f(y)$) – одна из основных характеристик эквивалентной коничности.

Эквивалентная коничность формируется на основе следующих параметров колесной пары и рельсовой колеи (рис. 4) [5]:

– ширина рельсовой колеи S, расстояние между радиусами кругов катания колесной пары e, величина зазора между гребнем колеса и боковой гранью рельсов Δy;

– профили поверхностей катания колес и головок рельсов;

– радиусы кругов катания колес r_1 и r_2;

– наклон поверхности катания рельса;

– вертикальные неровности пути.

Для исследования влияния параметров эквивалентной коничности на динамику движения подвижного состава были определены зависимости параметров коничности от ширины рельсовой колеи, наклона и профиля поверхности катания головки рельса.

По результатам расчета эквивалентной коничности по формуле Клингеля [6] для профиля колеса ВНИИЖТ-РМ-70, рельса Р65 [7], расстояния между радиусами кругов катания колесной пары – 1580 мм, радиуса колеса – 460 мм, на интервале перемещения колеса – 3 мм была установлена зависимость величины эквивалентной коничности от ширины колеи и наклона поверхности катания рельсов (рис. 5).

Рассчитаем эквивалентную коничность в зависимости от среднего квадратического отклонения координаты поперечного смещения y = 1 мм и интервала усреднения, равного 3 мм, по формуле

$$\tan\gamma_e = \frac{\Delta r}{2y}.$$

Аналогичный расчет был выполнен для профилей колеса ВНИИЖТ-РМ-70 и рельса UIC60 (рис. 6) [8].

Анализ результатов расчетов позволил прийти к выводу о наличии явной зависимости величины эквивалентной коничности от значений ширины колеи и наклона поверхности катания рельсов. На рис. 5 и 6 видно, что при уменьшении ширины колеи и наклона поверхности катания рельса значительно увеличивается величина эквивалентной коничности. Данная ситуация весьма неблагоприятная, поскольку появляется гребневый контакт колеса с рельсом, увеличиваются частота поперечных колебаний колесной пары, горизонтальные силы в тележках подвижного состава и касательные напряжения в зоне контакта колеса и рельса.

По нормам МСЖД для скоростей движения до 250 км/ч эквивалентная коничность не должна превышать 0,3, что и видно на рис. 5 и 6. В случае необходимости обеспечения одноточечного контакта колеса с рельсом в зоне, близкой к оси симметрии рельса, значение эквивалентной коничности не должно превышать 0,2. В этом случае будет реализовано устойчивое движение подвижного состава со скоростями свыше 250 км/ч. Второе условие в полном объеме выполнено только для расчета с профилем рельса UIC60. Для расчета с профилем рельса Р65 условие не выполняется, когда величина подуклонки менее 1/20 и ширина колеи менее 1520 мм.

На эквивалентную коничность влияют и иные факторы, чем те, которые перечислены выше: вертикальные неровности пути, разница рельсовых нитей по уровню, различный наклон поверхностей катания левого и правого рельсов. С целью определения степени влияния этих факторов на величину эквивалентной коничности были проанализированы данные измерительной поездки, выполненной на линии Санкт-Петербург–Москва электропоездом «Сапсан» с установленной системой «Инфотранс-Веларо Rus». Резуль-

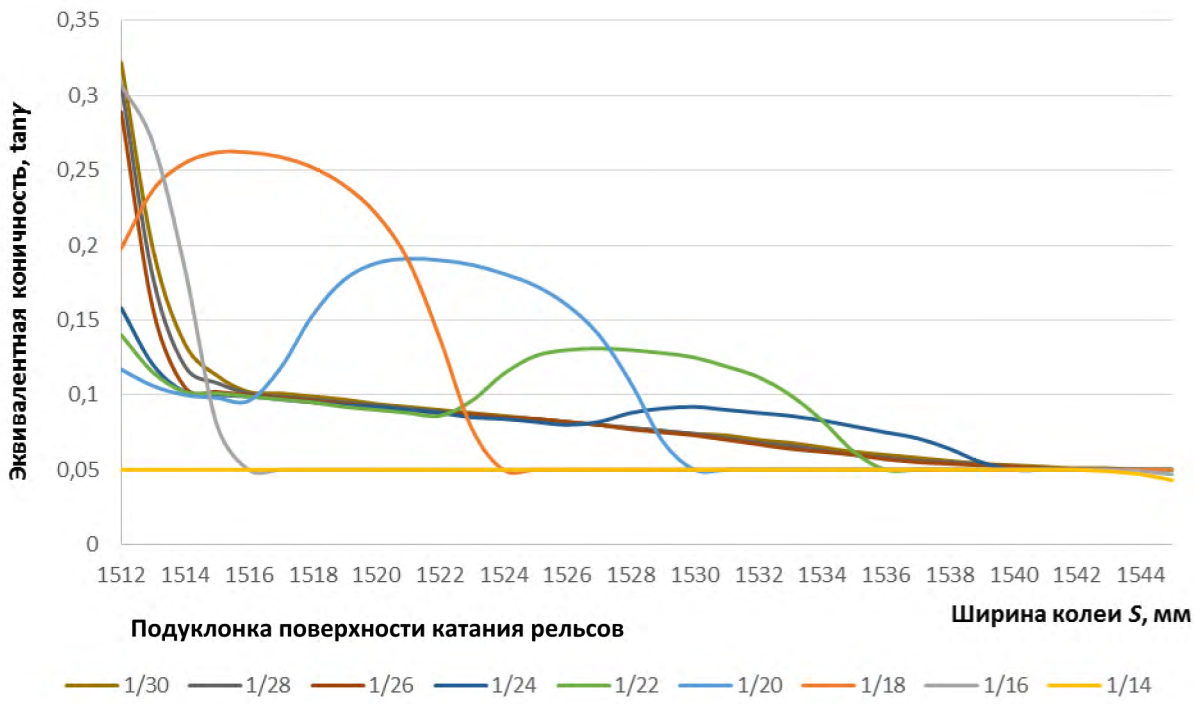


Рис. 5. Зависимость эквивалентной коничности от ширины рельсовой колеи и подуклонки поверхности катания рельсов для профилей колеса ВНИИЖТ-РМ-70 и рельса Р65

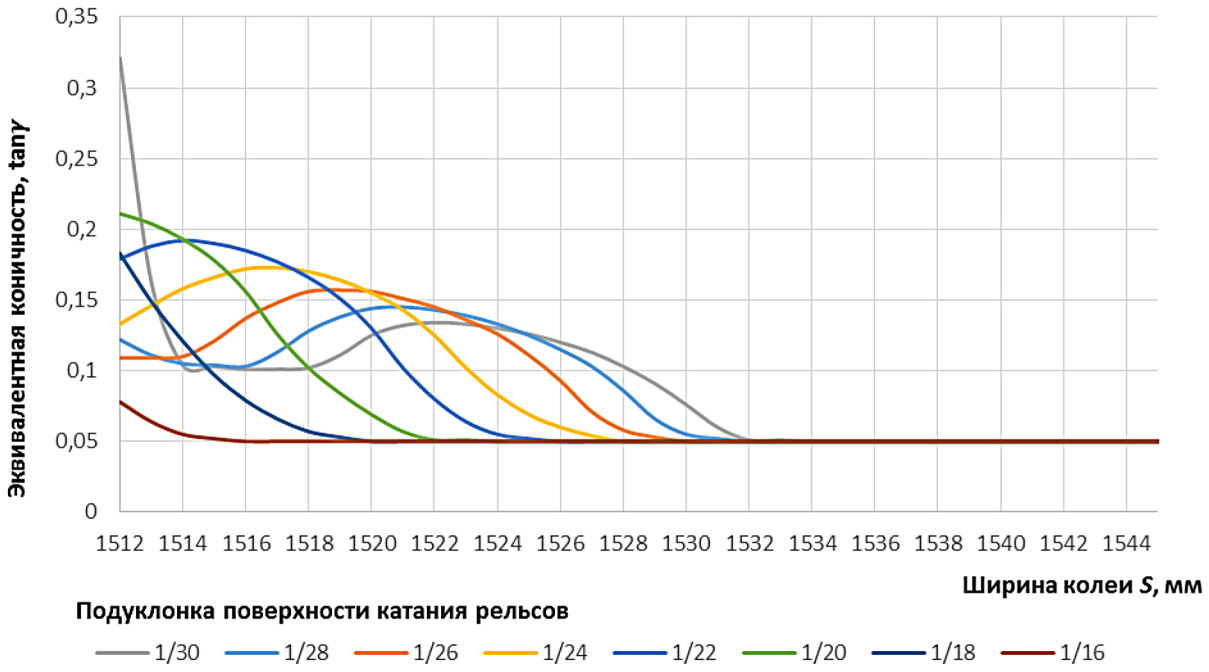


Рис. 6. Зависимость эквивалентной коничности от ширины рельсовой колеи и подуклонки поверхности катания рельсов для профилей колеса ВНИИЖТ-РМ-70 и рельса UIC60

таты измерительной поездки приведены на рис. 7 и 8.

Анализ показал, что на участке 198–200 км I главного пути эквивалентная коничность в 1,4–1,5 раза выше допускаемого значения 0,3, установленного нормами МСЖД. На участке 304–305 км ее значения за исключением отдельных случаев находятся в пределах нормы. Эти данные хорошо коррелируются с результатами измерений горизонтального ускорения тележки состава ЭВС «Сапсан» № 2-04 на тех же участках, приведенных на рис. 2 и 3.

При превышении параметров коничности имеется высокий риск ограничения максимальных скоростей движения, снижение которых возможно за счет своевременного приведения профиля колеса к параметрам ремонтного профиля, а также выполнения выправочных работ и работ по мобильной обработке поверхности катания головки рельса [9].

С целью оценки влияния выправки пути и шлифовки рельсов на поперечную динамику тележек была проведена измерительная поездка, выполненная на ЭВС «Сапсан» № 2-04 (вагон № 8, тележка № 1).

На рис. 9 сопоставлены результаты измерительных поездок до и после выправки пути по участкам II главного пути с 596 по 598 км. Их анализ показал, что амплитуда горизонтальных ускорений тележки после выправки снизилась, а среднеквадратическое отклонение не превышает 1 м/с^2.

Уменьшение амплитуды ускорений тележки подвижного состава в горизонтальной плоскости наблюдается и на участках после выполнения работ по шлифовке рельсов. На рис. 10 сопоставлены результаты аналогичных измерительных поездок до и после шлифовки по участку II главного пути с 18 км ПК7 по 20 км ПК10, где были выявлены случаи срабатывания системы КУХ. Их анализ показал, что уровень горизонтальных ускорений тележки скоростного поезда «Сапсан» снизился почти на всем протяжении участка, где была выполнена шлифовка рельсов. Среднеквадратическое отклонение после шлифовки не превышает 1 м/с^2.

Для улучшения динамики тележек высокоскоростного подвижного состава необходимо проводить профилактические работы по

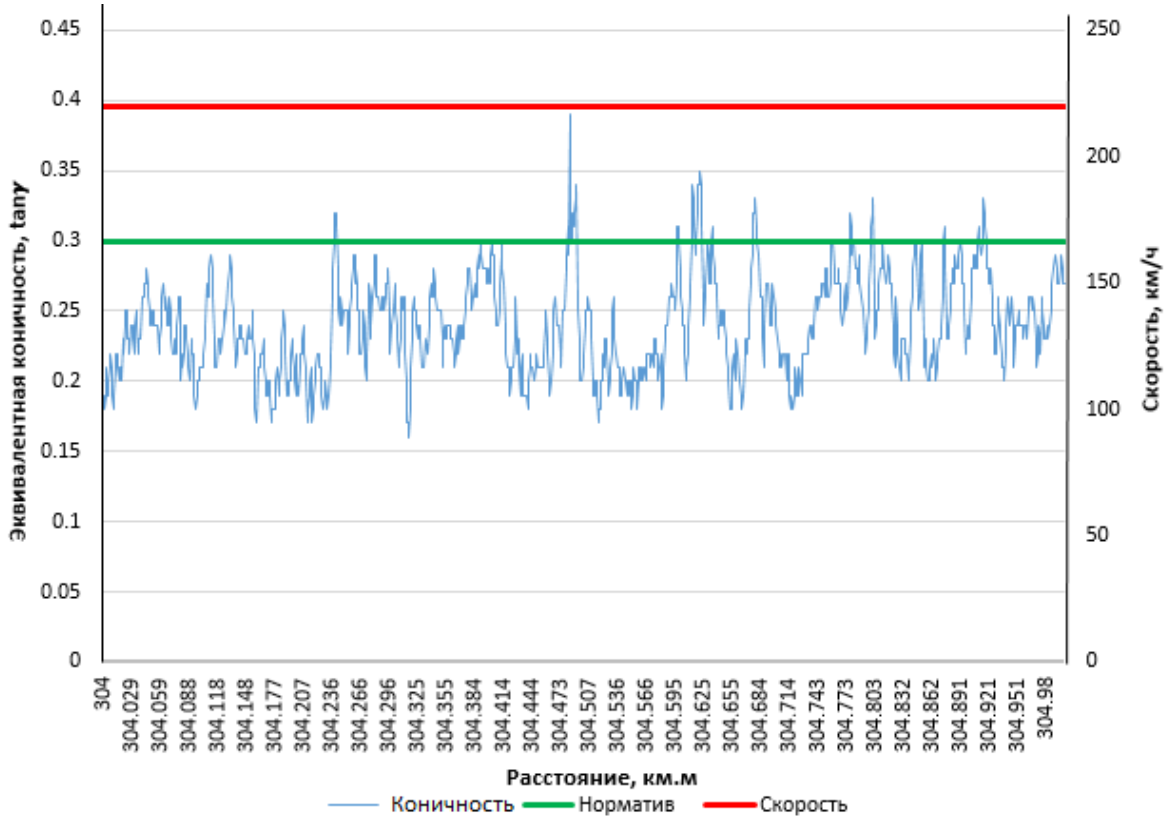


Рис. 7. Величина эквивалентной коничности колесной пары, измеренная на участке 304–305 км I главного пути линии Санкт-Петербург–Москва электропоездом «Сапсан» с установленной системой «Инфотранс-Веларо Rus»

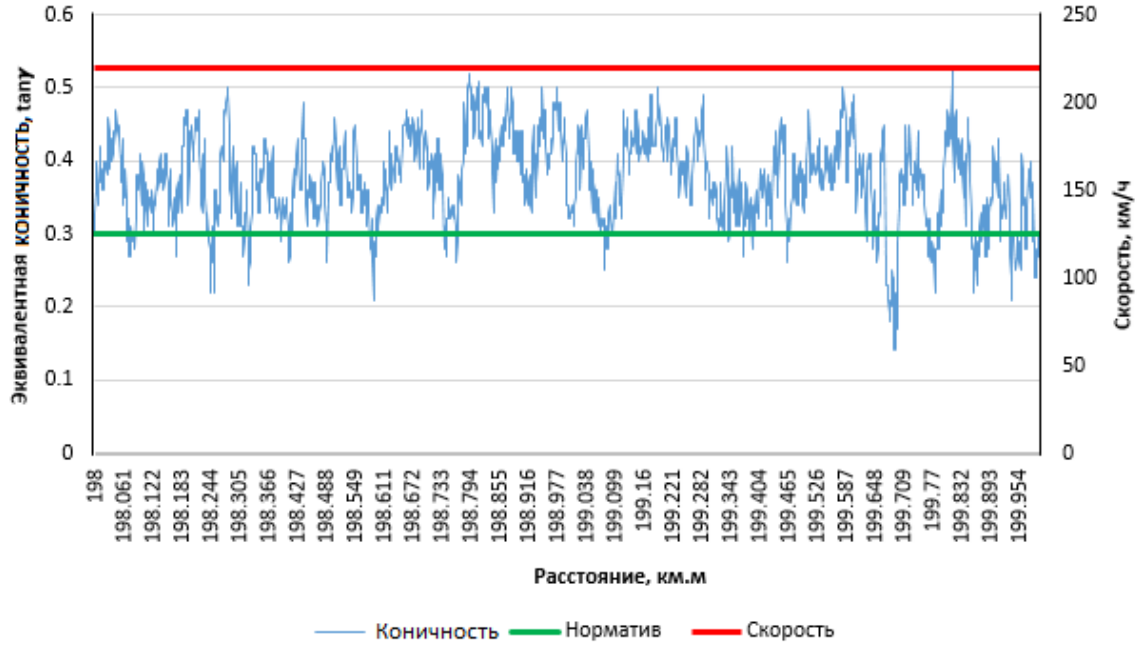
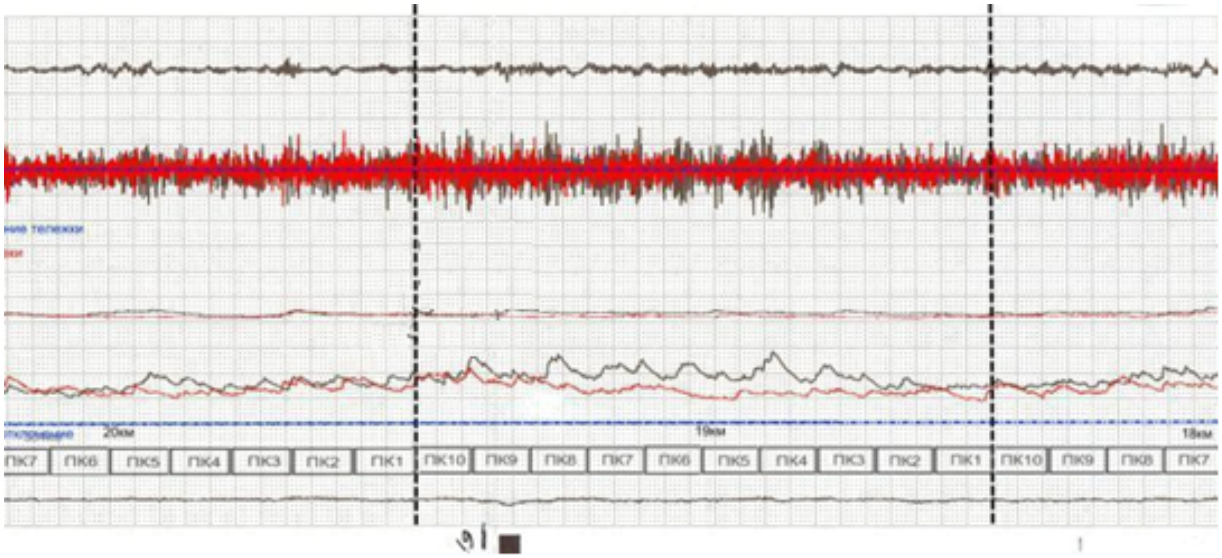
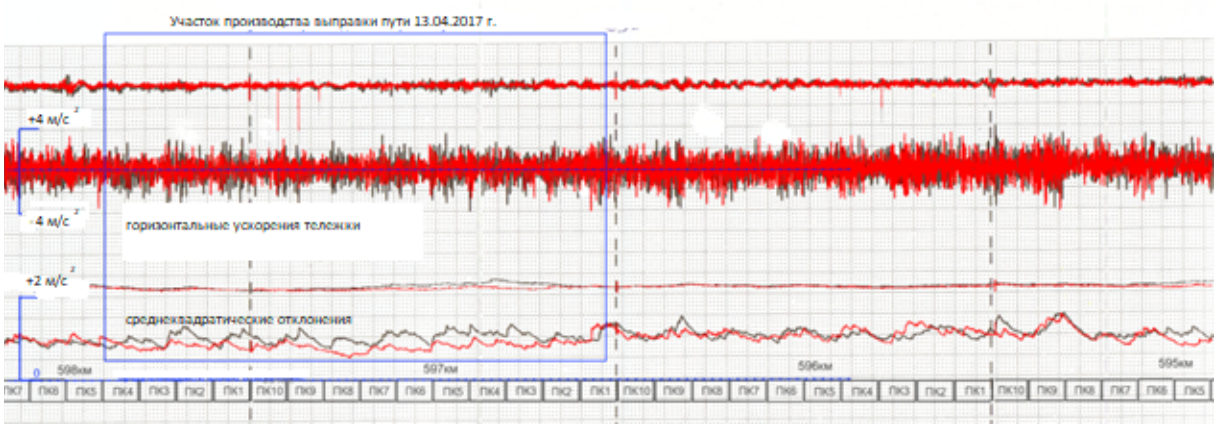


Рис. 8. Величина эквивалентной коничности колесной пары, измеренная на участке 198–200 км I главного пути линии Санкт-Петербург – Москва электропоездом «Сапсан» с установленной системой «Инфотранс-Веларо Rus»



ЭВС № 2-04 (после выправки)
ЭВС № 2-04 (до выправки)

Рис. 9. Сравнительный анализ уровней горизонтальных ускорений тележки и среднеквадратических отклонений на участке 596–598 км II главного пути до и после выправки пути



ЭВС № 2-04 (после шлифовки)
ЭВС № 2-04 (до шлифовки)

Рис. 10. Сравнительный анализ уровней горизонтальных ускорений тележки и среднеквадратических отклонений на участке18–20 км II главного пути до и после шлифовки рельсов

шлифованию поверхности катания рельсов, позволяющие устранять неровности поверхности катания и дефекты рельсов, в комплексе с проведением выправочных работ.

Приведение эквивалентной коничности к параметрам эффективности позволит понизить интенсивность бокового износа рельсов и гребней колесных пар, что, в свою очередь, приведет к уменьшению затрат на мобильную обработку рельсов в пути и обточку колес, снизит рамные усилия в тележках подвижного состава и величину касательных напряжений, которые являются причиной зарождения дефектов контактно-усталостного характера [10].

Вышеизложенное доказывает, что учет параметров эквивалентной коничности колес-

ных пар на железных дорогах России жизненно необходим. Требуется, как можно скорее актуализировать нормативные документы, регламентирующие параметры взаимодействия пути и подвижного состава с внесением параметра «эквивалентная коничность» в перечень контролируемых.

Библиографический список

1. International Union of Railways (UIC). UIC CODE 518 : Testing and approval of railway vehicles from the point of view of their dynamic behavior – Safety – Track fatigue – Ride quality. – 2nd ed. – Paris : UIC, 2003. – April.

2. International Union of Railways (UIC). UIC CODE 515 : Passenger rolling stock – Trailer bogies – Running gear. – 2nd ed. – Paris : UIC, 2001. – April.

3. Максимов И. Н. Разработка профиля колес для скоростных поездов и прогнозирование его эволюции в процессе взаимодействия подвижного состава и пути : дис. … канд. техн. наук, специальность: 05.22.07 / И. Н. Максимов. – М. : ВНИИЖТ, 2014. – 119 с.

4. Нирконэн В. Т. О влиянии конусности колесных пар на динамику движения подвижного состава / В. Т. Нирконэн // Вагоны и вагонное хозяйство. – 2015. – № 2. – С. 29–31.

5. Киселев А. А. Эквивалентная конусность и ее влияние на движение подвижного состава / А. А. Киселев, Л. С. Блажко, А. В. Романов // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. – СПб. : ПГУПС, 2017. – Т. 14, вып. 2. – С. 247–255.

6. International Union of Railways (UIC). UIC CODE 519: Method for determining the equivalent conicity. – 1st ed. – Paris: UIC, 2004. – December.

7. ГОСТ Р 51685–2013. Рельсы железнодорожные. Общие технические условия. – М. : Изд-во ВНИИЖТ, 2014. – 95 с.

8. DIN EN 13674-1–2011. Railway applications – Track – Rail – Pt 1. Vignole railway rails 46 kg/m and above. – German version EN 13674–1:2011. – Wien, 2011. – February.

9. Хартлебен Д. Обработка рельсов в пути по новой технологии / Д. Хартлебен // Путь и путевое хозяйство. – 2016. – № 6. – С. 37–40.

10. Лысюк В. С. Повреждения рельсов и их диагностика / В. С. Лысюк, В. М. Бугаенко. – М. : ИКЦ «Академкнига», 2006. – 638 с.

Дата поступления: 20.03.2019
Решение о публикации: 08.04.2019

Контактная информация:
КИСЕЛЕВ Артем Александрович – аспирант, zhdp10@gmail.com
БЛАЖКО Людмила Сергеевна – доктор техн. наук, профессор, blazhko@pgups.ru
ГАПОНЕНКО Александр Сергеевич – канд. техн. наук, доцент, gaponenkoalexandr@mail.ru
РОМАНОВ Андрей Валерьевич – канд. техн. наук, доцент, andrey.romanov@mail.com

Geometrical effects of the track on the size of the equivalent conicity of the set of wheels

A. A. Kiselev, L. S. Blazhko, A. S. Gaponenko, A. V. Romanov

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

For citation: Kiselev A. A., Blazhko L. S., Gaponenko A. S., Romanov A. V. Geometrical effects of the track on the size of the equivalent conicity of the set of wheels. *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2019, vol. 16, iss. 2, pp. 202–211. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2019-2-202-211

Summary

Objective: To determine the dependence of equivalent conical shape of the set of wheels on geometrical parameters of the track (wheel gauge, canting of the running surface of rails, transverse rail profile

shape). To assess the influence of the size of equivalent conical shape for the set of wheels on the level of horizontal acceleration of the bogie frame of the high-speed rolling stock. **Methods:** The methods of computer and mathematical simulation as well as the methods of statistical theory were applied when processing the empirical data. **Results:** The dependence of equivalent conical shape of the set of wheels on geometrical parameters of the rail track was obtained. Appearance causes of the increased level of horizontal acceleration of the bogie frame of the high-speed rol-ling stock were detected. **Practical importance:** According to the research results the necessity of taking into account the equivalent conical shape for the high-speed running on Russian railroads was shown. The methods of bringing the parameters of equivalent conical shape to effectiveness parame-ters were given.

Keywords: Equivalent conical shape, wheel gauge, canting of the running surface of rails, rail profile, horizontal acceleration of the bogie frame.

References

1. *International Union of Railways* (*UIC*). *UIC CODE 518: Testing and approval of railway vehicles from the point of view of their dynamic behavior – Safety – Track fatigue – Ride quality.* 2nd ed. Paris, UIC Publ., 2003, April.

2. *International Union of Railways* (*UIC*). *UIC CODE 515: Passenger rolling stock – Trailer bogies – Running gear*. 2nd ed. Paris, UIC Publ., 2001, April.

3. Maksimov I. N. *Razrabotka profilya koles dlya skorostnykh poezdov i prognozirovaniye ego evolyutsii v protsesse vzaimodeistviya podvizhnogo sostava i puty* [*Rail profile design for high-speed trains and forecasting its evolution in the process of the rolling stock and track interaction*]. Diss. …Cand. Eng., specialty: 05.22.07. Moscow, VNIIZhT Publ., 2014, 119 p. (In Russian)

4. Nirkonen V. T. O vliyanii konusnosty kolesnykh par na dinamiku dvizheniya podvizhnogo sostava [On the influence of conical shape of the set of wheels on the rolling stock dynamics]. *Vagony i vagonnoye khozyaistvo* [*Cars and car services*], 2015, no. 2, pp. 29–31. (In Russian)

5. Kiselev A. A., Blazhko L. S. & Romanov A. V. Ekvivalentnaya konusnost i yeye vliayaniya na dvizheniye podvizhnogo sostava [Equivalent conicity and its influence on the rolling stock]. *Izvestia Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [*Proceedings of Petersburg State Transport University*]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2017, vol. 14, iss. 2, pp. 247–255. (In Russian)

6. *International Union of Railways* (*UIC*). *UIC CODE 519: Method for determining the equivalent conicity.* 1st ed. Paris, UIC Publ., 2004, December.

7. *GOST R 51685–2013. Relsy zheleznodorozhniye. Obshchiye tekhnicheskiye usloviya* [*GOST R 51685–2013. Rails. General specifications*]. Moscow, VNIIZhT Publ., 2014, 95 p. (In Russian)

8. *DIN EN 13674-1–2011. Railway applications – Track – Rail – Pt 1. Vignole railway rails 46 kg/m and above*. German version EN 13674–1:2011. Wien, 2011, February.

9. Hartleben D. Obrabotka relsov v puty po novoy tekhnologii [A new technology of rail processing]. *Put i putevoye khozyaistvo* [*Track and track facilities*], 2016, no. 6, pp. 37–40. (In Russian)

10. Lysyuk V. S. & Bugaenko V. M. *Povrezhdeniya relsov i ikh diagnostika* [*Rail damage and its preliminary treatment*]. Moscow, IKTs “Akademkniga” (Pleiades Publishing Group) Publ., 2006, 638 p. (In Russian)

Received: March 20, 2019
Accepted: April 08, 2019

Author’s information:
Artem A. KISELEV – Postgraduate Student, zhdp10@gmail.com
Lyudmila S. BLAZHKO – D. Sci. in Engineering, Professor, blazhko@pgups.ru
Aleksandr S. GAPONENKO – PhD in Engineering, Associated Professor, gaponenkoalexandr@mail.ru
Andrey V. ROMANOV – PhD in Engineering, Associate Professor, andrey.romanov@mail.com

УДК 629.4.015:625.1.03

Влияние трения на контактно-усталостную долговечность образцов из рельсовой и колесной сталей

С. В. Кротов [1], **Д. П. Кононов** [2], **А. А. Соболев** [2]

[1] Ростовский государственный университет путей сообщения, Российская Федерация, 344038, Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, 2
[2] Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: *Кротов С. В., Кононов Д. П., Соболев А. А.* Влияние трения на контактно-усталостную долговечность образцов из рельсовой и колесной сталей // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2019. – Т. 16, вып. 2. – С. 212–219. DOI: 10.20295/1815-588X-2019-2-212-219

Аннотация

Цель: Моделирование натурных условий взаимодействия колеса и рельса для обеспечения безопасности движения железнодорожного транспорта. **Методы:** Проведены испытания дисковых образцов на контактно-усталостную долговечность: нагружение, скорость, геометрические и физические параметры взаимодействия. Применена методика исследования напряженно-деформированного состояния в зоне контакта колеса и рельса. **Результаты:** Приведены основные параметры взаимодействия образцов из рельсовой и колесной сталей, числа циклов до разрушения при усталостном выкрашивании стальных образцов при различном нагружении, обусловленном одновременным действием нормального давления и касательных усилий. Выполнена аппроксимация зависимости эквивалентных напряжений и предельного числа циклов нагружений аналитическим уравнением. Было установлено, что при фрикционном качении дисковых образцов в контакте реализуется касательная сила, в результате чего на площадке контакта будет располагаться не только зона скольжения, но и зона сцепления. Показано влияние касательных сил на контактно-усталостную долговечность стали. Представление о росте эквивалентных напряжений и снижении числа циклов с увеличением коэффициента трения дают их соотношения, представленные в работе. Наиболее неблагоприятными оказываются условия при качении с проскальзыванием только на задней части площадки контакта. При этом эквивалентное напряжение может возрасти в 1,59 раз, а необходимое до разрушения число циклов при этом понизится в 3 раза. **Практическая значимость:** Полученные результаты показывают значительное влияние трения на уменьшение контактно-усталостной долговечности образцов и будут полезны при прогнозировании наступления отказа колеса или рельса при их взаимодействии.

Ключевые слова: Контактно-усталостная долговечность, эквивалентное напряжение, разрушающее число циклов, коэффициент трения.

1. Введение

Известно, что микротрещины усталости зарождаются у самой поверхности контактирующих тел ввиду специфических условий напряженного состояния поверхности тела [1–4]. Для оценки опасности напряженного состояния на поверхности контакта колеса с рельсом и установления возможного появления микротрещин контактной усталости необходимо знать все составляющие напряжений [5–7]. Немаловажную роль здесь играют эксперименты при взаимодействии образцов, выполненных из рельсовой и колесной сталей,

которые осуществляются при всевозможных сочетаниях нагрузок, скорости вращения, наличия или отсутствия смазки, проскальзывания и т. п. [8, 9]. Эти исследования с достаточной степенью точности воссоздают натурные условия взаимодействия колеса и рельса, а их результаты имеют значительную ценность в обеспечении безопасности движения железнодорожного транспорта [9, 10].

2. Экспериментальные данные по контактно-усталостной долговечности образцов и их анализ

В работе [11] опубликованы результаты испытаний дисковых образцов из колесной и рельсовой сталей на контактно-усталостную долговечность. Они вычислены по формуле плоской деформации, имеющей место при контакте цилиндров, длина которых намного превышает их диаметры (теоретически – для бесконечно длинных цилиндров). Фактически же диаметр испытываемых образцов – порядка 50 мм, а длина l = 6 мм. Следовательно, напряженное состояние дисков в условиях опыта было ближе к плоскому напряженному состоянию (п.н.с.), чем к плоской деформации (п.д.). В зоне контакта возникают напряжения сжатия. Они меняются по эллиптическому закону, описанному решением Герца–Беляева [12]. На основании этого принимаем, что

$$P_0 = \frac{1}{2} P_0^{\text{п.д}} + \frac{2}{3} P_0^{\text{п.н.с}}.$$

В соответствии с принятыми допущениями эквивалентные напряжения в дисках для условий их испытания рассчитываются следующим образом:

$$\sigma_{\text{экв}} = \frac{1}{3} \sigma_{\text{экв}}^{\text{п.д}} + \frac{2}{3} \sigma_{\text{экв}}^{\text{п.н.с}}. \qquad (1)$$

Выполненный выше теоретический анализ показал, что наименьшее предельное значение $V_{\text{пр}}$, начиная с которого осуществляется проскальзывание на всей площадке контакта (т. е. полное проскальзывание), равно

$$V_{\text{пр}} = \beta\alpha f. \qquad (2)$$

Вычислим эти величины для условий опытов [11]. Полуширина полоски контакта определяется формулой $a = \dfrac{2P}{l_1 \pi P_0}$ и соответственно для трех нагрузок.

Подстановка данных в формулу (2) даст следующие предельные величины относительных скоростей проскальзывания в условиях проведения эксперимента:

P_0, кг	65	100	150
a, мм	0,161	0,224	0,275
$V_{\text{пр}}$	0,00225	0,00279	0,00341

При этих значениях $V_{\text{пр}}$ касательная сила в контакте достигает предельного по сцеплению значения $T_{\text{пр}} = fN$ и далее с ростом V остается практически постоянной [13]. При относительных скоростях скольжения больше 0,025 в результате износа от истирания с поверхности контакта снимается растрескавшийся по плоскостям сдвига металл, т. е. удаляются очаги усталостного разрушения. При достаточно большой интенсивности износа усталостное выкрашивание может вообще не наступить. Но износ – это тоже вид разрушения поверхностей, поэтому при большом проскальзывании V происходит замена одного вида разрушения другим.

Самые низкие значения N при V = 0,025 свидетельствуют [11], что при этой скорости относительного скольжения абразивный износ еще не истирал устья микротрещин, развитие которых привело бы к усталостному выкрашиванию поверхности контакта. Следовательно, в данном случае, как и в условиях фрикционного качения, решающим фактором, влияющим на развитие трещин усталости, следует признать величину эквивалентного напряжения $\sigma_{\text{экв}}$ и попытаться построить функциональную зависимость N от $\sigma_{\text{экв}}$.

3. Наибольшие эквивалентные напряжения в образцах

Приведенный выше анализ напряженного состояния в зоне контакта позволил устано-

вить наибольшие эквивалентные напряжения, обусловленные одновременным действием нормального давления и касательных усилий. То есть помимо нормальных напряжений сжатия σ возникают касательные напряжения [12, 14, 15]

$$\tau_{xz}^{q} = q_0\sqrt{1-\frac{x^2}{a^2}} = fP_0\sqrt{1-\frac{x^2}{a^2}} \qquad (3)$$

и дополнительные нормальные напряжения, вызываемые теми же касательными усилиями. Они связаны с деформацией обобщенным законом Гука

$$\sigma_x^q = E^{\text{п.д}},\ \varepsilon_x = -2fP_0\frac{x}{a}. \qquad (4)$$

Вследствие наличия касательных напряжений суммарные нормальные напряжения $\sigma = \sigma^P + \sigma^q$ уже не будут главными, их вычисления выполняются по формулам

$$\sigma_1^{\text{п.д}} = 2\nu\left(\pm\frac{\sigma_x^q}{2} - P_0\sqrt{1-\frac{x^2}{a^2}}\right), \qquad (5)$$

$$\sigma_{2,3} = \left(\pm\frac{\sigma_x^q}{2} - P_0\sqrt{1-\frac{x^2}{a^2}}\right) \pm \pm\sqrt{\left(\frac{\sigma_x^q}{2}\right)^2 + (\tau_{xz}^q)^2}. \qquad (6)$$

При плоском напряженном состоянии $\sigma_1 \approx 0$ (см. (5)).

При определении главного напряжения нужно иметь ввиду, что на переднем (набегающем) крае площадки контакта σ_x^q будет сжимающим для ведущего цилиндра и растягивающим для ведомого. На сбегающем крае площадки контакта знаки напряжений будут обратными. Знак «+» перед радикалом формулы (6) берется при вычислении σ_2. В следующих формулах эквивалентных напряжений первый знак у σ_x^q соответствует деформации растяжения в данной точке.

Для плоской деформации

$$\sigma_{\text{экв}}^{\text{п.д}} = (1-2\nu)\left(P_0\sqrt{1-\frac{x^2}{a^2}} \mp \frac{\sigma_x^q}{2}\right) + + \sqrt{\left(\frac{\sigma_x^q}{2}\right)^2 + (\tau_{xz}^q)^2}, \qquad (7)$$

для плоского напряженного состояния

$$\sigma_{\text{экв}}^{\text{п.н.с}} = \left(P_0\sqrt{1-\frac{x^2}{a^2}} \mp \frac{\sigma_x^q}{2}\right) + \sqrt{\left(\frac{\sigma_x^q}{2}\right)^2 + (\tau_{xz}^q)^2}. \qquad (8)$$

В дальнейшем для сокращения числа формул примем, что $\sigma_{\text{экв}}^{\text{п.н.с}}$ получается из формулы для $\sigma_{\text{экв}}^{\text{п.д}}$, полагая в ней $\nu = 0$.

В случае полного проскальзывания после подстановки в формуле (7) значений τ_{xz}^q по (3) и σ_x^q по (4) будем иметь

$$\sigma_{\text{экв}}^{\text{п.д}} = (1-2\nu)\left(P_0\sqrt{1-\frac{x^2}{a^2}} \mp f\frac{x}{a} + f\right). \qquad (9)$$

Для упрощения исследования выражения (9) на экстремум введем обозначения:

$$\frac{x}{a} = U = \cos\theta,\ \sqrt{1-\frac{x^2}{a^2}} = \sin\theta.$$

Тогда

$$\frac{\sigma^{\text{п.д}}}{P_0} = 0,4(\sin\theta \mp f\cos\theta) + f.$$

Взяв производную по θ и приравняв ее нулю, найдем максимальное значение эквивалентного напряжения при $f = 0,15$

$$\left(\frac{\sigma_{\text{экв}}^{\text{п.д}}}{P_0}\right)_{\max} = 0,4\cdot\sqrt{1+f^2} + f = 0,554 \qquad (10)$$

и

$$\left(\frac{\sigma_{\text{экв}}^{\text{п.н.с}}}{P_0}\right)_{\max} = \sqrt{1+f^2} + f = 1,161. \qquad (11)$$

В условиях эксперимента [1] более реальным будет принято соотношение (1) и тогда

$$\sigma_{\text{экв}} = 0,959P_0. \qquad (12)$$

При использовании машины МИ-2 было установлено [13], что при фрикционном качении дисковых образцов такого же размера, что и в [11], в контакте реализуется касательная сила, равная $T \approx (0{,}100–0{,}125)T_{пр}$. На этом основании было принято, что в условиях испытания образцов [11] при фрикционном качении имело место соотношение $\varphi = \frac{T}{T_{пр}} \approx 0{,}12$. В таком случае на площадке контакта будет располагаться не только зона скольжения, но и зона сцепления. В этом случае текущая координата $x = c$ определяется формулой [12]

$$c = a(1 - 2 \cdot \sqrt{1-\varphi})$$

и будет равна –0,876*a*.

При этом скорость относительного скольжения составит $V = 0{,}062V_{пр}$. Теперь находим, что $\sigma_{экв}^{п.д} = 0{,}424P_0$ и $\sigma_{экв}^{п.н.с} = 1{,}034P_0$.

Для условий испытания образцов в [11] принимаем, согласно (1), что

$$\sigma_{экв} = 0{,}831P_0.$$

Если бы качение осуществлялось за счет принудительного вращения валов обоих образцов с совершенно равными окружными скоростями, то в контакте полностью отсутствовала бы касательная сила и эквивалентное напряжение, согласно [12, 14], составило бы

$$\sigma_{экв} = 0{,}4P_0\frac{1}{3} + P_0\frac{2}{3} = 0{,}8P_0.$$

Таким образом, с некоторым приближением, были определены наибольшие эквивалентные напряжения (12) в стальных образцах, на которых в пяти сериях опытов (два – при фрикционном качении и три – при качении с $V = 0{,}025$) установлено количество циклов N до образования контактно-усталостных выкрашиваний.

Используя полученные значения P_0, вычисляем эквивалентные напряжения (8), (9), заносим их в отдельную таблицу и для удобства анализа и сравнимости под ними располагаем соответствующие этим напряжениям величины N:

№ серии опытов.....	1	2	3	4	5
$\sigma_{экв}$, кг/мм^2	73,0	78,6	96,2	90,7	111,0
$N_{пр} \cdot 10^5$.....	2,0	1,58	1,18	1,098	0,679

4. Аппроксимация зависимости эквивалентных напряжений и предельного числа циклов нагружений аналитическим уравнением

Для аппроксимации кривых контактно-усталостной долговечности обычно используют уравнение $\lg N = a - bP_0$. Попытка аппроксимации этим уравнением опытной кривой по вышеприведенным в п. 3 данным показала, что расчетная кривая $\lg N = a - b\sigma_{экв}$ более пологая, чем опытная. Следовательно, ее использование вне интервала $\sigma_{экв}$ = 73–110 кг/мм^2 приведет к большим погрешностям.

При наличии касательной силы для аппроксимации опытной кривой контактно-усталостной долговечности более точной оказалась формула

$$N^b = \frac{1}{a}(\sigma_{экв} - c)$$

или

$$\lg N = \frac{1}{b}[\lg(\sigma_{экв} - c) - \lg a].$$

Входящие сюда постоянные величины были найдены по методу средних и оказались равными: $\lg a = 5{,}468$; $a = 2{,}938 \cdot 10^5$; $b = -0{,}7548$; $c = 42{,}78$ кг/мм^2. Таким образом, окончательная формула для вычисления числа циклов до контактно-усталостного выкрашивания поверхности контакта стальных образцов и функции эквивалентных напряжений принимает вид

$$N_{пр} = \left(\frac{\sigma_{экв} - c}{a}\right)^{-1{,}325} = \frac{17{,}554 \cdot 10^6}{(\sigma_{экв} - 42{,}78)^{1{,}325}}. \quad (13)$$

Предельное число циклов, приводящее к усталостному выкрашиванию

f	При скольжении на всей площадке				При наличии зон сцепления и скольжения			
	$\sigma_{экв}$, кг/мм^2	$\frac{\sigma_0}{\sigma_f}$	$N_{пр}\cdot 10^5$	$\frac{N_0}{N_f}$	$\sigma_{экв}$, кг/мм^2	$\frac{\sigma_0}{\sigma_f}$	$N_{пр}\cdot 10^5$	$\frac{N_0}{N_f}$
0	80	1	1,455	1	80	1	1,455	1,00
0,10	90,4	1,13	1,050	1,39	95,4	1,19	0,9204	1,58
0,15	95,9	1,19	0,9099	1,60	103,3	1,29	0,7656	1,90
0,20	101,6	1,27	0,7943	1,83	111,1	1,39	0,6516	2,23
0,30	113,5	1,42	0,6223	2,34	127,2	1,59	0,4920	2,96

5. Влияние касательных усилий на контактно-усталостную долговечность стали

Воспользуемся формулой (13) для оценки влияния касательных усилий в контакте на уменьшение числа циклов N до разрушения. При получении соотношений (7) и (8) использовались формулы (10) и (11), в которых касательные усилия учитывались с помощью коэффициента трения f. Для оценки его влияния приведем значения $\sigma_{экв}/P_0$, которые могли иметь место в образцах при $f = 0{,}3$; 0,2; 0,15; 0,1 и 0:

f	0,3	0,2	0,15	0,1	0
При полном скольжении	1,135	1,016	0,959	0,904	0,8
При наличии зон сцепления и скольжения	1,272	1,111	1,033	0,954	0,8

Цифры нижней строки возможны лишь при скорости относительного скольжения $V = (0{,}525 - 0{,}574)\, f\beta a$. Приняв $P_0 = 100$ кг/мм^2 и подставив в (13) соответствующее эквивалентное напряжение, вычисляем предельное число циклов $N_{пр}$, приводящее к усталостному выкрашиванию. Результаты приведены в таблице.

6. Заключение

Представление о росте напряжений и снижении N с увеличением коэффициента трения f дают отношения $\sigma_{экв f}/\sigma_{экв 0}$ и N_0/N_f [16]. Так, при скольжении на всей площадке напряжение при $f = 0{,}3$ увеличивается в 1,42 раза, а число циклов, при которых начинается разрушение, снижается в 2,34 раза. Наиболее неблагоприятным оказываются условия при качении с проскальзыванием только на задней части площадки контакта. При этом же коэффициенте трения $f = 0{,}3$ эквивалентное напряжение может вырасти в 1,59 раз, а необходимое до разрушения число циклов при этом уменьшится примерно в 3 раза.

Библиографический список

1. Будюкин А. М. Процессы изнашивания поверхности контакта колеса и рельса / А. М. Будюкин, А. А. Воробьев, И. А. Жучков // Прогрессивные технологии, применяемые при ремонте подвижного состава РЖД : материалы науч. конференции. – СПб. : ПГУПС, 2016. – С. 13–16.

2. Орлова А. М. Определение параметров контакта колеса с рельсом для различных условий эксплуатации полувагона / А. М. Орлова, А. А. Воробьев, А. В. Саидова, Д. Е. Керенцев // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. – СПб. : ПГУПС, 2015. – Т. 12, вып. 2 (43). – С. 74–84.

3. Богданов А. Ф. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства обода цельнокатаного колеса / А. Ф. Богданов, С. И. Губенко, Д. А. Жуков, И. А. Иванов // Конструкционно-технологическое

обеспечение надежности колес рельсовых экипажей : сб. науч. трудов ; под ред. И. А. Иванова. – СПб. : ПГУПС, 2009. – С. 15–23.

4. Жуков Д. А. Параметры качества поверхностного слоя обода цельнокатаного колеса / Д. А. Жуков, И. А. Иванов // Новые материалы и технологии в машиностроении. – Брянск : БГИТА, 2016. – № 23. – С. 3–8.

5. Кононов Д. П. Повышение надежности цельнокатаных колес : монография / Д. П. Кононов. – М. : БИБЛИО-ГЛОБУС, 2018. – 250 с.

6. Воробьев А. А. Математическое моделирование параметров контакта колеса с рельсом для различных условий эксплуатации вагонов / А. А. Воробьев // Вестн. Ин-та проблем естественных монополий : Техника железных дорог. – М. : Ин-т проблем естественных монополий. – 2016. – № 1 (33). – С. 34–41.

7. Воробьев А. А. Ресурс и ремонтопригодность колесных пар подвижного состава железных дорог : монография / А. А. Воробьев, С. И. Губенко, И. А. Иванов, В. Г. Кондратенко, Д. П. Кононов, А. М. Орлова ; под ред. И. А. Иванова. – М. : ИНФРА-М, 2016. – 264 с.

8. Кротов С. В. Контактно-усталостная долговечность рельсовой и колесной сталей / С. В. Кротов, Д. П. Кононов // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. – СПб. : ПГУПС, 2018. – Т. 15, вып. 1. – С. 54–61.

9. Кротов С. В. Определение вертикальных динамических сил, действующих на колесо в контакте с рельсом / С. В. Кротов, Д. П. Кононов // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. – СПб. : ПГУПС, 2015. – Т. 12, вып. 3. – С. 70–76.

10. Урушев С. В. Управление качеством цельнокатаных колес железнодорожного подвижного состава / С. В. Урушев, И. А. Иванов, Д. П. Кононов // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. – СПб. : ПГУПС, 2004. – Вып. 2. – С. 66–71.

11. Носков М. М. Влияние проскальзывания на контактную выносливость рельсовой стали / М. М. Носков, Т. В. Ларин // Вестн. ВНИИЖТ. – М. : Трансжелдориздат, 1968. – № 2. – С. 23–25.

12. Пономарев С. Д. Расчеты на прочность в машиностроении : в 2 т. / С. Д. Пономарев, В. Л. Бидерман, К. К. Лихарев и др. – М. : Машгиз, 1958. – Т. 2. – С. 386–486.

13. Трубин Г. К. Контактная усталость материалов для зубчатых колес / Г. К. Трубин. – М. : Машгиз, 1962. – 120 с.

14. Кротов С. В. Напряженно-деформированное состояние колесной пары вагона при повышении режимов нагружения / С. В. Кротов, В. П. Кротов // Вестн. Ростов. гос. ун-та путей сообщения. – Ростов-н/Д. : РГУПС, 2002. – № 2. – С. 36–39.

15. Krotov S. V. Application of the discriminant analysis at research of bearing ability of the wheel pair of the car / S. V. Krotov, V. P. Krotov // Transport problems. – Gliwice, Poland. – 2011. – Vol. 6, N I.1. – P. 43–49.

16. Кротов С. В. Классификация параметров несущей способности прессового соединения колесной пары железнодорожного транспортного средства / С. В. Кротов, В. П. Кротов // Вестн. Ростов. гос. ун-та путей сообщения. – Ростов-н/Д. : РГУПС, 2007. – № 2 (26). – С. 22–28.

Дата поступления: 02.02.2019
Решение о публикации: 24.04.2019

Контактная информация:
КРОТОВ Сергей Викторович – канд. техн. наук, доцент, svk-19587@yandex.ru
КОНОНОВ Дмитрий Павлович – канд. техн. наук, доцент, d_kononov@mail.ru
СОБОЛЕВ Александр Альбертович – канд. техн. наук, доцент, ktehmet@mail.ru

The influence of friction on contact fatigue endurance of samples from rail and wheel steel

S. V. Krotov [1], D. P. Kononov [2], A. A. Sobolev [2]

[1] Rostov State Transport University, 2, Rostov Strelkovogo Polka Narodnogo Opolchenia sq., Rostov-on-Don, 344038, Russian Federation

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

For citation: Krotov S.V., Kononov D.P., Sobolev A.A. The influence of friction on contact fatigue endurance of samples from rail and wheel steel. *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2019, vol. 16, iss. 2, pp. 212–219. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2019-2-212-219

Summary

Objective: To conduct full-scale modeling of wheel and rail interaction conditions in order to provide safety of railway transport. **Methods:** Tests of disc samples on contact fatigue endurance were conducted: loading, speed, geometrical and physical parameters of interaction. The research technique was applied for stress-strain behavior in the zone of wheel and rail contact. Comparison of the current railway track characteristics with those which were used in the rules of the railway track strength calculation. Analysis of analytical expressions applied in the method and their correction. **Results:** The main parameters of interaction of samples from rail and wheel steel, the number of cycles before fracture during fatigue crumbling of steel at different loading due to the simultaneous action of normal pressure and tangential efforts were shown. Approximation of dependencies of the equivalent stress and the maximum number of loading cycles was carried out by means of an analytical equation. It was found that tangent force is realized in the process of frictional rolling of disk samples in contact. As a result, at the contact site there will not only be the sliding zone but also the zone of adhesion. The influence of shear forces on the contact fatigue endurance of steel was demonstrated. The concept of growth of equivalent stresses and the reduction in the number of cycles, with the increase of the friction coefficient makes it possible to obtain their ratios presented in the study. The worst conditions appear to be those when the process of rolling with slippage takes place only at the back part of the contact site. In this case the equivalent stress may increase by 1,59 times while the required number of cycles leading to fracturing process will drop by 3 times**.** **Practical importance:** The results showed significant impact of friction on the reduction of contact fatigue durability of samples and will be useful in predicting the onset of failure of the rail or wheel during their interaction.

Keywords: Contact-fatigue durability, equivalent stress, destructive cycle index, coefficient of friction.

References

1. Budyukin A.M., Vorobyev A.A. & Zhuchkov I.A. Protsessy iznashivaniya poverhnosty kontakta kolesa i relsa [Deterioration process of wheel and rail surface contact]. *Progressivnye tekhnologii, primenyaemye pri remonte podvizhnogo sostava RZHD.* Materialy nauchnoy konferentsii [*Innovative technology in maintenance of the railway equipment*]. Academic conference materials. Saint Petersburg, PGUPS [Peterburg State Transport University] Publ., 2016, pp. 13–16. (In Russian)

2. Orlova A.M., Vorobyev A.A., Saidova A.V. & Kerentsev D.E. Opredeleniye parametrov kontakta kolesa s relsom dlya razlichnykh uslovij ekspluatatsii poluvagona [Determination of parameters of wheel and rail contact for different operating conditions of an open-box car]. *Izvestia Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya* [*Proceedings of Petersburg State Transport University*]. Saint Petersburg, PGUPS [Peterburg State Transport University] Publ., 2015, vol. 12, iss. 2 (43), pp. 74–84. (In Russian)

3. Bogdanov A.F., Gubenko S.I., Zhukov D.A. & Ivanov I.A. Poverkhnostniy sloy i ekspluatatsionnye svoistva oboda tselnokatanogo kolesa [Surface layer and operating ability of the solid-rolled wheel tread]. *Konstruktsionno-tekhnologicheskoe obespecheniye nadezhnosti koles relsovykh ekipazhej.* Sb. nauch. trudov [*Structural and engineering reliability support of the wheels for rail vehicles.* Coll. of research papers]. Saint Petersburg, PGUPS [Peterburg State Transport University] Publ., 2009, pp. 15–23. (In Russian)

4. Zhukov D.A. & Ivanov I.A. Parametry kachestva poverhnostnogo sloya oboda tselnokatanogo kolesa [Surface layer quality parameters of the solid-rolled wheel tread]. *Novye materialy i tekhnologii v mashinostroenii* [*Advanced materials and technology in mechanic engineering*]. Bryansk, BGITA Publ., 2016, no. 23, pp. 3–8. (In Russian)

5. Kononov D.P. *Povyshenie nadyozhnosti tselnokatanykh koles* [*Reliability improvement of solid-rolled wheels*]. Moscow, BIBLIO-GLOBUS Publ., 2018, 250 p. (In Russian)

6. Vorobyev A.A. Matematicheskoe modelirovaniye parametrov kontakta kolesa s relsom dlya razlichnykh uslovij ekspluatatsii vagonov [Mathematical simulation of parameters of wheel and rail contact for different operating conditions of cars]. *Vestnik Instituta problem yestestvennykh monopoliy. Tekhnika zheleznykh dorog* [*Institute of Natural Monopolies Bull. Railroad engineering*]. Moscow, Institute of Natural Monopolies Publ., 2016, no. 1 (33), pp. 34–41. (In Russian)

7. Vorobyev A.A., Gubenko S.I., Ivanov I.A., Kondratenko V.G., Kononov D.P. & Orlova A.M. *Resurs i remontoprigodnost kolesnykh par podvizhnogo sostava zheleznykh dorog* [*Operating life and serviceability of the wheel pair for the railway rolling stock*]. Moscow, INFRA-M Publ., 2016, 264 p. (In Russian)

8. Krotov S.V. & Kononov D.P. Kontaktno-ustalostnaya dolgovechnost relsovoy i kolesnoy staley [Contact fatigue endurance of the rail and wheel steel]. *Izvestia Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya* [*Proceedings of Petersburg State Transport University*]. Saint Petersburg, PGUPS [Peterburg State Transport University] Publ., 2018, vol. 15, iss. 1, pp. 54–61. (In Russian)

9. Krotov S.V. & Kononov D.P. Opredeleniye vertikalnykh dinamicheskikh sil, dejstvuyushchikh na koleso v kontakte s relsom [Determination of vertical dynamic force, acting on the wheel in contact with the rail]. *Izvestia Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [*Proceedings of Petersburg State Transport University*]. Saint Petersburg, PGUPS [Peterburg State Transport University] Publ., 2015, vol. 12, iss. 3, pp. 70–76. (In Russian)

10. Urushev S.V., Ivanov I.A. & Kononov D.P. Upravleniye kachestvom tselnokatanykh koles zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava [Quality control of the solid-rolled wheels for the railway rolling stock]. *Izvestia Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya* [*Proceedings of Petersburg State Transport University*]. Saint Petersburg, PGUPS [Peterburg State Transport University] Publ., 2004, iss. 2, pp. 66–71. (In Russian)

11. Noskov M.M. & Larin T.V. Vliyaniye proskalzyvaniya na kontaktnuyu vynoslivost relsovoy staly [The influence of sliding on the surface endurance of the rail steel]. *Vestnik VNIIZHT* [*VNIIZHT Proceedings*]. Moscow, Transzheldorizdat Publ., 1968, no. 2, pp. 23–25. (In Russian)

12. Ponomarev S.D., Biderman V.L., Likharev K.K. et al. *Raschety na prochnost v mashinostroenii.* V 2 ch. [*Stress calculation in mechanical engineering.* In 2 vol.]. Moscow, Mashgiz Publ., 1958, vol. 2, pp. 386–486. (In Russian)

13. Trubin G.K. *Kontaktnaya ustalost materialov dlya zubchatykh koles* [*Contact fatigue of materials for cog wheels*]. Moscow, Mashgiz Publ., 1962, 120 p. (In Russian)

14. Krotov S.V. & Krotov V.P. Napryazhenno-deformirovannoye sostoyanie kolesnoy pary vagona pri povyshenii rezhimov nagruzheniya [Stress-strain behavior of the wheel pair of a car during the increase of load modes]. *Vestnik Rostovskogo gos. universiteta putej soobshcheniya* [*Proceedings of Rostov State Transport University*]. Rostov-on-Don, RGUPS [Rostov State Transport University] Publ., 2002, no. 2, pp. 36–39. (In Russian)

15. Krotov S.V. & Krotov V.P. Application of the discriminant analysis at research of bearing ability of the wheel pair of the car. *Transport problems*. Gliwice, Poland, 2011, vol. 6, no. I.1, pp. 43–49.

16. Krotov S.V. & Krotov V.P. Klassifikatsiya parametrov nesushchey sposobnosty pressovogo soyedineniya kolesnoy pary zheleznodorozhnogo transportnogo sredstva [Classification of carrying capacity parameters of the wheel pair press joint of the railroad vehicle]. *Vestnik Rostovskogo gos. universiteta putej soobshcheniya* [*Proceedings of Rostov State Transport University*]. Rostov-on-Don, RGUPS [Rostov State Transport University] Publ., 2007, no. 2 (26), pp. 22–28. (In Russian)

Received: February 02, 2019
Accepted: April 24, 2019

Author's information:
Sergey V. KROTOV– PhD in Engineering, Associate Professor, svk-19587@yandex.ru
Dmitriy P. KONONOV – PhD in Engineering, Associate Professor, d_kononov@mail.ru
Aleksandr A. SOBOLEV – PhD in Engineering, Associate Professor, ktehmet@mail.ru

УДК 656.21

Аналитическое и экспериментальное исследование структурной организации теплоизоляционно-конструктивных строительных материалов для железнодорожных зданий и сооружений

А. И. Адылходжаев, С. С. Шаумаров, Н. Р. Мухаммадиев

Ташкентский институт инженеров железнодорожного транспорта, Республика Узбекистан, 1001, Ташкент, ул. Адылходжаев, 1

Для цитирования: *Адылходжаев А. И., Шаумаров С. С., Мухаммадиев Н. Р.* Аналитическое и экспериментальное исследование структурной организации теплоизоляционно-конструктивных строительных материалов для железнодорожных зданий и сооружений // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2019. – Т. 16, вып. 2. – С. 220–229. DOI: 10.20295/1815-588X-2019-2-220-229

Аннотация

Цель: Разработать фотооптический метод изучения структуры ячеистых бетонов на основе использования современного подхода. **Методы:** Применены аналитические и экспериментальные методы. **Результаты:** Приведены результаты исследований по определению пористости ячеистого бетона с различными объемной массой и прочностью методом «анализа изображений». Точность метода сопоставима с точностью классических методов, в частности диагноза величины пористости ячеистых бетонов, а по своей практической реализации на порядок проще последних. **Практическая значимость:** Полученная зависимость позволяет дать оценку пористости и прочности образцов от фрактальной размерности структуры ячеистого бетона.

Ключевые слова: Железнодорожные здания и сооружения, фрактальная размерность, структура, пористость, прочность, теплопроводность.

К основным направлениям инновационных и энергосберегающих технологий в строительной индустрии относится улучшение требований к теплозащитным свойствам ограждающих конструкций железнодорожных зданий и сооружений, которые могут быть реализованы путем применения разработок и эффективных конструкционно-теплоизоляционных материалов с заданными показателями свойств.

Проектирование наружных ограждающих конструкций для энергоэффективных железнодорожных зданий и сооружений, возводимых на территории Республики Узбекистан из эффективных конструкционно-теплоизоляционных материалов, а также исследование их структурной организации являются актуальными задачами.

Наибольший эффект может быть получен при использовании неоднородных материалов, состоящих из остова-скелета и полостей или пор, заполненных воздухом.

Создание новых конструкционно-теплоизоляционных материалов в основном происходит при помощи эмпирических методов. Учитывая множество факторов, влияющих на особенности структурообразования материалов, опираясь только на экспериментально полученные результаты, отметим, что появление новых эффективных конструкционно-теплоизоляционных материалов – длительный и весьма дорогостоящий процесс. Поэтому развитие и разработка надежных методов математического моделирования для оценки процессов, протекающих в данных материалах и

изделиях, с целью улучшения конструктивных и теплоизоляционных свойств проектируемых материалов является актуальной задачей.

Поиском оптимальной структуры теплоизоляционных материалов занимались А. П. Меркин, Ю. П. Горлов, А. А. Брюшков [1, 2]. Вопросы комплексных исследований структуры материалов рассмотрены в фундаментальных и основополагающих работах В. А. Пинскера [3], а также А. Н. Хархардина [4], в которых основной упор был направлен на изучение механизма формирования диаметра ячеистых пор и образования межпоровых перегородок.

Теоретическое обоснование связи между макроструктурой ячеистых бетонов и их прочностью были изучены Н. И. Логиновым и А. П. Филиным [5, 6]. Исследователи на основании математических моделей, характеризующих наполняемость единицы объема шарообразными телами, вывели достаточно строгие закономерности, описывающие «идеальную» структуру ячеистого бетона.

Анализ материалов исследований [7–18] показал, что для формирования необходимых прочностных и теплотехнических характеристик ячеистого бетона необходима реализация многофункциональной задачи путем варьирования большого количества переменных факторов.

Постановка задачи

Основные свойства конструкционно-теплоизоляционных материалов ячеистого строения – это средняя плотность, прочность, теплопроводность, водопоглощение, морозостойкость, термическая стойкость. Как известно, их значения тесно связаны не только с величиной средней пористости данного образца, но в большей степени с распределением пор по размерам, их формой, особенностями структуры в затвердевшем состоянии. Для характеристики структуры ячеистых материалов также применяются такие понятия как кажущаяся (открытая) и истинная пористости.

Если под истинной пористостью ($P_и$) материала понимается степень заполнения его объема порами, то кажущаяся пористость – это отношение объема, занятого в материале порами, сообщающимися между собой и с атмосферой, к объему образца. Тогда сумма открытых и закрытых пор дает значение истинной пористости данного материала (в %)

$$P_и = \left(1 - \frac{\rho_{ср}}{\rho}\right) \cdot 100,$$

где $\rho_{ср}$ – средняя плотность материала; ρ – истинная плотность материала (без учета пор и пустот).

Экспериментальные исследования по определению параметров структуры ячеистых бетонов

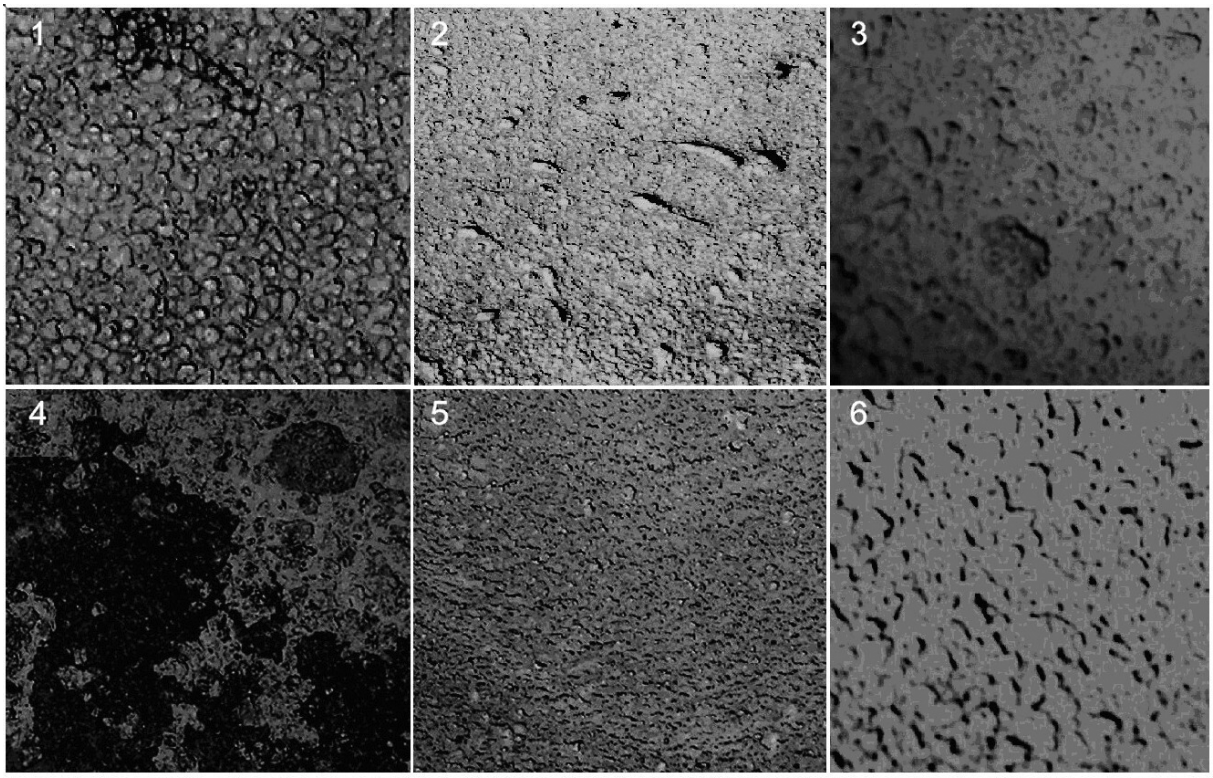
Параметры структуры (пористости) ячеистых бетонов были определены на основе анализа изображений шести образцов ячеистого бетона с известными характеристиками его структуры. Была проведена диагностика параметров структуры тестовых образцов классическими методами, согласно [19]. Для определения кажущейся пористости в тестовых образцах из существующих методов были использованы метод насыщения пор образца водой при кипячении и фотоэлектронный, разработанный в Московском инженерно-строительном институте (МИСИ) [19].

Кажущаяся пористость (в %) для первого метода вычислялась по формуле

$$P_к = \left[\frac{m_2 - m_1}{m_2 - m_3}\right] \cdot 100,$$

где m_1 – масса образца до насыщения водой; m_2 – масса образца после насыщения водой при взвешивании на воздухе; m_3 – масса образца после насыщения при гидростатическом взвешивании.

а



б

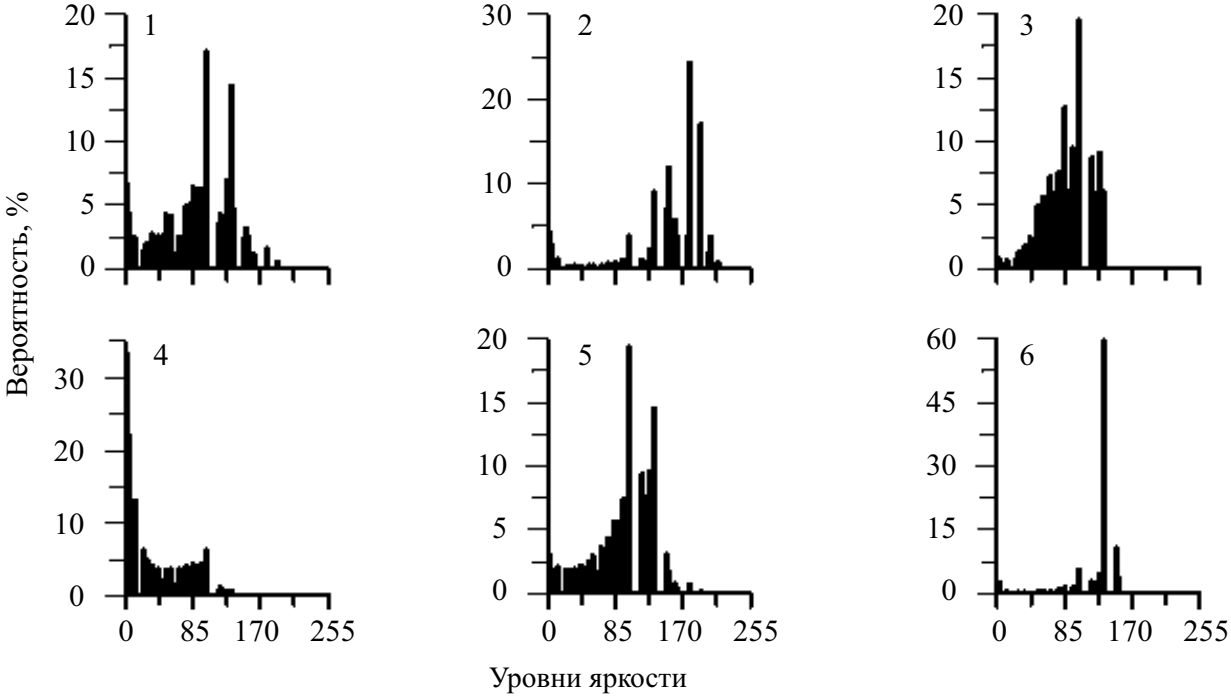


Рис. 1. Тестовые образцы ячеистого бетона (1–6) с различными объемной массой W, прочностью $R_{яб}$ и пористостью P (табл. 1) (*а*) и их гистограммы изображения (*б*)

ТАБЛИЦА 1. Характеристики структуры тестовых образцов ячеистого бетона, полученные различными методами

№ образца	По данным изготовителя			По методике МИСИ	Методом анализа изображений
	W, кг/м^3	$R_{яб}$, МПа	P, %	P, %	P, %
1	420	2,00	80,0	79,7	81,5
2	500	2,31	77,8	77,2	78,4
3	544	3,53	75,8	75,9	76,6
4	835	7,30	65,9	66,1	67,1
5	840	7,38	65,3	65,2	66,2
6	912	8,86	62,8	62,6	63,7

Характеристики пористости образцов ячеистого бетона определяли с помощью фотоэлектронной установки в соответствии с методикой МИСИ [19].

Поверхность образца контактным способом окрашивалась белой матовой эмалью. Далее поверхность покрывалась тонкодисперсной сажей, заполняющей все поверхностные неровности (поры шлифа). Затем сажа смывалась водой. В результате все внутренние поверхности пор оказываются окрашенными в черный цвет, а поверхности стенок пор – в белый.

На рис. 1 приведены изображения тестовых образцов и гистограммы распределения их структуры по уровням яркости. Эти гистограммы достаточно информативны для описания механизма организации в формирующейся структуре в различных типах ячеистых бетонов, что отчетливо видно на представленном рисунке.

В табл. 1 даны характеристики образцов различных типов ячеистого бетона (рис. 1), используемые как тестовые для оценки погрешности диагноза структуры методом анализа их изображения, а в табл. 2 – собственно количественные оценки точности определения пористости ячеистых бетонов на основе разработанного фотооптического метода анализа изображений.

Оценка точности определения пористости ячеистого бетона методом анализа изображений

В качестве оценок точности метода приняты:

– разность Δ_i между величиной «истинной» пористости $P_i^{ис}$, за которую принята оценка изготовителя, и пористостью P_i', полученной по методу МИСИ и методом анализа изображений:

$$\Delta_i = P_i^{ис} - P' ,$$

$i = 1, 2, ..., 6$ – номера образцов;

– средняя арифметическая ошибка

$$\overline{\Delta} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\Delta_i ;$$

– абсолютная максимальная ошибка

$$\left|\Delta_{max}\right| = \max\left|\{\Delta_i\}\right|;$$

– средняя квадратичная ошибка

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(P_i^{ис} - P_i')^2} .$$

Приведенные в табл. 2 оценки показывают, что выполненные контрольные замеры пори-

ТАБЛИЦА 2. Оценка точности определения пористости ячеистого бетона методом анализа изображений

№ образца	По методике МИСИ				Методом анализа изображений			
	Δ	$\lvert\Delta_{max}\rvert$	$\bar{\Delta}$	σ	Δ	$\lvert\Delta_{max}\rvert$	$\bar{\Delta}$	σ
1	0,150	0,45	0	0,288	–1,513	1,513	–0,971	0,312
2	0,450				–0,599			
3	–0,250				–0,799			
4	–0,349				–1,103			
5	–0,051				–0,905			
6	0,049				–0,912			

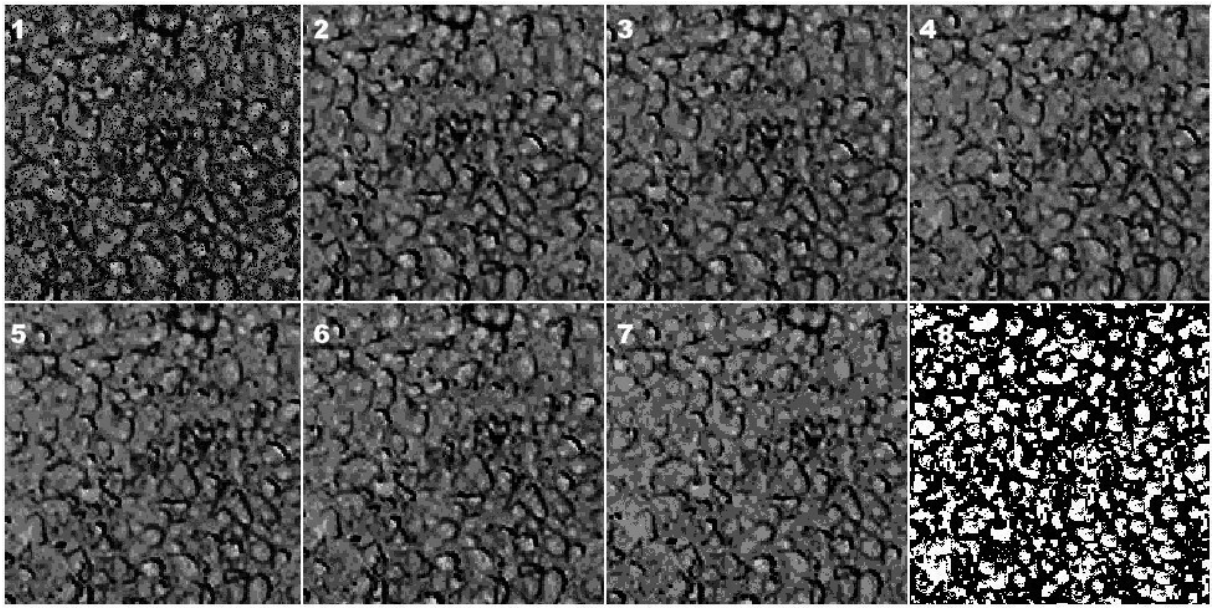


Рис. 2. Результаты процедуры квантования исходного изображения образца № 1 (см. рис. 1) ячеистого бетона: 1–8 – уровни квантования

стости образцов ячеистого бетона совпадают с данными изготовителя на уровне случайной ошибки со среднеквадратичной ошибкой, равной 0,288. Это вполне приемлемый результат, укладывающийся в данные соответствующего ГОСТа [20]. Поэтому такое значение можно принять за величину точности измерений.

Оценки точности определения пористости ячеистого бетона с различными объемной массой и прочностью методом анализа изображений показали прежде всего наличие систематической ошибки метода – средняя арифметическая ошибка отлична от нуля, что указывает на систематическое смещение вычисленной величины пористости в алгоритме обработки изображений ячеистого бетона. При этом среднеквадратичная ошибка метода анализа изображений выше, чем точности измерений, хотя по величине не сильно от нее отличается. Исключение систематической ошибки при наличии репрезентативной выборки данных о пористости ячеистого бетона не представляет никаких трудностей и является тривиальной процедурой, хотя последняя не изменяет среднеквадратичную ошибку. Поэтому объективным показателем точности метода служит среднеквадратичная ошибка, оценка которой

ТАБЛИЦА 3. Результаты расчета фрактальной размерности *D* тестовых образцов ячеистого бетона с различной величиной пористости

№ образца	*W*, кг/м³	$R_{яб}$, МПа	*P*, %	*D*
1	420	2,00	80,0	1,541
2	500	2,31	77,8	1,620
3	544	3,53	75,8	1,627
4	835	7,30	65,9	1,684
5	840	7,38	65,3	1,685
6	912	8,86	62,8	1,691

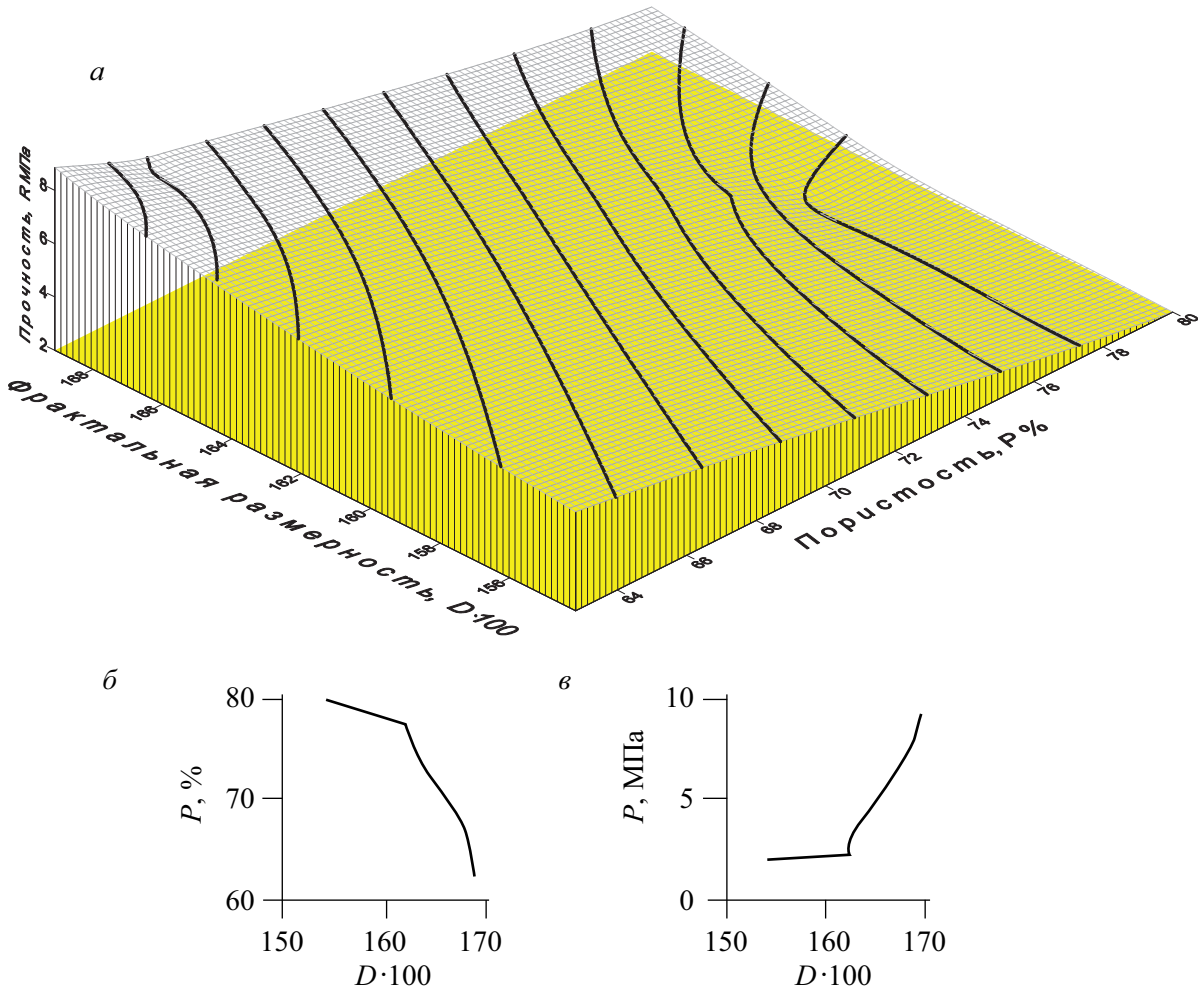


Рис. 3. Поверхность прочности ячеистого бетона (*а*) как функция фрактальной размерности и пористости, зависимость пористости (*б*) и прочности (*в*) тестовых образцов от фрактальной размерности структуры ячеистого бетона

вполне приемлема с точки зрения точности метода. Следовательно, разработанный метод определения пористости ячеистых бетонов на основе анализа их изображения представляется, с одной стороны, вполне объективным и, с другой стороны, несоизмеримо проще при практической реализации.

Причина систематической ошибки метода, по-видимому, связана с разрешением уровней квантования исходного изображения и дальнейшего распознавания границ матрица (материал) – поры. Дальнейшие эксперименты с уровнями квантования исходного изображения не проводились, так как полученная среднеквадратичная ошибка ($\sigma = 0{,}312$) при 8 уровнях квантования приемлема в практической работе. Для более наглядного представления о сказанном на рис. 2 приведены изображения 8 уровней квантования тестового образца № 1 ($W = 420$ кг/м^3, $P = 80\,\%$).

Помимо количественных оценок точности метода определения пористости ячеистого бетона, были рассчитаны в соответствии с разработанным методом фрактальные размерности тестовых образцов (табл. 3).

Сравнение полученных результатов фрактальной размерности структуры реальных образцов ячеистого бетона с таковой для смоделированной «случайным» образом пористости показывает на их близость. Таким образом, полученная модельным путем фрактальная размерность ячеистого бетона с различной величиной пористости, действительно, отвечает фрактальной размерности реальных образцов с близкой по величине пористости и еще раз доказывает фрактальность структуры ячеистого бетона.

Кроме того, на рис. 3, *а* приведена поверхность прочности ячеистого бетона как функция фрактальной размерности и пористости. Этот рисунок со всей очевидностью указывает на тот факт, что фрактальная размерность структуры ячеистого бетона является информативной характеристикой физических свойств последнего, описывающей все главнейшие параметры: пористость, прочность и теплопроводность.

Заключение

Характер изменения фрактальной размерности, связанной со структурой ячеистого бетона, имеет вид экстремальной кривой – одна возрастающая ветвь, другая – ниспадающая ветвь, т. е. экстремальные величины фрактальной размерности размещаются на одной линии со значениями других параметров. Фрактальная размерность, несомненно, является, кроме рассмотренных в статье параметров, так же и характеристикой теплопроводности ячеистого бетона.

Таким образом, разработан фотооптический метод исследования структуры ячеистых бетонов на основе использования современного подхода с позиций информационных технологий. Точность метода сопоставима с точностью классических методов, в частности диагноза пористости ячеистых бетонов, а по своей практической реализации на порядок проще последних.

Библиографический список

1. Брюшков А. А. Газо- и пенобетоны / А. А. Брюшков. – М. : ОНТИ, 1930. – 180 с.

2. Меркин А. П. Технология теплоизоляционных материалов / А. П. Меркин, Ю. П. Горлов, А. А. Устенко. – М. : Стройиздат, 1980. – 399 с.

3. Пинскер В. А. Некоторые вопросы физики ячеистого бетона / В. А. Пинскер // Жилые дома из ячеистого бетона. – Л. : Стройиздат, 1963. – С. 123–145.

4. Хархардин А. Н. Теория прочности и структуры твердых пористых тел / А. Н. Хархардин // Вестн. БГТУ им. В. Г. Шухова. – Тем. вып. «Пенобетон». – Белгород : БГТУ им. В. Г. Шухова, 2003. – № 4. – С. 42–53.

5. Левин Н. И. Основные механические и упругие свойства ячеистых бетонов / Н. И. Левин // Исследования по каменным конструкциям. – М. : ЦНИИСК, 1957. – С. 12–26.

6. Меркин А. П. Формирование макроструктуры ячеистых бетонов / А. П. Меркин, А. П. Филин, Д. Г. Земцов // Строительные материалы. – 1963. – № 12. – С. 9–21.

7. Адилходжаев А. И. Теоретические аспекты структурно-имитационного моделирования макроструктуры композиционных строительных материалов / А. И. Адилходжаев, И. М. Махаматалиев, С. С. Шаумаров // Науч.-технич. вестн. Брянск. гос. ун-та. – 2018. – № 3. – С. 312–320.

8. Шаумаров С. С. Моделирование процесса формирования температурного поля наружного ограждения зданий на железнодорожном транспорте / С. С. Шаумаров // Науч.-технич. вестн. Брянск. гос. ун-та. – 2018. – № 3. – С. 338–346.

9. Adylkhodzhayev A. I. About nature of interphase interactions of basalt aggregate and polycarboxylate super plasticizer with cement in multi-component concrete / A. I. Adylkhodzhayev, I. M. Mahamataliev, V. M. Tsoy // "IBAUSIL" – "19 Internationale Baustofftaguung". – Weimar, Bundesrepablik Deutschland, 2015. – P. 1211–1219.

10. Адилходжаев А. И. Вопросы управления качеством при проектировании составов многокомпонентных высококачественных бетонов с минеральными наполнителями / А. И. Адилходжаев, И. М. Махаматалиев, В. М. Цой // Вестн. ТашГТУ. – 2016. – № 1. – С. 252–260.

11. Адилходжаев А. И. К исследованию вопроса повышения энергоэффективности зданий на железнодорожном транспорте / А. И. Адилходжаев, С. С. Шаумаров // Современные проблемы транспортного комплекса России. – 2018. – Т. 8, № 1. – С. 4–11.

12. Shaumarov S. S. On the issue of increasing energetic efficiency of buildings in railway transport / S. S. Shaumarov // VIII International Conference "Transport Problems–2016". – Katowice, Poland, 2016. – P. 522–532.

13. Adylkhodzhayev A. I. The issue of thermal renovation of infrastructure of railway transport is evaluated / A. I. Adylkhodzhayev, S. S. Shaumarov // X International Scientific Conference "Transport Problems–2018". – Wisla, Katowice, Poland, 2018. – P. 13–18.

14. Bostanabad R. Computational microstructure characterization and reconstruction: Review of the state-of-the-art techniques / R. Bostanabad, Y. Zhang, X. Li, T. Kearney, C. Brinson, D. W. Apley, Wing KamLiu, W. Chen // Progress in Materials Science. – 2018. – Vol. 95. – P. 1–41.

15. Abina A. Structural characterization of thermal building insulation materials using terahertz spectroscopy and terahertz pulsed imaging / A. Abina, U. Puc, A. Jeglič, A. Zidanšek // NDT & E International. – 2016. – Vol. 77. – P. 11–18.

16. Chica L. Cellular concrete review : New trends for application in construction / L. Chica, A. Alzate // Construction and Building Materials. – 2019. – Vol. 200. – P. 637–647.

17. Zhou H. Thermal and mechanical properties of structural lightweight concrete containing lightweight aggregates and fly-ash cenospheres / H. Zhou, L. A. Brooks // Construction and Building Materials. – 2019. – Vol. 198. – P. 512–526.

18. Van De Walle W. Implementation and validation of a 3D image-based prediction model for the thermal conductivity of cellular and granular porous building blocks / W. Van De Walle, S. Claes Hans Janssen // Construction and Building Materials. – 2018. – Vol. 182. – P. 427–440.

19. Горлов Ю. П. Лабораторный практикум по технологии теплоизоляционных материалов / Ю. П. Горлов. – М. : Высшая школа, 1982. – 236 с.

20. ГОСТ 31359–2007. Бетоны ячеистые автоклавного твердения. Технические условия. – М. : Стандартинформ, 2008. – 15 с.

Дата поступления: 06.05.2019
Решение о публикации: 23.05.2019

Контактная информация

АДЫЛХОДЖАЕВ Анвар Ишанович – доктор техн. наук, профессор, shoumarovss@gmail.com

ШАУМАРОВ Саид Санатович – канд. техн. наук, доцент, shoumarovss@gmail.com

МУХАММАДИЕВ Неъматжон Рахматович – аспирант, nemat.9108@mail.ru

Analytical and experimental study of the structural organization of heat–insulating construction materials for railway buildings and structures

A. I. Adylkhodzhayev, S. S. Shaumarov, N. R. Mukhammadiyev

Tashkent Railway Engineering Institute, 1, Adylkhodzhayev ul., Tashkent, 1001, Republic of Uzbekistan

For citation: Adylkhodzhayev A. I., Shaumarov S. S., Mukhammadiyev N. R. Analytical and experimental study of the structural organization of heat-insulating construction materials for railway buildings and structures. *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2019, vol. 16, iss. 2, pp. 220–229. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2019-2-220-229

Summary

Objective: To develop a photo-optical method of cellular concrete structure estimation using the modern approach. **Methods:** Analytical and experimental research methods were used. **Results:** The article presents the research results obtained using the "image analysis" method to determine the porosity of cellular concrete with different bulk weight and strength. The method accuracy is comparable to the accuracy of classical methods, in particular, the cellular concrete porosity diagnostics, and its practical implementation is by one order of magnitude simpler than that of the latter. **Practical importance:** The obtained relationship allows estimating the porosity and strength of samples depending on the fractal dimension of the cellular concrete structure.

Keywords: Railway buildings and structures, fractal dimension, structure, porosity, strength, thermal conductivity.

References

1. Bryushkov A. A. *Gazo- i penobetony* [*Gas and foam concrete*]. Moscow, ONTI [United Scientific and Technical Publishing House] Publ., 1930, 180 p. (In Russian)

2. Merkin A. P., Gorlov Yu. P. & Ustenko A. A. *Tekhnologiya teploizolyatsionnykh materialov* [*Heat-insulating materials technology*]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1980, 399 p. (In Russian)

3. Pinsker V. A. Nekotoryye voprosy fiziki yacheistogo betona [Some issues of the physics of cellular concrete]. *Zhilyye doma iz yacheistogo betona* [*Cellular concrete residential buildings*]. Leningrad, Stroyizdat Publ., 1963, pp. 123–145. (In Russian)

4. Kharkhardin A. N. Teoriya prochnosti i struktury tverdykh poristykh tel [Theory of strength and structure of solid porous bodies]. Vestnik BGTU imeni V. G. Shuhova, tem. vip. "Penobeton" [*Bulletin of Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov, special issue "Foam concrete"*]. Belgorod, BGTU Publ., 2003, no. 4, pp. 42–53. (In Russian)

5. Levin N. I. Osnovnyye mekhanicheskiye i uprugiye svoystva yacheistykh betonov [Basic mechanical and elastic properties of cellular concrete]. *Issledovaniya po kamennym konstruktsiyam* [*Studies of stone structures*]. Moscow, V. A. Kucherenko Central Scientific Research Institute of Building Structures Publ., 1957, pp. 12–26. (In Russian)

6. Merkin A. P., Filin A. P. & Zemtsov D. G. Formirovaniye makrostruktury yacheistykh betonov [Formation of the cellular concrete macrostructure]. *Stroitel'nyye materialy* [*Building Materials*], 1963, no. 12, pp. 9–21. (In Russian)

7. Adylkhodzhayev A. I., Mukhamataliyev I. M. & Shaumarov S. S. Teoreticheskiye aspekty strukturno-imitatsionnogo modelirovaniya makrostruktury kompozitsionnykh stroitel'nykh materialov [Theoretical aspects of structural and simulation modeling of the

macrostructure of composite building materials]. *Scientific and Technical Bulletin of Bryansk State University*, 2018, no. 3, pp. 312–320. (In Russian)

8. Shaumarov S. S. Modelirovaniye protsessa formirovaniya temperaturnogo polya naruzhnogo ograzhdeniya zdaniy na zheleznodorozhnom transporte [Simulation of the process of temperature field formation in the cladding of buildings in railway transport]. *Scientific and Technical Bulletin of Bryansk State University*, 2018, no. 3, pp. 338–346. (In Russian)

9. Adylkhodzhayev A. I., Makhamataliyev I. M. & Tsoy V. M. About nature of interphase interactions of basalt aggregate and polycarboxylate super plasticizer with cement in multi-component concrete. *"IBAUSIL" – "19 Internationale Baustofftaguung*". Weimar, Bundesrepablik Deutschland Publ., 2015, pp. 1211–1219.

10. Adylkhodzhayev A. I., Makhamataliyev I. M. & Tsoy V. M. Voprosy upravleniya kachestvom pri proyektirovanii sostavov mnogokomponentnykh vysokokachestvennykh betonov s mineral'nymi napolnitelyami [Issues of quality management in the design of compositions of multicomponent high-quality concrete with mineral fillers]. *Bulletin of Tashkent State Technical University*, 2016, no. 1, pp. 252–260. (In Russian)

11. Adylkhodzhayev A. I. & Shaumarov S. S. K issledovaniyu voprosa povysheniya energoeffektivnosti zdaniy na zheleznodorozhnom transporte [On the issue of increasing the energy efficiency of buildings in railway transport]. *Sovremennyye problemy transportnogo kompleksa Rossii* [*Modern problems of the transport complex of Russia*], 2018, vol. 8, no. 1, pp. 4–11. (In Russian)

12. Shaumarov S. S. On the issue of increasing energetic efficiency of buildings in railway transport. *VIII International Conference "Transport Problems–2016"*. Katowice, Poland, 2016, pp. 522–532.

13. Adylkhodzhayev A. I. & Shaumarov S. S. The issue of thermal renovation of infrastructure of railway transport is evaluated. *X International Scientific Conference "Transport Problems–2018"*. Wisla, Katowice, Poland, 2018, pp. 13–18.

14. Bostanabad R., Zhang Y., Li X., Kearney T., Brinson C., Apley D. W., Wing KamLiu & Chen W. Computational microstructure characterization and reconstruction: Review of the state-of-the-art techniques. *Progress in Materials Science*, 2018, vol. 95, pp. 1–41.

15. Abina A., Puc U., Jeglič A. & Zidanšek A. Structural characterization of thermal building insulation materials using terahertz spectroscopy and terahertz pulsed imaging. *NDT & E International*, 2016, vol. 77, pp. 11–18.

16. Chica L. & Alzate A. Cellular concrete review: New trends for application in construction. *Construction and Building Materials,* 2019, vol. 200, pp. 637–647.

17. Zhou H. & Brooks L. A. Thermal and mechanical properties of structural lightweight concrete containing lightweight aggregates and fly-ash cenospheres. *Construction and Building Materials*, 2019, vol. 198, pp. 512–526.

18. Van De Walle W. & Janssen Claes Hans S. Implementation and validation of a 3D image-based prediction model for the thermal conductivity of cellular and granular porous building blocks. C*onstruction and Building Materials*, 2018, vol. 182, pp. 427–440.

19. Gorlov Yu. P. *Laboratornyy praktikum po tekhnologii teploizolyatsionnykh materialov* [*Laboratory workshop on the technology of heat-insulating materials*]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1982, 236 p. (In Russian)

20. *GOST 31359–2007. Betony iacheistie avtoklavnogo tverdeniya. Tehnicheskie uslovia* [*GOST 31359–2007. Cellular autoclave curing concretes. Specifications*]. Moscow, Standartinform Publ., 2008, 15 p. (In Russian)

Received: May 06.2019
Accepted: May 23.2019

Author's information:
Anvar I. ADYLKHODZHAEV – Dr. Sci. in Engineering, Professor, shoumarovss@gmail.com
Said S. SHAUMAROV – PhD in Engineering, Associate Professor, shoumarovss@gmail.com
Nematzhon R. MUKHAMMADIYEV – Postgraduate Student, nemat.9108@mail.ru

УДК 629.4.016.15

Разработка метода ресурсных испытаний тормозной системы тележки

И. В. Назаров [1], **Е. И. Артамонов** [2], **А. Л. Ковязин** [3]

[1] Акционерное общество «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (АО «ВНИИЖТ»), Российская Федерация, 129626, Москва, 3-я Мытищинская ул., 10

[2] Общество с ограниченной ответственностью «Тихвинский испытательный центр железнодорожной техники» (ООО «ТИЦЖТ»), Российская Федерация, 187556, Ленинградская обл., Тихвин, Промплощадка, 6, стр. 1

[3] Общество с ограниченной ответственностью «Центр транспортных технологий» (ООО «ВНИЦТТ»), Российская Федерация, 199106, Санкт-Петербург, Васильевский о-в, 23-я линия, 2, лит. А

Для цитирования: *Назаров И. В., Артамонов Е. И., Ковязин А. Л.* Разработка метода ресурсных испытаний тормозной системы тележки // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2019. – Т. 16, вып. 2. – С. 230–240. DOI: 10.20295/1815-588X-2019-2-230-240

Аннотация

Цель: Проведение ресурсных испытаний в рамках комплексных испытаний тормозной системы с механической частью, полностью установленной на тележке Barber, для вагонов нового поколения. Апробация методики ресурсных испытаний на опытном образце тележки. **Методы:** Для разработки методики ресурсных испытаний тормозных систем, в том числе интегрированных в тележку, выявлены параметры, условия эксплуатации и нагруженности тормозного оборудования в составах поездов, курсирующих по реальным маршрутам. По полученным из эксплуатации данным определена нагруженность по циклам «торможение–отпуск» тормозной системы среднестатистического вагона. **Результаты:** Разработана методика ресурсных испытаний тормозной системы для вагонов нового поколения. Она апробирована на системе, интегрированной в тележку, и проведены ее комплексные испытания с оценкой работоспособности тормозной системы тележки до и после ресурсных торможений. **Практическая значимость:** Испытания проведены в рамках комплексных исследований по подтверждению ресурса и работоспособности тормозной системы, при освоении производства тележек для грузовых вагонов нового поколения. Предложенная методика ресурсных испытаний подтвердила отсутствие опасных отказов тормозной системы за установленный период. Она может быть применена к любым видам тормозных систем грузовых вагонов.

Ключевые слова: Тормозная система, ресурсные испытания, тормозные испытания, тележка Barber, грузовые вагоны.

Введение

Появление в настоящее время грузовых вагонов с повышенными осевыми нагрузками и скоростями движения [1, 2] при развитии и совершенствовании железных дорог требует улучшения характеристик основных подсистем вагонов, в том числе тормозной системы, для которой эффективность торможения и отсутствие юза при безотказной работе служат ключевыми параметрами. Поэтому при освоении производства вагонов с новыми тормозными системами необходимы их тщательный анализ, расчет и испытания.

Перед освоением производства тележки Barber с увеличенной до 27 т осевой нагрузкой была разработана уникальная тормозная система, интегрированная в конструкцию

тележки (рис. 1). Данная тормозная система имеет размещенную на тележке исполнительную часть, включающую тормозной цилиндр, авторегулятор, два триангеля с башмаками и рычаги с распоркой. Перед производством и испытаниями тормозной системы в сборе на первом этапе были проведены испытания по постановке на производство отдельных основных частей тормозной системы – тормозного цилиндра, авторегулятора, триангеля и башмака. Определялись их прочность при действии эксплуатационных нагрузок, соответствие применяемых материалов требованиям конструкторской документации, а для тормозного цилиндра и авторегулятора дополнительно – функциональная работоспособность, в том числе при действии повышенных и пониженных температур. Результаты испытаний составных частей были положительны.

После этого была поставлена задача провести испытания тормозной системы в сборе для подтверждения соответствия характеристик системы заданным требованиям и проверки ее тормозной эффективности, прочности, плотности, надежности и работоспособности во всех режимах, возможных в эксплуатации, с учетом [3–5].

Подтверждение тормозной эффективности, прочности и работоспособности производили при стационарных тормозных испытаниях. Тормозную эффективность оценивали, подавая в пневматический силовой орган сжатый воздух с давлениями, соответствующими порожнему и груженому режимам торможений, и контролируя при этом силу, реализуемую при различных толщинах колодок, с максимальными и минимальными зазорами между колодками и колесами. Дополнительно определяли стабильность работы тормозной системы и время наполнения тормозного цилиндра. Для оценки плотности тормозной системы контролировали отсутствие утечек сжатого воздуха из пневматической части тормозной системы по величине падения давления за фиксированное время. Прочность тормозной системы устанавливали подачей максимально возможного давления, которое может возникнуть в пневматической системе вагона – 0,6 МПа, – в силовой пневматический орган, контролируя при этом отсутствие разрушения. Работоспособность тормозной системы определяли, как возможность авторегулятора поддерживать зазор между колодками и колесами в заданном диапазоне.

Для проверки надежности тормозной системы было необходимо убедиться в отсутствии опасных отказов после числа торможений, соответствующих межремонтному

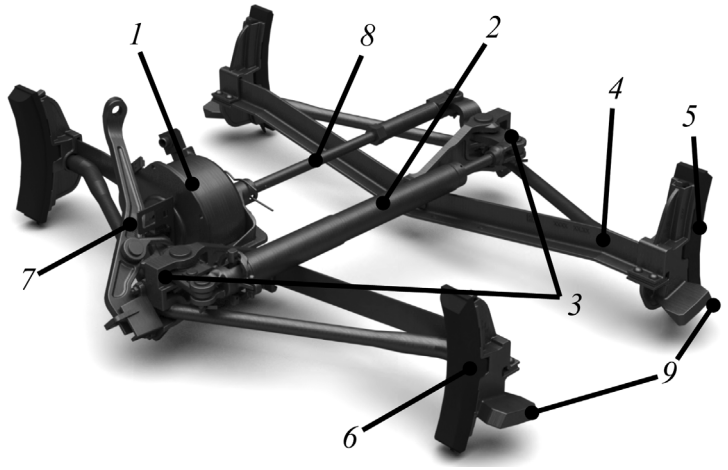


Рис. 1. Общий вид тормозной системы и ее составные части:
1 – тормозной цилиндр; *2* – авторегулятор двустороннего действия; *3* – горизонтальные рычаги; *4* – триангели; *5* – башмаки; *6* – тормозные колодки; *7* – рычаг стояночного тормоза; *8* – распорная тяга цилиндра; *9* – направляющие башмаков, при помощи которых происходит взаимодействие с боковыми рамами

периоду, а также подтвердить характеристики и параметры, оцененные при стационарных испытаниях до их проведения и по оценке ресурса. Критерием, подтверждающим надежность системы в течение всего межремонтного интервала, является соответствие тормозной эффективности, плотности, прочности и работоспособности тормозной системы после осуществления торможений за межремонтный интервал требованиям, заданным техническим заданием.

В соответствии с техническим заданием на разработку тормозной системы ее межремонтный период составляет 10 лет, а назначенный срок службы – 20 лет [6]. Поэтому для проведения испытаний на надежность и подтверждения межремонтного интервала по числу циклов «торможение–отпуск» необходимо сначала оценить нагруженность тормозного оборудования реально эксплуатируемых вагонов.

Определение нагруженности тормозного оборудования в эксплуатации

Для установления уровня нагруженности и условий эксплуатации тормозного оборудования была поставлена задача по выявлению параметров среднестатистической поездки грузового вагона в составах поездов.

В процессе работы для получения достоверных сведений были собраны и проанализированы данные с 169 поездов, двигающихся по дорогам, имеющим как равнинные, так и горные участки, с различными грузонапряженностью и скоростью движения, с локомотивами, использующими электрическое торможение и без него. Суммарная наработка по пробегу для таких поездов составила более 25 000 км, при этом исследовано было 1436 торможений [7].

Эксплуатационную нагруженность тормозов подвижного состава на конкретных типичных участках пути оценивали следующими спектрами распределений параметров, характеризующих отдельное торможение:

– снижение магистрального давления сжатого воздуха Δp;

– начальная скорость торможения V_0;

– коэффициент снижения скорости при торможении χ, представляющий собой отношение скорости поезда в конце торможения $V_к$ к начальной скорости V_0;

– длительность торможения $t_т$;

– длительность пауз между торможениями $t_п$ (учитывается только при наличии последовательных торможений, промежуток времени между которыми не превышал 15 мин);

– число торможений в тормозном цикле n.

На основании анализа спектров распределения параметров нагруженности тормозного оборудования в эксплуатации было установлено, что выделенные классификационные признаки – характеристики исследуемых участков, наличие или отсутствие электрического торможения локомотива – не оказывают существенного влияния на вид распределения. Основными влияющими факторами были выбраны скорость начала торможения, величина снижения магистрального давления воздуха, длительность пауз между торможениями и коэффициент уменьшения скорости. Исходя из этого, были построены обобщенные спектры (частости w) без учета весовых характеристик данных классификационных признаков (рис. 2–6).

Оценка и анализ построенных зависимостей по результатам исследования позволили прийти к следующим выводам о нагруженности тормозного оборудования в эксплуатации:

– основная доля торможений в эксплуатации приходится на вторую и третью ступени торможения с начальной скоростью от 0–10 либо 50–60 км/ч;

– распределение ступеней торможения при отсутствии электрического торможения локомотива характеризуется несколько увеличенной долей первой ступени и снижением доли третьей;

– торможение на сложном переломном профиле при включении воздухораспредели-

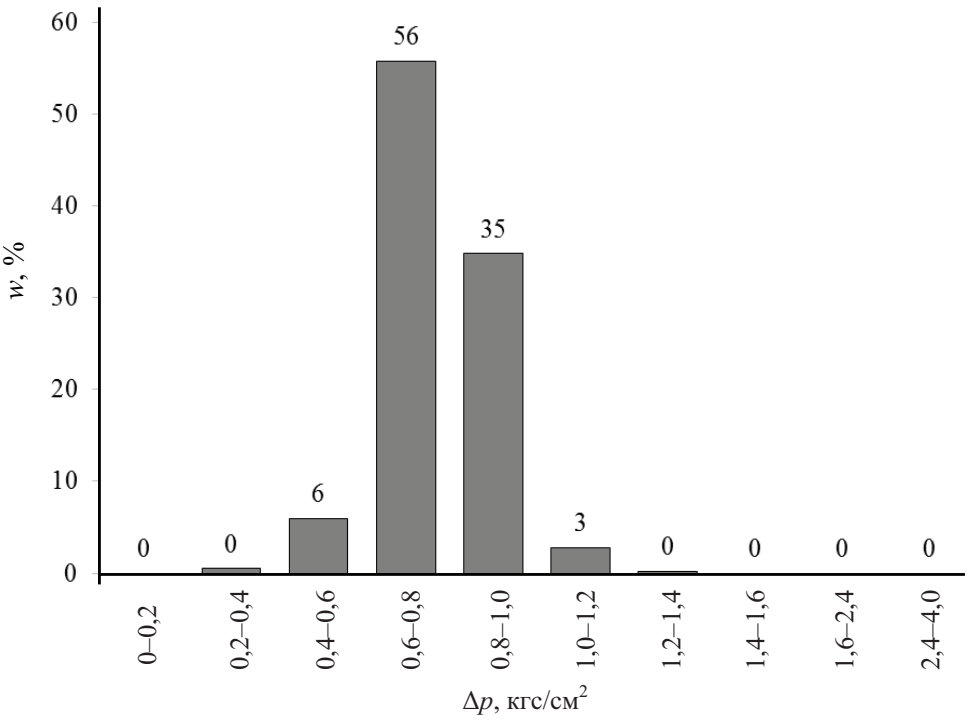


Рис. 2. Гистограмма распределения величины снижения магистрального давления

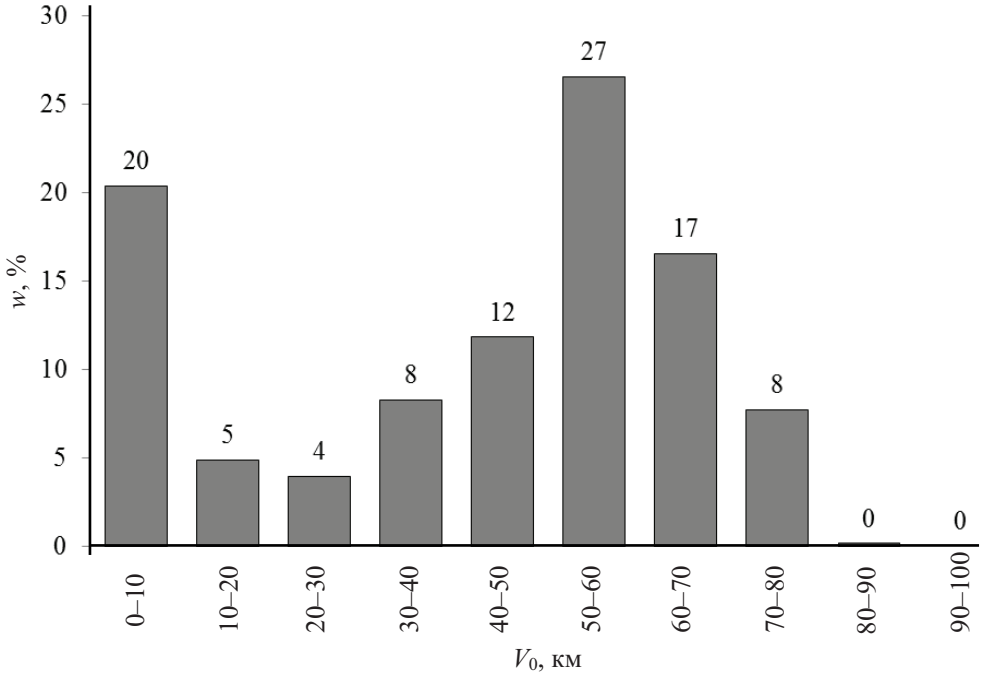


Рис. 3. Гистограмма распределения скорости начала торможения

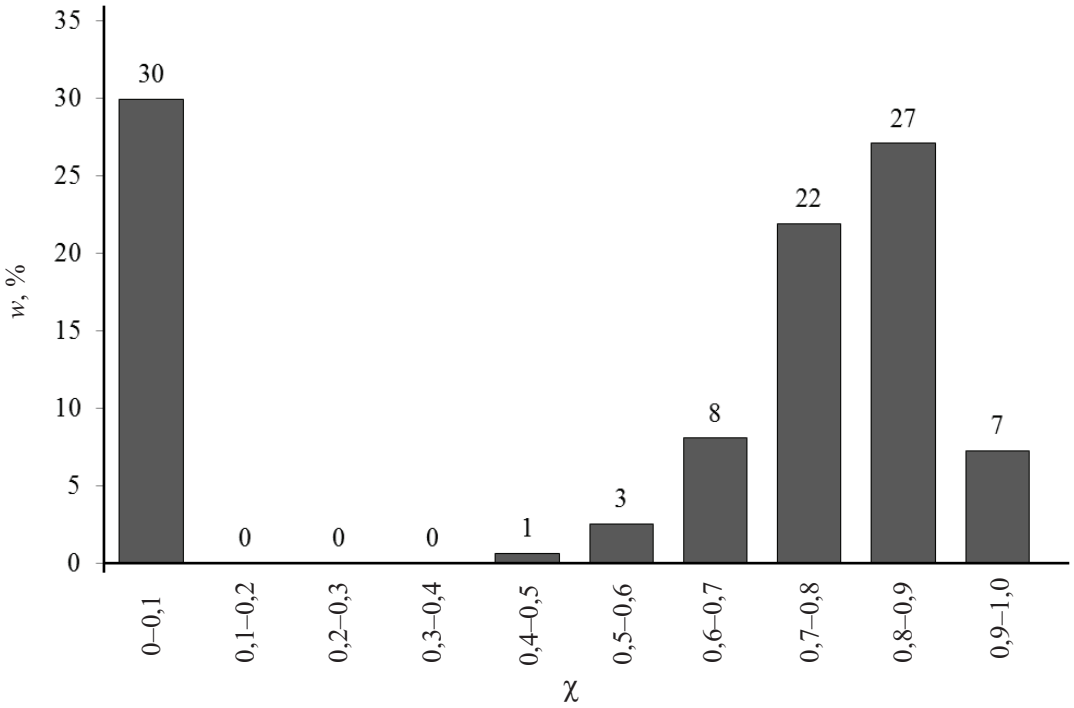


Рис. 4. Гистограмма распределения коэффициента уменьшения скорости

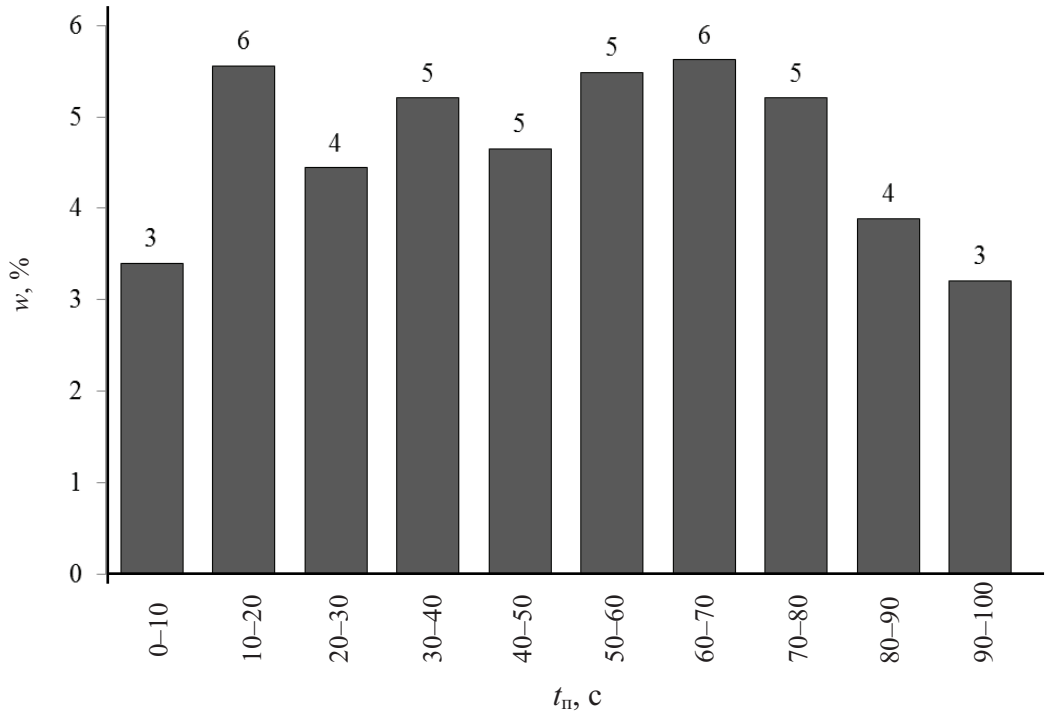


Рис. 5. Гистограмма распределения длительности пауз между торможениями

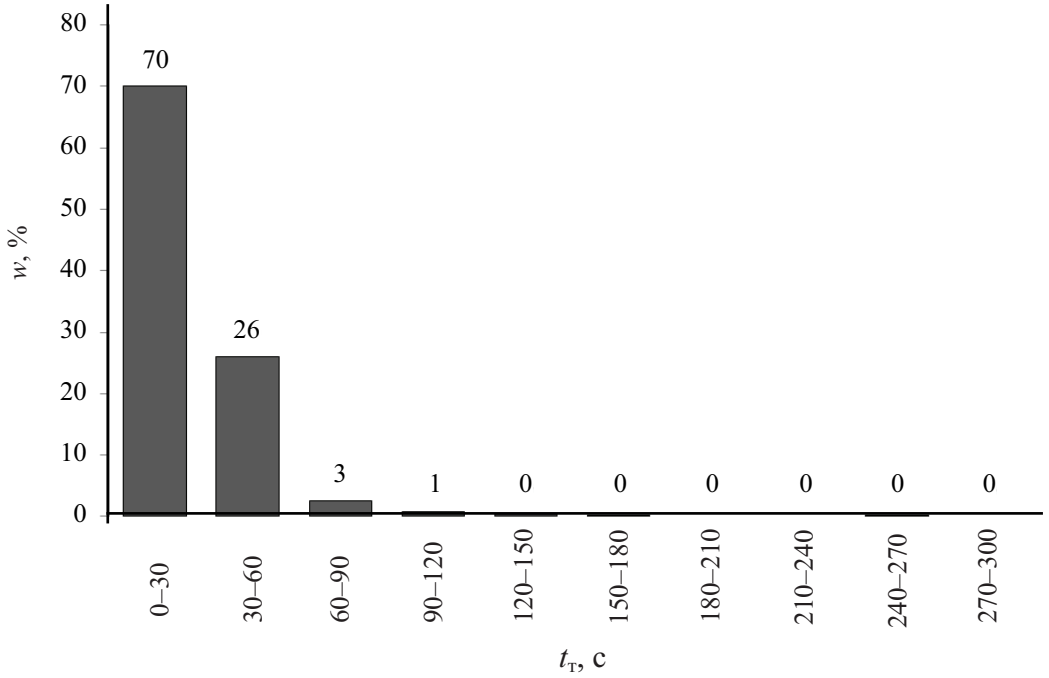


Рис. 6. Гистограмма распределения длительности торможения

теля на горный режим характеризуется более глубоким снижением давления в тормозной магистрали;

– основная часть торможений обеспечивает либо остановку, либо понижение скорости до 20 %;

– наиболее вероятная длительность торможения не превышает 30 с. При отсутствии электрического торможения доля коротких торможений – 0–60 с – уменьшается, при этом возрастает число более длительных торможений;

– длительность пауз между торможениями существенно сокращается при отсутствии электрического торможения локомотива.

Рассмотрим, как распределялось число торможений на 1000 км пробега среднестатистического вагона:

среднее значение: 68,6;
минимальное значение: 28,2;
максимальное значение: 137,4;
дисперсия: 1446,7;
стандартное отклонение: 38;
эксцесс: 1,006;
асимметрия: 0,02.

Анализ распределения количества торможений (рис. 7) показал, что общее количество торможений в год на условном грузовом вагоне в пути следования (без станционной работы) с учетом среднесуточного пробега, равного 340 км [8], составляет 8600.

Современные условия эксплуатации грузового подвижного состава нового поколения предполагают, что условный грузовой вагон эксплуатируют на определенных маршрутах с максимальной эффективностью, т. е. минимальным порожним пробегом и при максимальной грузоподъемности. Потому вместо использования в расчетах *среднестатистических условий нагруженности* тормозного оборудования необходимо рассматривать *условия его максимальной нагруженности*, что особенно важно при определении количества и глубины торможений. Исходя из этих положений, число торможений условного грузового вагона при максимально нагруженном режиме эксплуатации составляет 20 660 в год.

В проведенной работе не было зафиксировано ни одного экстренного торможения и были использованы результаты испытаний

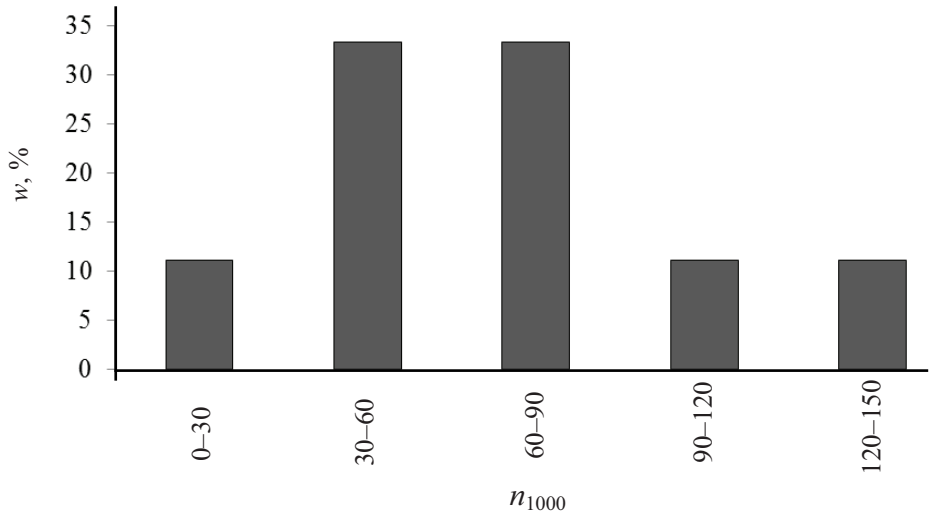


Рис. 7. Распределение количества торможений на 1000 км пробега

2011–2015 гг. [9], согласно которым в расчетное число торможений в год должно входить не менее 9 экстренных торможений.

В соответствии с действующей нормативно-технической документацией существующей на дорогах РФ технологии проведение полного обслуживания тормозов предусматривает не менее 3 торможений в сутки. Дополнительно к этому каждые 8 ч производят смену локомотивных бригад и сокращенное опробование тормозов, что добавляет еще 3 торможения в сутки. Таким образом, количество торможений условного грузового вагона при маневровой работе составляет по предварительной оценке порядка 6 % относительно общего количества торможений в год.

Таким образом, общую нагруженность тормозного оборудования инновационного грузового вагона можно оценить в 24 200 торможений в год.

Уточнение параметров метода ресурсных испытаний тормозной системы для вагонов нового поколения и апробация метода на системе, интегрированной в тележку

Данные о нагруженности тормозного оборудования условного вагона, полученные по результатам исследования реальных составов, были использованы для испытаний тормозной системы, интегрированной в тележку.

Учитывая специфику эксплуатации вагонов нового поколения, имеющих минимальный порожний пробег, для ресурсных испытаний тормозной системы, интегрированной в тележку, была установлена следующая характеристика цикла: давление в тормозном цилиндре 0,33 МПа – соответствующее полному служебному торможению, без учета ступеней; время наполнения тормозного цилиндра – 5 с; время удержания давления в тормозном цилиндре – 5 с; сброс давления – 2 с. Давление в тормозном цилиндре было принято из тех соображений, что инновационные вагоны эксплуатируются в основном при максимальной загрузке на среднем режиме работы воздухораспределителя, при котором давление в тормозном цилиндре составляет 0,31–0,35 МПа, а время наполнения – из соображений плавного функционирования системы и снижения времени, затраченного на испытания, так как длительность приложения статической нагрузки не влияет на накопления усталостных повреждений, которые определяются количеством циклов.

Так как все компоненты тормозной системы – тормозной цилиндр, авторегулятор, триангели в сборе с башмаками и рычаги – подтвер-

Результаты проверки параметров тормозной системы до и после ресурсных испытаний

Показатель	Допустимое значение показателя	Результат испытаний		Заключение по испытаниям
		до ресурсных торможений	после ресурсных торможений	
Прочность деталей и узлов тормозной системы при максимальном давлении ($0{,}6^{+0{,}02}$ МПа)	Отсутствие разрушений и видимых остаточных деформаций	Разрушения и остаточные деформации отсутствуют		Результат положительный
Плотность пневматической части тормозной системы при давлении $0{,}6^{+0{,}02}$ МПа	Падение давления не более 0,01 МПа за 3 мин	Падение давления 0,001 МПа за 3 мин		То же
Обеспечение автоматического поддержания зазора между тормозными колодками и колесами	Средний зазор (5–8 мм) после замены новых колодок на предельно изношенные	Средний зазор 6–7 мм		” ”
Действительная сила тормозного нажатия, кН, для давления:				
(0,1–0,12) МПа	6,34–10,02	6,63–7,95	6,28–8,12	” ”
(0,3–0,34) МПа	19,21–37,43	21,8–25,44	19,87–23,52	” ”
Целостность тормозной системы	Отсутствие видимых разрушений после 242 000 торможений	–	Разрушения отсутствуют после 360 000 торможений	” ”

дили соответствие категории УХЛ1 по ГОСТ 16350–80 [10] при испытаниях по отдельности, то ресурсные испытания осуществляли при температуре окружающей среды 20±5 °С.

Согласно требованию технического задания [6], межремонтный период интегрированной в тележку тормозной системы составляет 10 лет, поэтому минимальное число циклов, необходимое для подтверждения отсутствия опасных отказов в межремонтный период, – 242 000. Тормозная система испытывалась до числа циклов, равного 360 000, что отвечает 14,8 годам работы, для возможного подтверждения увеличенного ресурса.

После проведения ресурсных торможений в количестве 360 000 циклов были оценены отсутствие разрушений тормозной системы как критерий опасных отказов, проверка ее тормозной эффективности, прочности, плотности и работоспособности во всех режимах, возможных в эксплуатации. Результаты данных испытаний приведены в таблице.

Заключение

Для проведения испытаний на надежность и подтверждения отсутствия отказов в межремонтный интервал 10 лет по числу циклов «торможение–отпуск» тормозной системы, интегрированной в тележку модели 18-6863 для грузовых вагонов нового поколения,

были получены данные о нагруженности тормозного оборудования реально эксплуатируемых вагонов. На основании этих данных была разработана методика испытаний по подтверждению работоспособности и отсутствия опасных отказов в межремонтный период для тормозной системы.

Проведенный комплекс испытаний установил соответствие системы заявленным требованиям, в том числе и отсутствие опасных отказов в межремонтный период: при задании 10 лет тормозная система подтвердила безотказную работу в течение 14,8 лет.

Библиографический список

1. Бороненко Ю. П. Стратегические задачи вагоностроителей в развитии тяжеловесного движения / Ю. П. Бороненко // Транспорт Российской Федерации. – 2013. – № 5. – С. 68–73.

2. Орлова А. М. Конструкция тележки с осевой нагрузкой 27 тс с интегрированной тормозной системой / А. М. Орлова, В. С. Бабанин, А. Л. Ковязин, И. В. Турутин // Железнодорожный транспорт. – 2018. – № 7. – С. 61–67.

3. ГОСТ 33597–2015. Тормозные системы железнодорожного подвижного состава. Методы испытаний. – М. : Стандартинформ, 2016. – 24 с.

4. Общее руководство по ремонту тормозного оборудования вагонов 732-ЦВ-ЦЛ. – Утв. 54-м Советом по железнодорожному транспорту государств-участников содружества (протокол от 18–19 мая 2011 г.). – М. : Трансинфо, 2011. – 216 с.

5. ГОСТ 33211–2014. Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам. – М. : Стандартинформ, 2016. – 56 с.

6. Техническое задание на разработку системы тормозной для двухосных трехэлементных тележек грузовых вагонов тип 4 ГОСТ 9246–2013. – Утв. А. М. Орлова. – СПб. : ПАО «НПК “ОВК”», 2016. – 58 с.

7. Гудас М. В. Отчет о проведении работы по теме «Оценка нагруженности тормозного оборудования в эксплуатации. Анализ результатов данных с Московской, Восточно-Сибирской, Западно-Сибирской и Приволжской железных дорог. Требования к ресурсным испытаниям перспективного тормозного оборудования» / М. В. Гудас. – М. : ОАО «ВНИИЖТ», 2017. – 35 с.

8. Хусаинов Ф. И. Экономическая статистика железнодорожного транспорта / Ф. И. Хусаинов. – М. : Наука, 2016. – 100 с.

9. Протокол расшифровки файлов локомотивных систем безопасности (КЛУБ, КПД) экстренных торможений грузовых поездов на сети дорог: отчет о НИР (промежуточ.). – Утв. С. А. Сапожников, рук. Г. Н. Горюнов. – М. : ОАО «ВНИИЖТ», 2013. – 15 с.

10. ГОСТ 16350–80. Климат СССР. Районирование и статистические параметры климатических факторов для технических целей. – М. : Изд-во стандартов, 1986. – 142 с.

Дата поступления: 31.01.2019
Решение о публикации: 14.02.2019

Контактная информация

НАЗАРОВ Игорь Викторович – заместитель заведующего отделением, nazarov.igor@vniizht.ru
АРТАМОНОВ Евгений Игоревич – аспирант, eartamonov@railtest.ru
КОВЯЗИН Александр Леонидович – руководитель отдела, akovyazin@tt-center.ru

Development of the life test method for a bogie brake system

I. V. Nazarov[1], E. I. Artamonov[2], A. L. Kovyazin[3]

[1] Joint Stock Company "Scientific Research Institute of Railway Transport" (JSC "VNIIZhT"), 10, 3rd Mytishchinskaya ul., Moscow, 129626, Russian Federation
[2] Limited Liability Company "Tikhvinsky Testing Center of Railway Engineering" ("TITZZHT" LLC), 6-1, Promploshchadka area, Tikhvin, Leningrad Region, 187556, Russian Federation
[3] Limited Liability Company "Transport Technologies Center" (VNITSTT LLC), 2, lit. A, 23th line, Vasilievsky Island, Saint Petersburg, 199106, Russian Federation

For citation: Nazarov I. V., Artamonov E. I., Kovyazin A. L. Development of the life test method for a bogie brake system. *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2019, vol. 16, no. 2, pp. 230–240. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2019-2-230-240

Summary

Objective: Conducting life tests in the framework of complex tests of the brake system with the mechanical part, fully installed on the Barber bogie, for the new generation cars. Approbation of the life test methodology on a prototype bogie. **Methods:** In order to develop the methods for the life test of brake systems, including those integrated into the bogie, the parameters, operating conditions and the loading of brake equipment in trains running on real routes were identified. According to the data obtained from the operation, the load on the "braking-release" cycles of the braking system of an average car was determined. **Results:** The procedure for life tests of the brake system for new generation cars was developed. It was tested on a system integrated into the bogie, and its comprehensive tests were carried out with an assessment of the performance of the bogie's braking system before and after the resource braking. **Practical importance:** Tests were carried out in the framework of comprehensive studies to confirm the resource and performance of the braking system, while mastering the production of bogie for new generation freight cars. The proposed method of life tests confirmed the absence of dangerous failures of the brake system for a set period. It can be applied to any types of brake systems of freight cars.

Keywords: Brake system, endurance tests, brake tests, Barber bogie, freight cars.

References

1. Boronenko Y. P. Strategicheskiye zadachi vagonostroiteley v razvitii tyajelovesnogo dvijeniya [Strategic tasks of car builders in the development of heavy traffic]. *Transport Rossiyskoy Federatsii* [*Transport of the Russian Federation*], 2013, no. 5, pp. 68–73. (In Russian)

2. Orlova A. M., Babanin V. S., Kovyazin A. L. & Turutin I. V. Konstruktsiya telezhki s osevoi nagruzkoi 27 ts s integrirovannoy tormoznoy sistemoy [The design of a bogie with 27 tf axle load with an integrated brake system]. *Zheleznodorozhniy transport* [*Railway transport*], 2018, no. 7, pp. 61–67. (In Russian)

3. *GOST 33597–2015. Tormoznye sistemy zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava. Metody ispytanii* [*State Standard 33597–2015. Brake systems for the railway rolling stock. Test methods*]. Moscow, Standartinform Publ., 2016, 24 p. (In Russian)

4. *Obshcheye rukovodstvo po remontu tormoznogo oborudovaniya vagonov 732-TSV-TSL* [*General guidance on maintenance of brake equipment of 732-CV-CL cars*]. Utv. 54-m Sovetom po zheleznodorozhnomu transportu gosudarstv-uchastnikov sodruzhestva (protokol ot 18–19 maya 2011 g.). [Approved by the 54th Council for the Railway Transport of the Commonwealth Member States (Protocol dated May 18–19th, 2011)]. Moscow, Transinfo Publ., 2011, 216 p. (In Russian)

5. *GOST 33211–2014. Vagony gruzovyye. Trebovaniya k prochnosti i dinamicheskim kachestvam* [*State Standard 33211–2014. Freight cars. Requirements for*

strength and dynamic qualities]. Moscow, Standartinform Publ., 2016, 56 p. (In Russian)

6. *Tekhnicheskoye zadaniye na razrabotku sistemy tormoznoy dlya dvukhosnykh trekhelementnykh telezhek gruzovykh vagonov tip 4 GOST 9246–2013* [*Terms of reference for the development of a brake system for two-axle three-element bogies of freight cars type 4 State Standard 9246–2013*]. Utv. A. M. Orlova [Approved by A. M. Orlova]. Saint Petersburg, PAO "NPK "OVK" [Public Joint-Stock Company "Research and Production Company "United Carriage Company"] Publ., 2016, 58 p. (In Russian)

7. Gudas M. V. *Otchet o provedenii raboty po teme "Otsenka nagruzhennosti tormoznogo oborudovaniya v ekspluatatsii. Analiz rezultatov dannykh s Moskovskoy, Vostochno-Sibirskoy, Zapadno-Sibirskoy i Privolzhskoy zheleznykh dorogakh. Trebovaniya k resursnym ispytaniyam perspektivnogo tormoznogo oborudovaniya"* [*Report on the work related to the topic of "Evaluation of loading of brake equipment in operation. Analysis of data results from the Moscow, East-Siberian, West-Siberian and Volga railways. Requirements for endurance testing of advanced brake equipment"*]. Moscow, OAO "VNIIZHT" [OAO "Research Institute of Railway Transport"] Publ., 2017, 35 p. (In Russian)

8. Khusainov F. I. *Ekonomicheskaya statistika zheleznodorozhnogo transporta* [*Economic statistics of railway transport*]. Moscow, Nauka Publ., 2016, 100 p. (In Russian)

9. *Protokol rasshifrovki failov lokomotivnykh sistem bezopasnosti (KLUB, KPD) ekstrennykh tormozheniy gruzovykh poyezdov na seti dorog. Otchet o NIR (promezhutoch.)* [*Protocol for decrypting files of locomotive safety systems (CLUB, efficiency) of emergency braking of freight trains on a network of roads. Report on R & D (Intermediate)*]. Approved by S. A. Sapozhnikov, head G. N. Goryunov. Moscow, OAO "VNIIZHT" [OAO "Research Institute of Railway Transport"] Publ., 2013, 15 p. (In Russian)

10. *GOST 16350–80. Klimat SSSR. Rayonirovaniye i statisticheskiye parametry klimaticheskikh faktorov dlya tekhnicheskikh tseley* [*The climate of the USSR. Zoning and statistical parameters of climatic factors for technical purposes*]. Moscow, Standards Publ., 1986, 142 p. (In Russian)

Received: January 31, 2019
Accepted: February 14, 2019

Author's information:
Igor V. NAZAROV – Deputy Head of Department, nazarov.igor@vniizht.ru
Evgeniy I. ARTAMONOV – Postgraduate Student, eartamonov@railtest.ru
Alexander L. KOVYAZIN – Head of Department, akovyazin@tt-center.ru

УДК 656.2

Динамические особенности скатывания вагонов с сортировочной горки

В. И. Смирнов, С. А. Видюшенков, А. С. Кухарева

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

Для цитирования: *Смирнов В. И., Видюшенков С. А., Кухарева А. С.* Динамические особенности скатывания вагонов с сортировочной горки // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2019. – Т. 16, вып. 2. – С. 241–250. DOI: 10.20295/1815-588X-2019-2-241-250

Аннотация

Цель: Изучить влияние инерции вращающихся масс вагона на кинематические параметры движения отцепов на сортировочной горке, а также крутизны уклона продольного профиля спускной части сортировочной горки на скоростные свойства расчетных бегунов. **Методы:** Применяется моделирование скатывания отцепов с сортировочной горки, основанное на аналитическом решении дифференциального уравнения движения одновагонного отцепа по спускной части горки. Уравнение движения отцепа формулируется как задача Коши для материальной точки с массой, равной массе отцепа. Продольный профиль аппроксимируется монотонной кривой параболической формы. **Результаты:** Показано, что для одновагонных отцепов влияние инерционной поправки на скорость движения и продолжительность скатывания незначительно. Для многовагонных отцепов влияние инерции вращения колес будет заметнее проявляться на малых уклонах. Приведенные расчеты показывают, что влияние инерции вращающихся масс (колес) отцепа будет сказываться тем сильнее, чем бóльшую удельную массу будут иметь колесные пары по отношению к массе вагона брутто, т. е. для порожних вагонов. **Практическая значимость:** Моделирование скатывания отцепов позволяет произвести проверку запроектированного продольного профиля, оптимальности управления процессом расформирования составов, достаточности оснащения и рациональности режима работы средств механизации и автоматизации сортировочной горки. Полученное решение можно использовать для проверки возможности ухода незакрепленного подвижного состава под действием силы тяжести и воздействия ветровой нагрузки.

Ключевые слова: Сортировочная горка, продольный профиль, одновагонный отцеп, дифференциальное уравнение скатывания, инерционная поправка, расчетный бегун.

Одним из условий обеспечения высокого качества прицельного торможения отцепов на сортировочных горках является использование алгоритмов, адекватно отражающих характер движения отцепов. Алгоритмическую основу проектирования горок и систем автоматического регулирования скорости скатывания отцепов составляют дифференциальные уравнения движения.

Анализ работ в этой области (см., например, [1–9]) показывает, что предлагаемые алгоритмы моделирования часто не учитывают физико-механическую природу рассматриваемых явлений; некоторые факторы не принимаются во внимание, а другим придается неоправданно большое значение. Одним из таких факторов в горочных расчетах является поправка на инерцию вращающихся частей (колес) отцепов.

Рассмотрим влияние указанного фактора на скорость и продолжительность движения отцепов по спускной части горки. С целью

повышения достоверности результатов исключим из анализа влияние стрелок, кривых и скорости ветра. Кроме того, используем аппроксимацию продольного профиля спускной части горки в виде одной гладкой непрерывной функции. При этом скорость движения также будет описываться гладкой функцией, имеющей непрерывную производную. Последнее означает отсутствие скачков ускорения. Это позволяет отчетливо отслеживать влияние конкретных факторов на кинематические свойства отцепа на горке. Такой подход уже неоднократно применялся в горочных расчетах [10–13]. Более того, как показывает анализ результатов геодезической съемки продольного профиля многих действующих сортировочных горок, он по форме близок к непрерывной кривой, нежели к набору прямолинейных отрезков переменной крутизны. То есть принятый в настоящее время метод задания продольного профиля сортировочных горок можно рассматривать как способ кусочно-линейной аппроксимации кривой, по которой он очерчен в действительности [14].

Пусть уравнение профиля имеет вид параболы

$$h(s) = H(1 - s / L)^2 ,$$

где H – высота горки; L – расчетная длина горки (расстояние от вершины до расчетной точки); s – пройденный путь, $0 \le s \le L$; h – проектная отметка.

Для определенности примем $H = 3{,}675$ м и $L = 397$ м. Для сравнения на рис. 1 приведен непрерывный профиль (*1*) и традиционный кусочно-линейный профиль (*2*) горки такой же высоты и длины со следующими параметрами (крутизна уклона, ‰; длина, м): (40,0; 43,91), (17,7; 47,03), (7,0; 48,68), (5,0; 47,37), (7,0; 38,60), (1,4; 171,40).

Крутизна уклона в каждой точке параболического профиля

$$i(s) = -h'(s) = 2h / L(1 - s / L) .$$

На рис. 2 показана зависимость $i(s)$ для непрерывного (*1*) и кусочно-линейного профиля (*2*). Заметим, что $h'(L) = 0$, т. е. в расчетной точке параболический профиль имеет нулевой уклон, что обеспечивает непрерывное спряжение с сортировочным путем, расположенным на площадке.

Уравнение движения отцепа имеет вид

$$m\frac{ds}{dt} = Q\sin\alpha - W - W_{\text{ср}} ,$$

где m – масса вагона; Q – его вес; W – основное сопротивление; $W_{\text{ср}}$ – сопротивление от воздушной среды; α – угол между касательной к траектории движения и горизонтальной осью координат.

Перепишем уравнение движения в переменных «скорость–расстояние» с учетом того, что $\sin\alpha \approx \text{tg}\alpha = i$ (так как $L \gg H$):

$$V\frac{dV}{ds} + \mu V^2 + \omega^2 s = \lambda , \qquad (1)$$

здесь V – скорость движения; w – удельное основное сопротивление движению, $\mu = c/m$; c – аэродинамический коэффициент (имеющий размерность т/м)

$$c = \frac{0{,}06667 \cdot C_{\text{х}} \cdot S \cdot p}{287(273 + T)} ,$$

$C_{\text{х}}$ – коэффициент воздушного сопротивления; S – площадь поперечного сечения вагона, м^2; p – атмосферное давление, мм рт. ст.; 287 – удельная газовая постоянная для воздуха, Дж/(кг·К); 0,0667 – переводной коэффициент (масса вагона принимается в тоннах); T – температура воздуха, °С.

В уравнении (1) для параболического профиля следует принять, что

$$\omega^2 = \frac{2H}{L^2} g' , \ \lambda = g'\left(\frac{2H}{L} - w \cdot 10^{-3}\right).$$

Уравнение (1) допускает аналитическое решение. Положим $V^2 = u$, тогда получим неоднородное линейное уравнение

$$\frac{du}{ds} + 2\mu u = 2\lambda - 2\omega^2 s , \qquad (2)$$

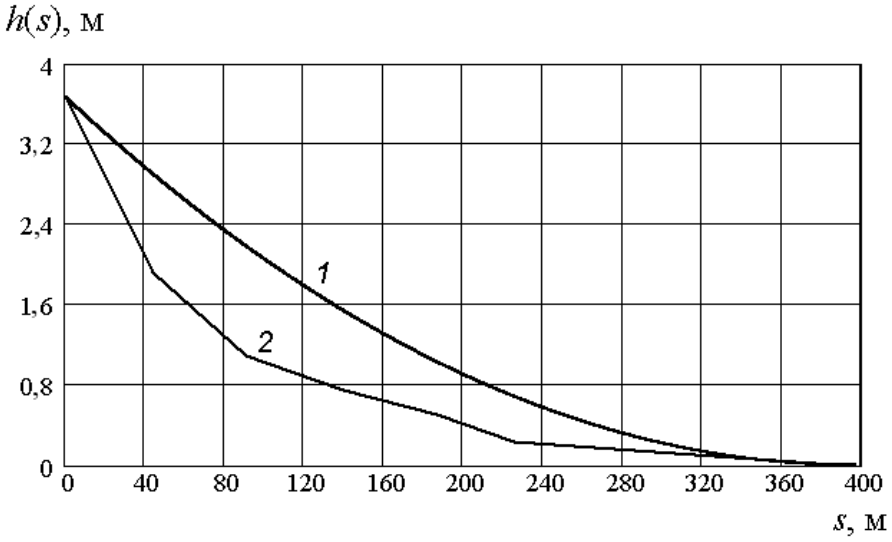


Рис. 1. Продольный профиль спускной части горки

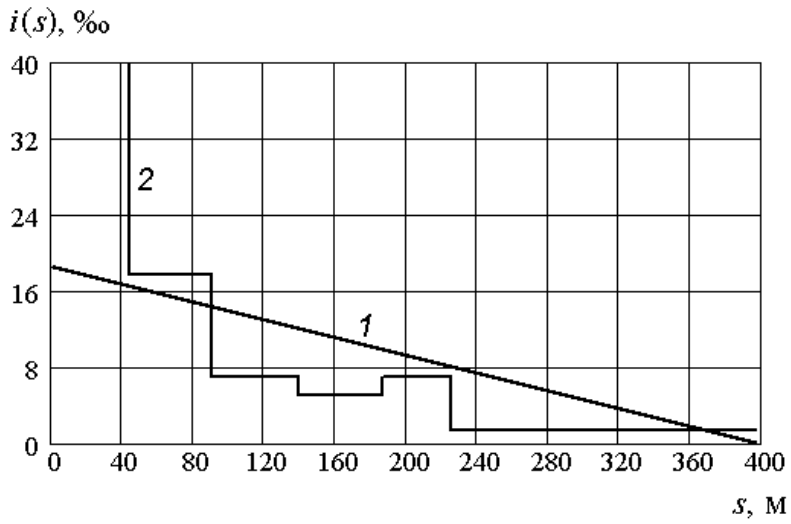


Рис. 2. Крутизна уклона профиля

решение которого – сумма общего решения соответствующего однородного уравнения $\overline{u}$ и частного решения u^*: $u(s) = \overline{u}(s) + u^*(s)$.

Рассмотрим однородное уравнение

$$\frac{du}{ds} + 2\mu u = 0 .$$

Так как характеристическое уравнение имеет однократный вещественный корень, то общим решением будет выражение

$$\overline{u}(s) = C_1 e^{-2\mu s} ,$$

где C_1 – постоянная интегрирования.

Частное решение неоднородного уравнения (2) ищем методом вариации постоянных

$$u^*(s) = C_1(s) e^{-2\mu s} ,$$

$$\frac{du^*}{ds} = -2\mu C_1(s) e^{-2\mu s} + C_1'(s) e^{-2\mu s} ,$$

откуда

$$C_1'(s) = 2\lambda e^{2\mu s} - 2\omega^2 s e^{2\mu s} .$$

Интегрируя по s, находим

$$C_1(s)=\left[\frac{\lambda}{\mu}-\frac{\omega^2}{2\mu^2}(2\mu s-1)\right]e^{2\mu s}.$$

Следовательно,

$$u^*(s)=\frac{\lambda}{\mu}-\frac{\omega^2}{2\mu^2}(2\mu s-1),$$

поэтому

$$u=\overline{u}+u^*=C_1e^{-2\mu s}+\frac{\lambda}{\mu}-\frac{\omega^2}{2\mu^2}(2\mu s-1). \quad (3)$$

Начальное условие $V = V_0$ при $s = s_0$. Тогда

$$C_1=\left[V_0^2-\frac{\lambda}{\mu}+\frac{\omega^2}{2\mu^2}(2\mu s_0-1)\right]e^{2\mu s_0}.$$

Подставляя C_1 в (3), получим окончательное решение

$$V(s)=\sqrt{\begin{array}{l}\left[V_0^2-\frac{\lambda}{\mu}+\frac{\omega^2}{2\mu^2}(2\mu s_0-1)\right]\times\\ \times e^{-2\mu(s-s_0)}+\frac{\lambda}{\mu}-\frac{\omega^2}{2\mu^2}(2\mu s-1).\end{array}} \quad (4)$$

В (4) V_0 – начальная скорость движения (равная скорости роспуска), s_0 – начальная координата.

Кривую времени находим интегрированием скорости

$$t(s)=\int_0^s\frac{dx}{V(x)}.$$

Для оценки влияния инерции вращающихся масс (колесных пар) отцепа на скорость его движения используем теорему об изменении кинетической энергии, которая для отцепа равна

$$T=\frac{1}{2}M\ v^2+\frac{1}{2}\sum_{i=1}^{n}I_i\varpi_i^2, \quad (5)$$

здесь M – масса отцепа, n – количество осей в отцепе, I_i – полярный момент инерции i-й колесной пары относительно оси ее вращения, ϖ_i – ее угловая скорость, v – скорость поступательного движения отцепа.

Полагая, что радиусы колес и массы колесных пар одинаковы для всех вагонов в отцепе, выражение (5) перепишем в виде

$$T=\frac{1}{2}(M\ v^2+n\,I\varpi^2).$$

Так как $\varpi = v/r$, где r – радиус колеса, то

$$T=\frac{v^2}{2}\left(M\ +\frac{n\,I}{r^2}\right).$$

Учитывая теперь, что $I=m_к\cdot r^2/2$, где $m_к$ – масса колесной пары, имеем

$$T=\frac{v^2}{2}\left(M\ +\frac{n\cdot m_к}{2}\right).$$

Величина $M\ +n\cdot m_к/2$ называется приведенной массой; обозначим ее через $M_к$. Если принять $m_к$ = 1,85 т, то приведенная масса (в т)

$$M_к=M+0{,}925\ n. \quad (6)$$

Так как в горочных расчетах удельные силы, действующие на отцеп, вычисляются по отношению к единице массы или веса, то удобнее пользоваться так называемым приведенным ускорением силы тяжести g', величина которого, как следует из (6), равна

$$g'=\frac{g}{1+0{,}925n/M},$$

или

$$g'=\frac{g}{1+9{,}07n/Q}, \quad (7)$$

где M и Q – масса и вес отцепа соответственно в тоннах или кН, g = 9,81 м/с^2. В общем виде выражение для (7) будет иметь вид

$$g' = \frac{g}{1 + \frac{n \cdot m_{\text{к}}}{2\sum_{\nu=1}^{N} m_{\nu}}}, \qquad (8)$$

здесь m_ν – масса ν-го вагона в отцепе, N – количество вагонов в отцепе.

Как видно из (8), влияние инерции вращения колесных пар отцепа сказывается тем больше, чем меньше его масса. Рассмотрим числовой пример. Пусть отцеп состоит только из порожних четырехосных (восьмиосных) вагонов одного типа. Тогда соотношение (8) можно записать следующим образом:

$$g' = \frac{g}{1 + 0{,}925\beta},$$

где β – отношение числа осей вагона n_0 к его таре m: $\beta = n_0/m$. Для четырех- и восьмиосных полувагонов (ПВ) и цистерн (ЦС) значение коэффициента β приведено в табл. 1.

Так как коэффициент β несколько больше для четырехосных вагонов, чем для восьмиосных, в качестве расчетных бегунов примем четырехосные порожние ПВ и ЦС. Исходные данные для расчета приведены в табл. 2.

Расчет по формуле (4) показывает, что максимальная разность скоростей отцепа, определенная с учетом и без учета инерции вращения колес, составляет $\Delta V \approx 0{,}44$ м/с и практически не отличается для ПВ и ЦС.

Наибольшая разность времени хода, определенная по расчетной точке, $\Delta t \approx 5{,}3$ с.

Зависимости ΔV и Δt от расстояния (при $100 \le s \le L$ (в м)) показаны на рис. 3, *а* и *б*.

Таким образом, приведенные расчеты показывают, что влияние инерции вращающихся масс (колес) одновагонного отцепа на скорость и продолжительность его скатывания незначительное.

ТАБЛИЦА 1. Значение коэффициента β

m, т	22,1	23,1	45,5	48,8
n_0	β			
4	0,181	0,173	–	–
8	–	–	0,176	0,164
Тип вагона	ПВ	ЦС	ПВ	ЦС

ТАБЛИЦА 2. Исходные данные для расчета

Параметр	Отцеп	
	ПВ	ЦС
Количество осей	4	4
Масса m, т	22,1	23,1
Площадь поперечного сечения S, м^2	8,5	9,8
Коэффициент воздушного сопротивления C_x	1,36	0,59
Основное удельное сопротивление w, Н/кН	4,5	4,5
Атмосферное давление p, мм рт. ст.	760	760
Температура воздуха, °С	0	0
Скорость роспуска V_0, м/с	1,5	1,5

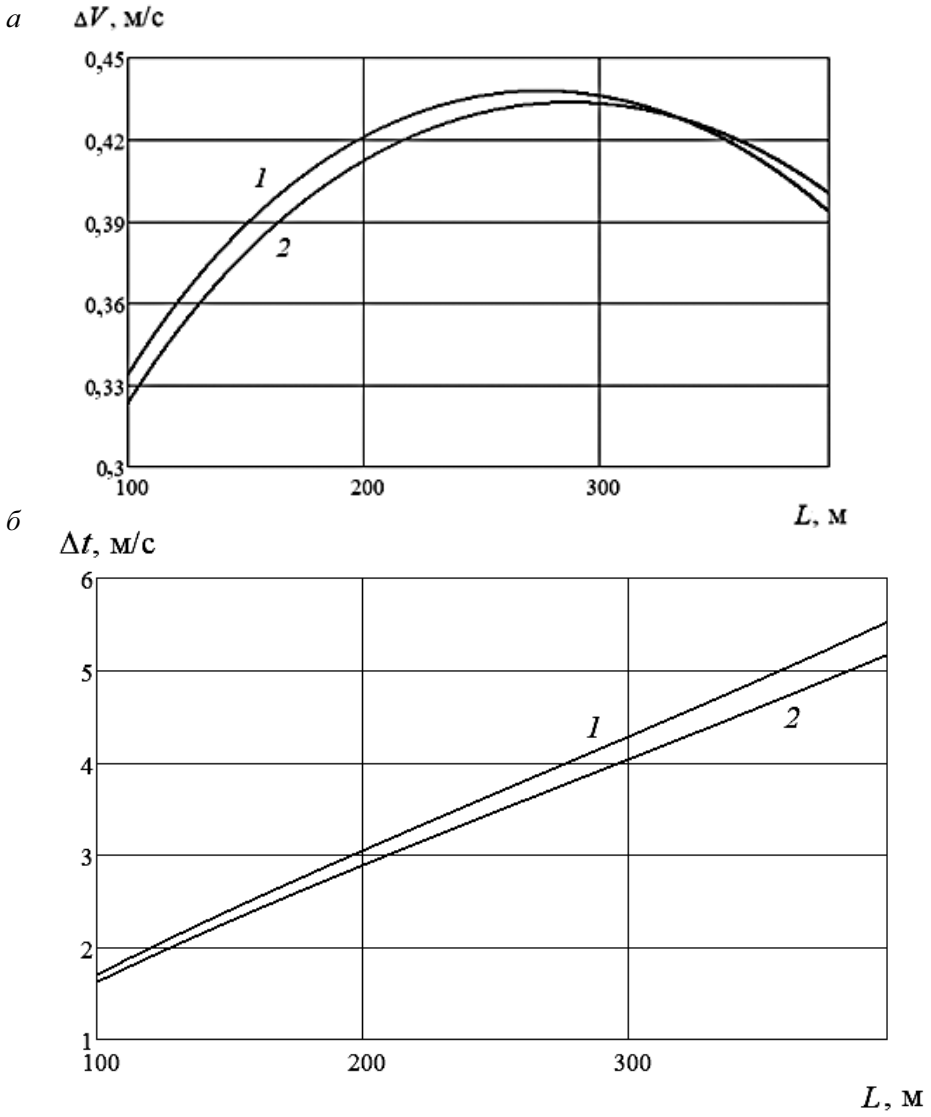


Рис. 3. Разность скоростей движения (*а*) и времени хода (*б*) с инерционной поправкой и без нее: *1* – ПВ; *2* – ЦС

Для многовагонных отцепов поправка на инерционность будет сказываться тем сильнее, чем бóльшую удельную массу будут иметь колесные пары по отношению к массе отцепа брутто, т. е. для порожних отцепов, причем в большей степени на малых уклонах (до 5‰ [15]).

Попытки построения расчетной модели скатывания вагона с сортировочной горки с учетом сил сопротивления движения были предприняты в работах [16–18], вероятностный подход использован в [19–21], факторы, влияющие на определение точки остановки отцепа, рассмотрены в [22], оптимизация параметров перевальной части сортировочных горок предложена в [23–25].

Моделирование скатывания отцепов позволяет произвести проверку запроектированного продольного профиля, оптимальности управления процессом расформирования составов, достаточности оснащения и рациональности режима работы средств механизации и автоматизации сортировочной горки. Полученное решение можно использовать для проверки возможности ухода незакрепленного подвижного состава под действием силы тяжести и воздействия ветровой нагрузки.

Библиографический список

1. Сопротивление движению грузовых вагонов при скатывании с горок / ред. Е. А. Сотников. Труды ВНИИЖТ. – М. : Изд-во ВНИИЖТ, 1975. – Вып. 545. – 102 с.

2. Гепнер М. Моделирование скатывания отцепов с сортировочной горки / М. Гепнер // Железные дороги мира. – 1989. – № 3. – С. 23–27.

3. Муха Ю. А. Автоматизация и механизация переработки вагонов на станциях / Ю. А. Муха, И. В. Харланович, В. П. Шейкин и др. – М. : Транспорт, 1985. – 248 с.

4. Правдин Н. В. Проектирование железнодорожных станций и узлов : в 2 т. Т. 1 / Н. В. Правдин, Т. С. Банек, В. Я. Негрей. – Минск : Вышэйшая школа, 1984. – Т. 1. – 288 с.

5. Болотный В. Я. Совершенствование схем и технологии работы железнодорожных станций / В. Я. Болотный. – М. : Транспорт, 1986. – 280 с.

6. Муха Ю. А. Имитационное моделирование процесса скатывания отцепов при выполнении горочных расчетов / Ю. А. Муха, А. А. Муратов // Механизация и автоматизация сортировочного процесса на станциях : межвуз. сб. науч. трудов. – Днепропетровск : ДИИТ, 1990. – С. 11–20.

7. Шейкин В. П. Эксплуатация механизированных сортировочных горок / В. П. Шейкин. – М. : Транспорт, 1992. – 230 с.

8. Быкадоров А. В. Некоторые особенности скатывания отцепов из нескольких вагонов / А. В. Быкадоров // Вопросы эксплуатации железных дорог. Труды НИИЖТ. – Новосибирск : Изд-во НИИЖТ, 1959. – Вып. 20. – С. 150–157.

9. Тертеров М. Н. О некоторых особенностях скатывания отцепов с горки / М. Н. Тертеров // Вопросы эксплуатации железных дорог. Труды ЛИИЖТ. – Л. : Изд-во ЛИИЖТ, 1962. – Вып. 189. – С. 39–41.

10. Шафит Е. М. Дифференциальные уравнения скатывания отцепов с сортировочной горки при различных способах аппроксимации продольного профиля / Е. М. Шафит // Вопросы механизации и автоматизации сортировочных горок. Труды ДИИТ. – Днепропетровск : Изд-во ДИИТ, 1965. – Вып. 52. – С. 55–72.

11. Ахвердиев К. С. Оптимальный горочный профиль и динамика скатывания отцепа по нему / К. С. Ахвердиев, Б. И. Алибеков, В. П. Жуков // Транспорт : наука, техника, управление. – 1991. – № 8. – С. 13–18.

12. Смирнов В. И. Динамика скатывания одновагонных отцепов с сортировочной горки / В. И. Смирнов // Транспорт : наука, техника, управление. – 1993. – № 10. – С. 29–34.

13. Павлов В. Е. Брахистохрона применительно к сортировочной горке / В. Е. Павлов // Применение современных математических методов в эксплуатации железных дорог. Труды ЛИИЖТ. – М. : Транспорт, 1969. – Вып. 300. – С. 138–146.

14. Шафит Е. М. Аппроксимация продольного профиля сортировочных горок / Е. М. Шафит // Вопросы механизации и автоматизации сортировочных горок. Труды ДИИТ. – Днепропетровск : Изд-во ДИИТ, 1965. – Вып. 52. – С. 35–54.

15. Смирнов В. И. Динамика скатывания многовагонных отцепов с сортировочной горки / В. И. Смирнов // Транспорт : наука, техника, управление. – 1994. – № 1. – С. 17–23.

16. Туранов Х. Т. Математическое описание условий скатывания вагона по профилю сортировочной горки / Х. Т. Туранов, С. А. Ситников, А. А. Зырянцев // Транспорт : наука, техника, управление. – 2012. – № 6. – С. 7–12.

17. Туранов Х. Т. Уточненные математические модели скорости скатывания вагона по уклону горки при воздействии силы тяжести и попутного ветра / Х. Т. Туранов, А. А. Гордиенко // Транспорт : наука, техника, управление. – 2015. – № 1. – С. 15–21.

18. Туранов Х. Т. К критическому анализу теоретических положений движения вагона с сортировочной горки / Х. Т. Туранов, А. А. Гордиенко, Ш. Б. Джабборов // Транспорт : наука, техника, управление. – 2018. – № 11. – С. 26–31.

19. Правдин Н. В. Расчет параметров сортировочной горки с учетом случайных ходовых свойств отцепов / Н. В. Правдин, С. А. Бессоненко // Транспорт : наука, техника, управление. – 2007. – № 7. – С. 8–15.

20. Бессоненко С. А. Принципы оптимизации параметров сортировочных горок / С. А. Бессоненко // Транспорт : наука, техника, управление. – 2010. – № 5. – С. 17–20.

21. Бессоненко С. А. Вероятностный подход к расчету сортировочных горок / С. А. Бессонен-

ко // Транспорт : наука, техника, управление. – 2010. – № 7. – С. 17–19.

22. Корниенко К. И. Алгоритм расчета точки остановки отцепа в сортировочном парке / К. И. Корниенко // Транспорт : наука, техника, управление. – 2017. – № 11. – С. 36–40.

23. Осипов Д. В. Аналитический метод расчета положения одновагонных отцепов на перевальной части сортировочных горок в момент их отрыва от состава / Д. В. Осипов // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2010. – № 2. – С. 9–13.

24. Осипов Д. В. Методика оценки качества продольного профиля перевальной части сортировочной горки / Д. В. Осипов, А. А. Климов // Транспорт Урала. – 2015. – № 4 (47). – С. 63–68.

25. Осипов Д. В. Влияние продольного профиля перевальной части сортировочной горки на перерабатывающую способность / Д. В. Осипов, А. А. Климов // Транспорт Урала. – 2016. – № 4 (51). – С. 71–76.

Дата поступления: 17.04.2019
Решение о публикации: 26.04.2019

Контактная информация:
СМИРНОВ Владимир Игоревич – доктор техн. наук, профессор, vsmirnov1@gmail.com
ВИДЮШЕНКОВ Сергей Александрович – канд. техн. наук, доцент, baklava@mail.ru
КУХАРЕВА Анна Сергеевна – канд. физ.-мат. наук, доцент, kukhareva@pgups.ru

Dynamic peculiarities of wagon movement over a marshalling hump

V. I. Smirnov, S. A. Vidyushenkov, A. S. Kukhareva

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

For citation: Smirnov V. I., Vidyushenkov S. A., Kukhareva A. S. Dynamic peculiarities of wagon movement over a marshalling hump. *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2019, vol. 16, iss. 2, pp. 241–250. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2019-2-241-250

Summary

Objective: To study the effect of the inertia of the rotating masses of the wagon on the kinematic parameters of the wagon cut movement over a marshalling hump. Also to evaluate the impact of the slope gradient of the longitudinal profile of marshalling hump on velocity properties of basic car-runners. **Methods:** Simulation of rolling down of wagon along a descent part of hump based on the analytical solution of the differential equation of single-wagon cut motion. Equation of motion of the wagon cut is considered as the Cauchy boundary value problem for a material body with a mass equal to the mass of the cut. Longitudinal profile is approximated by parabolic curve of monotonous form. **Results:** It has been shown that for a single-wagon cut the effect of the car wheel inertia on the speed and duration of rolling motion is expressed slightly. For multi-wagon cuts this effect will appear more noticeable on small slopes. Calculations show that the more specific gravity the pairs of wheels will have in relation to the gross weight of the wagon, i. e. for empty wagons, the stronger will be the effect of the inertia of the rotating masses (wheels). **Practical importance:** Marshalling hump simulation allows verifying the designed longitudinal profile, the optimality of train disbandment, the adequacy of equipment and the efficient operation mode of mechanization and automation means of marshalling yards. Also, the solution allows checking the possibility of unlocked rolling stock moving away under gravity and the effects of wind loads.

Keywords: Marshalling hump, longitudinal profile, single-wagon cut, differential equation of motion, wheel rolling inertia, basic car-runner.

References

1. *Soprotivleniye dvizheniyu gruzovykh vagonov pri skatyvanii s gorok* [*Resistance to movement of freight wagons when rolling down hills*]. Ed. by E.A. Sotnikov. *Proceedings of VNIIZhT*. Moscow, VNIIZhT Publ., 1975, iss. 545, 102 p. (In Russian)

2. Gepner M. Modelirovaniye skatyvaniya ottsepov s sortirovochnoy gorki [Simulation of cuts movement over marshalling humps]. *Zheleznyye dorogi mira* [*Railways in the world*], 1989, no. 3, pp. 23–27. (In Russian)

3. Mukha Yu.A., Harlanovich I.V., Sheikin V.P. et al. *Avtomatizatsiya i mekhanizatsiya pererabotki vagonov na stantsiyakh* [*Automation and mechanization of wagons processing on railway stations*]. Moscow, Transport Publ., 1985, 248 p. (In Russian)

4. Pravdin N.V., Banek T.S. & Negrey V. Ya. *Proyektirovaniye zheleznodorozhnykh stantsiy i uzlov* [*Design of the railway stations and junctions*]. In 2 vol. Minsk, Vyshjejshaja shkola Publ., 1984, vol. 1, 288 p. (In Russian)

5. Bolotny V. Ya. *Sovershenstvovaniye skhem i tekhnologii raboty zheleznodorozhnykh stantsiy* [*Improvement of schemes and technology of the railway stations*]. Moscow, Transport Publ., 1986, 280 p. (In Russian)

6. Mukha Yu.A. & Muratov A.A. Imitatsionnoye modelirovaniye protsessa skatyvaniya ottsepov pri vypolnenii gorochnykh raschetov [Simulation of cuts movement process in marshalling hump design]. *Mekhanizatsiya i avtomatizatsiya sortirovochnogo protsessa na stantsiyakh* [*Mechanization and automation of marshalling process on stations*]. Mezhvuz. sb. nauch. trudov [Interuniversity collection of scientific proceedings]. Dnepropetrovsk, DIIT Publ., 1990, pp. 11–20. (In Russian)

7. Sheikin V.P. *Ekspluatatsiya mekhanizirovannykh sortirovochnykh gorok* [*Operation of mechanized marshalling humps*]. Moscow, Transport Publ., 1992, 230 p. (In Russian)

8. Bykadorov A.V. Nekotoryye osobennosti skatyvaniya ottsepov iz neskol'kikh vagonov [Some features of the rolling down of multiple cars]. *Voprosy ekspluatatsii zheleznykh dorog* [*Questions of railway operations*]. *Proceedings of NIIZhT*. Novosibirsk, NIIZhT Publ., 1959, iss. 20, pp. 150–157. (In Russian)

9. Terterov M.N. O nekotorykh osobennostyakh skatyvaniya ottsepov s gorki [About some features of cuts movement over marshalling hump]. *Voprosy ekspluatatsii zheleznykh dorog* [*Questions of railway operations*]. *Proceedings of LIIZhT*. Leningrad, LIIZhT Publ., 1962, iss. 189, pp. 39–41. (In Russian)

10. Shafit E.M. Differentsial'nyye uravneniya skatyvaniya ottsepov s sortirovochnoy gorki pri razlichnykh sposobakh approksimatsii prodol'nogo profilya [Differential equations of cuts movement over marshalling hump with different ways of approximating the longitudinal profile]. *Voprosy mekhanizatsii i avtomatizatsii sortirovochnykh gorok* [*Questions of mechanization and automation of marshalling humps*]. *Proceedings of the DIIT.* Dnepropetrovsk, DIIT Publ., 1965, iss. 52, pp. 55–72. (In Russian)

11. Akhverdiyev K.S., Alibekov B.I. & Zhukov V.P. Optimal'nyy gorochnyy profil' i dinamika skatyvaniya ottsepa po nemu [Optimal longitudinal hump profile and dynamics of cuts movement on it]. *Transport: science, technology, management*, 1991, no. 8, pp. 13–18. (In Russian)

12. Smirnov V.I. Dinamika skatyvaniya odnovagonnykh ottsepov s sortirovochnoy gorki [The dynamics of the single-wagon cuts rolling down a marshalling hump]. *Transport: science, technology, management*, 1993, no. 10, pp. 29–34. (In Russian)

13. Pavlov V.E. Brakhistokhrona primenitel'no k sortirovochnoy gorke [Brachistochrone curve with respect to marshalling hump]. *Primeneniye sovremennykh matematicheskikh metodov v ekspluatatsii zheleznykh dorog* [*Application of modern mathematical methods in railway operation*]. *Proceedings of LIIZHT*. Moscow, Transport Publ., 1969, iss. 300, pp. 138–146. (In Russian)

14. Shafit E.M. Approksimatsiya prodol'nogo profilya sortirovochnykh gorok [Approximation of longitudinal profile of the marshalling humps]. *Voprosy mekhanizatsii i avtomatizatsii sortirovochnykh gorok* [*Questions of mechanization and automation of marshalling humps*]. *Proceedings of DIIT.* Dnepropetrovsk, DIIT Publ., 1965, iss. 52, pp. 35–54. (In Russian)

15. Smirnov V.I. Dinamika skatyvaniya mnogovagonnykh ottsepov s sortirovochnoy gorki [Dynamics of cuts movement on the marshalling hump]. *Transport: science, technology, management*, 1994, no. 1, pp. 17–23. (In Russian)

16. Turanov Kh. T., Sitnikov S. A. & Zyrjancev A. A. Matematicheskoye opisaniye usloviy skatyvaniya vagona po profilyu sortirovochnoy gorki [Mathematical description of the conditions of wagon rolling down the marshalling hump profile]. *Transport: science, technology, management*, 2012, no. 6, pp. 7–12. (In Russian)

17. Turanov Kh. T. & Gordienko A. A. Utochnennyye matematicheskiye modeli skorosti skatyvaniya vagona po uklonu gorki pri vozdeystvii sily tyazhesti i poputnogo vetra [Corrected mathematical models of speed of wagon rolling down the hump under the effects of gravity and wind]. *Transport: science, technology, management*, 2015, no. 1, pp. 15–21. (In Russian)

18. Turanov Kh. T., Gordienko A. A. & Jabborov Sh. B. K kriticheskomu analizu teoreticheskikh polozheniy dvizheniya vagona s sortirovochnoy gorki [For critical analysis of theoretical positions of wagon movement from marshalling hump]. *Transport: science, technology, management,* 2018, no. 11, pp. 26–31. (In Russian)

19. Pravdin N. V. & Bessonenko S. A. Raschet parametrov sortirovochnoy gorki s uchetom sluchaynykh khodovykh svoystv ottsepov [Determination of marshalling hump parameters considering random properties of wagon cuts]. *Transport: science, technology, management*, 2007, no. 7, pp. 8–15. (In Russian)

20. Bessonenko S. A. Printsipy optimizatsii parametrov sortirovochnykh gorok [The optimization approach to marshalling hump parameters]. *Transport: science, technology, management*, 2010, no. 5, pp. 17–20. (In Russian)

21. Bessonenko S. A. Veroyatnostnyy podkhod k raschetu sortirovochnykh gorok [The probabilistic approach to marshalling hump calculation]. *Transport: science, technology, management*, 2010, no. 7, pp. 17–19. (In Russian)

22. Kornienko K. I. Algoritm rascheta tochki ostanovki ottsepa v sortirovochnom parke [Algorithm for calculating the stopping point of a wagon cut in the marshalling yard]. *Transport: science, technology, management*, 2017, no. 11, pp. 36–40. (In Russian)

23. Osipov D. V. Analiticheskiy metod rascheta polozheniya odnovagonnykh ottsepov na pereval'noy chasti sortirovochnykh gorok v moment ikh otryva ot sostava [Analytical method of calculation of single-wagon cuts positioning on the marshalling hump crest at the moment of their separation from the train]. *Nauchnyye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka* [*Scientific Problems of Transport of Siberia and the Far East*], 2010, no. 2, pp. 9–13. (In Russian)

24. Osipov D. V. & Klimov A. A. Metodika otsenki kachestva prodol'nogo profilya pereval'noy chasti sortirovochnoy gorki [A method to evaluate longitudinal profile quality of gravity part of marshalling hump]. *Transport Urala*, 2015, no. 4 (47), pp. 63–68. (In Russian)

25. Osipov D. V. & Klimov A. A. Vliyaniye prodol'nogo profilya pereval'noy chasti sortirovochnoy gorki na pererabatyvayushchuyu sposobnost' [Impact of longitudinal profile of gravity part of marshalling hump on processing capacity]. *Transport Urala*, 2016, no. 4 (51), pp. 71–76. (In Russian)

Received: April 17, 2019
Accepted: April 26, 2019

Author's information:
Vladimir I. SMIRNOV – Dr. Sci. in Technics, Professor, vsmirnov1@gmail.com
Sergey A. VIDYUSHENKOV – PhD in Technics, Associate Professor, baklava@mail.ru
Anna S. KUKHAREVA – PhD in Physics and Mathematics Sciences, Associate Professor, kukhareva@pgups.ru

УДК 621.313.33

Диагностирование и моделирование несимметричных режимов асинхронных тяговых электродвигателей локомотивов с применением искусственных нейронных сетей

О. Р. Хамидов

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

Для цитирования: *Хамидов О. Р.* Диагностирование и моделирование несимметричных режимов асинхронных тяговых электродвигателей локомотивов с применением искусственных нейронных сетей // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2019. – Т. 16, вып. 2. – С. 251–262. DOI: 10.20295/1815-588X-2019-2-251-262

Аннотация

Цель: Диагностика асинхронных тяговых двигателей (АТЭД) с короткозамкнутым ротором. **Методы:** Применяются искусственные нейронные сети для оценки технического состояния АТЭД локомотивов. Аналитически исследована математическая модель локомотивных асинхронных электродвигателей в трехфазной системе координат, которая позволяет максимально достоверно описать физические процессы в статорных обмотках при повреждении обмоток и «беличьей клетке» ротора АТЭД. **Результаты:** Предложена математическая модель АТЭД с короткозамкнутым ротором. Анализируются неисправности АТЭД с короткозамкнутым ротором. Показано, что одной из наиболее динамично развивающихся является технология нейросетевых структур для диагностирования АТЭД, которые обладают рядом важных положительных свойств, таких как быстродействие, обучаемость, аппроксимационные свойства и т. д. Рассмотрены основные достоинства локомотивного АТЭД с короткозамкнутым ротором. Представлено описание математической модели нейронной сети прямого распространения, а также обоснована целесообразность упреждающей диагностики, которая дает возможность заблаговременно выявить дефекты на самой ранней стадии их развития. **Практическая значимость:** Полученные результаты с помощью программной среды MATLAB/Simulink 2018b позволяют анализировать несимметричные режимы переменных состояний АТЭД.

Ключевые слова: Математический модель, диагностика, асинхронный тяговый электродвигатель, современные методы, нейронные сети, неисправности.

Введение

В настоящее время на современном тяговом подвижном составе в качестве тягового привода применяются трехфазные асинхронные тяговые электродвигатели (АТЭД) с короткозамкнутым ротором. По сравнению с тяговыми электродвигателями постоянного тока локомотивный АТЭД с короткозамкнутым ротором отличается некоторыми особенностями. К ним относятся: простота в эксплуатации электродвигателя; значительная мощность при одинаковых габаритах с двигателем постоянного тока; увеличенный срок службы; повышенная надежность, сниженная стоимость жизненного цикла АТЭД локомотива; возможность электрического рекуперативного – реостатного торможения до остановки; увеличенная весовая норма поезда.

Локомотивные АТЭД на практике показывают свои выносливость и простоту по эксплуатации. Однако в процессе эксплуатации могут возникать повреждения элементов двигателя, что, в свою очередь, вызывает преждевременный выход его из строя. В производстве внезапный выход из строя АТЭД может привести

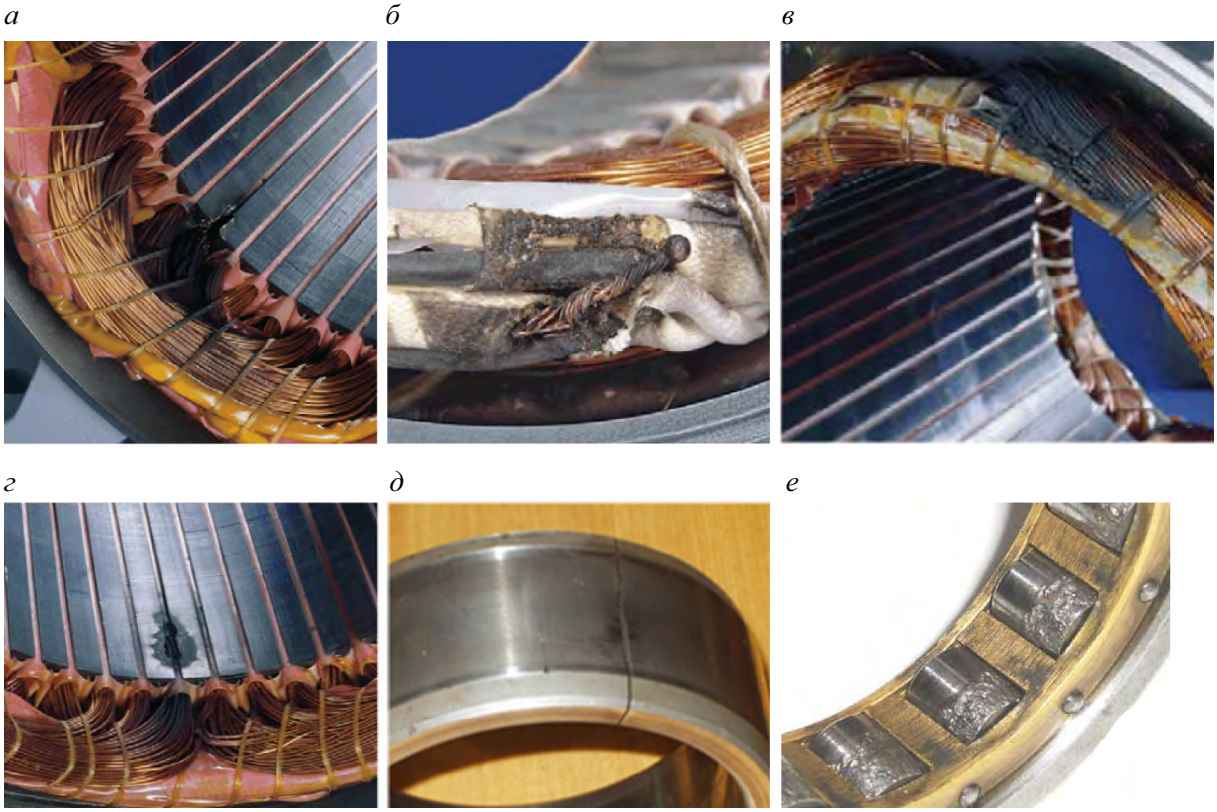


Рис. 1. Неисправности асинхронных двигателей:
а – короткие замыкания между обмоткой и сердечником статора в конце паза статора; *б* – короткое замыкание на проводах; *в* – короткое замыкание между фазами; *г* – короткие замыкания между обмоткой и сердечником статора в середине паза статора; *д* – поперечная трещина на кольце подшипника (результаты воздействия ударной нагрузки); *е* – неравномерное выкрашивание по длине роликов радиального роликоподшипника

к непоправимым последствиям. Очень важно выявлять любой дефект на самой ранней стадии, исключающей риск появления серьезных повреждений АТЭД. Неисправности АТЭД иллюстрирует рис. 1.

АТЭД – это многокомпонентная и сложная электромеханическая система, в которой при эксплуатации все происходящие процессы между собой взаимосвязаны. Учет всех сложных взаимосвязей при исследовании АТЭД с повреждением узлов приводит к необходимости разработки математической модели АТЭД, способной учесть несимметричные аварийные (неисправные) и нормальные режимы работы.

Важным вопросом является математическое описание происходящих в процессе работы АТЭД локомотивов при изучении сложных физических явлений.

Математическое моделирование АТЭД

Представим математическую модель в трехфазной системе координат (рис. 2), которая описывает процесс преобразования электроэнергии в локомотивном АТЭД с короткозамкнутым ротором в переходных и стационарных режимах [1–3].

При построении математической модели АТЭД принимаются следующие допущения:

- напряжения фаз синусоидальны;
- не учитываются потери в стали, вызываемые протеканием вихревых токов в магнитопроводе АТЭД и его перемагничением;
- воздушный зазор АТЭД равномерен;
- энергия магнитного поля сосредоточена в воздушном зазоре АТЭД.

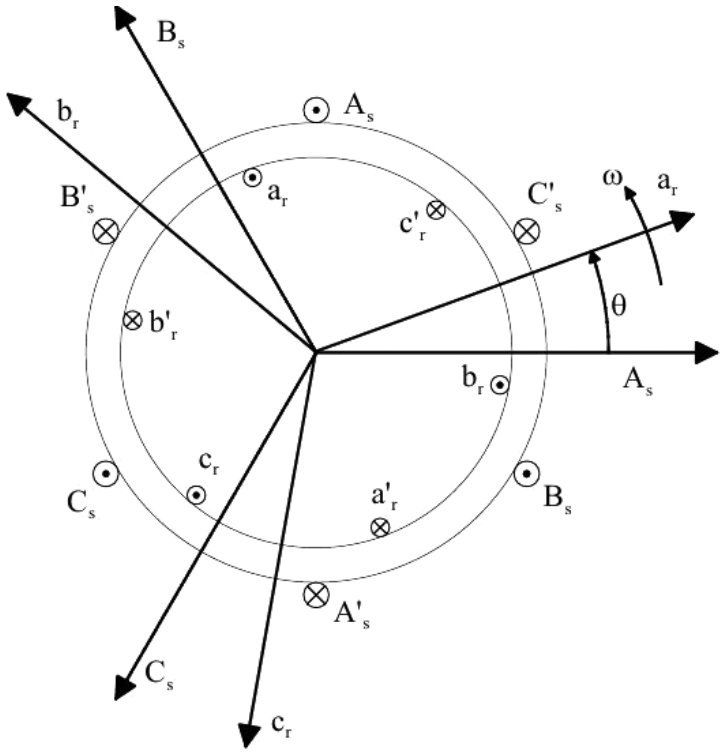


Рис. 2. Упрощенная расчетная схема АТЭД

Матрицы напряжений и токов, а также потокосцепления имеют такой вид [2, 4–6]:

$$[U_S]=[I_S][R_S]+\frac{d}{dt}[\psi_S],$$

$$[U_R]=[I_S][R_S]+\frac{d}{dt}[\psi_S],$$

где

$$[U_S]=\begin{bmatrix}U_{SA}\\U_{SB}\\U_{SC}\end{bmatrix};\ [U_R]=\begin{bmatrix}U_{Ra}\\U_{Rb}\\U_{Rc}\end{bmatrix};\ [I_S]=\begin{bmatrix}I_{SA}\\I_{SB}\\I_{SC}\end{bmatrix};$$

$$[I_R]=\begin{bmatrix}I_{Ra}\\I_{Rb}\\I_{Rc}\end{bmatrix};\ [\psi_s]=\begin{bmatrix}\psi_{SA}\\\psi_{SB}\\\psi_{SC}\end{bmatrix};\ [\psi_R]=\begin{bmatrix}\psi_{Ra}\\\psi_{Rb}\\\psi_{Rc}\end{bmatrix};$$

$$[R_s]=R_s\cdot\begin{bmatrix}1&0&0\\0&1&0\\0&0&1\end{bmatrix};\ [R_r]=R_r\cdot\begin{bmatrix}1&0&0\\0&1&0\\0&0&1\end{bmatrix};$$

R_s, R_r – активное сопротивление статора и ротора соответственно.

Тогда можно написать уравнение в матричном виде

$$[U_{ABCS}]=[I_{ABCS}]\cdot[R_{ABCS}]+\frac{d}{dt}[\psi_{ABCS}],$$

$$[U_{ABCR}]=[I_{ABCR}]\cdot[R_{ABCR}]+\frac{d}{dt}[\psi_{ABCR}],$$

$$\begin{bmatrix}\psi_S\\\psi_R\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}L_{Ss}&L_{SR}\\L_{RS}&L_{Rr}\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}I_S\\I_R\end{bmatrix},$$

$$[L_{Ss}]=\begin{bmatrix}L_{AS}&M_{ABS}&M_{BCS}\\M_{ABS}&L_{BS}&M_{BCS}\\M_{ACS}&M_{BCS}&L_{CS}\end{bmatrix},$$

$$[L_{Rr}]=\begin{bmatrix}L_{ar}&M_{abr}&M_{bcr}\\M_{abr}&L_{br}&M_{bcr}\\M_{acr}&M_{bcr}&L_{cr}\end{bmatrix},$$

здесь L_{AS}, L_{BS}, L_{CS} – индуктивности фазы статора; L_{ar}, L_{br}, L_{cr} – индуктивности фазы ротора; $M_{ABS}, M_{BCS}, M_{ACS}$ – взаимная индуктивность между фазами статора; $M_{abr}, M_{bcr}, M_{acr}$ – взаимная индуктивность между фазами ротора.

Взаимные индуктивности фаз статора с обмотками ротора и обмоток ротора с фазами статора равны

$$[L_{SR}(\theta)] = \begin{bmatrix} L_{SRAa}\cos\theta & L_{SRAb}\cos\left(\theta+\frac{2\pi}{3}\right) & L_{SRAc}\cos\left(\theta-\frac{2\pi}{3}\right) \\ L_{SRAb}\cos\left(\theta-\frac{2\pi}{3}\right) & L_{SRBb}\cos\theta & L_{SRBc}\cos\left(\theta+\frac{2\pi}{3}\right) \\ L_{SRCa}\cos\left(\theta+\frac{2\pi}{3}\right) & L_{SRCb}\cos\left(\theta-\frac{2\pi}{3}\right) & L_{SRCc}\cos\theta \end{bmatrix}$$

– матрица собственных индуктивностей статора;

$$[L_{RS}(\theta)] = \begin{bmatrix} L_{RSAa}\cos\theta & L_{RSAb}\cos\left(\theta-\frac{2\pi}{3}\right) & L_{RSAc}\cos\left(\theta+\frac{2\pi}{3}\right) \\ L_{RSBa}\cos\left(\theta+\frac{2\pi}{3}\right) & L_{RSBb}\cos\theta & L_{RsBc}\cos\left(\theta-\frac{2\pi}{3}\right) \\ L_{RSCa}\cos\left(\theta-\frac{2\pi}{3}\right) & L_{RSCb}\cos\left(\theta+\frac{2\pi}{3}\right) & L_{RsCc}\cos\theta \end{bmatrix}$$

– матрица собственных индуктивностей ротора;

$$L_{Ss} = L_{sl} + L_{sm},\ M_s = -0,5L_{ms},$$

$$L_{Rr} = L_{rl} + L_{rm},\ M_r = -0,5L_{mr}.$$

После этого можно записать уравнения так:

$$[U_{ABCS}] = [R_{ABCS}]\cdot[I_{ABCS}] + [L_s]\frac{d}{dt}[I_{ABCS}] + \\ + [I_{abcr}]\frac{d}{dt}[L_{Sr}(\theta)] + [L_{Sr}(\theta)]\frac{d}{dt}[I_{abcr}],$$

$$[U_{abcr}] = [R_{abcr}]\cdot[I_{abcr}] + [L_r]\frac{d}{dt}[I_{abcr}] + \\ + [I_{ABCS}]\frac{d}{dt}[L_{Rs}(\theta)] + [L_{Rs}(\theta)]\frac{d}{dt}[I_{ABCS}].$$

Электромагнитный момент АТЭД локомотивов равен частной производной по геометрическому углу от общего запаса электромагнитной энергии АТЭД [7, 8]:

$$M_e = -GL_{sr} \times \\ \times \begin{bmatrix} I_{sa}(I_{ra}\sin\theta + I_{ra}\sin(\theta+\frac{2\pi}{3}) + \\ +I_{rc}\sin(\theta-\frac{2\pi}{3})) + \\ +I_{sb}(I_{ra}\sin(\theta-\frac{2\pi}{3}) + I_{rb}\sin\theta + \\ +I_{rc}\sin(\theta+\frac{2\pi}{3})) + \\ +I_{sc}(I_{rb}\sin(\theta+\frac{2\pi}{3}) + \\ +I_{rb}\sin(\theta-\frac{2\pi}{3}) + I_{rc}\sin\theta)) \end{bmatrix}.$$

Тогда общее уравнение движения привода имеет следующий вид:

$$M_e \pm M_c = \frac{\sum J}{Z_p}\cdot\frac{d\omega_r}{dt} + f_v\cdot\omega_r.$$

Моделирование АТЭД в программной среде MATLAB/Simulink

Реализация математической модели АТЭД осуществлялась в программной среде MATLAB/Simulink 2018b. Одной из составных частей библиотеки SimPowerSystem пакета MATLAB/Simulink является библиотека Machines, которая содержит модели электродвигателя постоянного и переменного тока. Перед началом моделирования необходимо задать параметры расчета через меню Simulation/Simulation Parameters.

В качестве исходных использованы параметры ДАТ-350-6 УХЛ1 (для магистрального грузового тепловоза 2 ТЭ25 А), которые приведены в таблице.

На рис. 3 представлена имитационная модель АТЭД, собранного в программной среде MATLAB/Simulink в естественных координатах.

Характеристики АТЭД тепловоза серии 2 ТЭ25 А

Параметры	ДАТ-350-6 УХЛ1
Мощность на валу, кВт	350
Напряжение линейное, В	650/1410
Ток фазы, А	420/165
Ток фазы при трогании, А, не более	470
Частота тока статорная максимальная, Гц	115
Частота вращения (синхронная) максимальная, об/мин	2370
Частота вращения, об/мин	361/2300
Максимальный вращающий момент на валу при трогании, Нм	10493
Мощность в тормозном режиме, кВт	500
КПД, %	92,3
Напор охлаждающего воздуха, Па	1600
Расход охлаждающего воздуха, $м^3/с$	1,2
Масса, кг	2350
Удельная масса, кг/кВт	6,71
Активное сопротивление статора, R_s, Ом	0,0375
Активное сопротивление ротора, R_r, Ом	0,0312
Индуктивности фазы статора, L_{Ss}, Ом	0,1997
Индуктивности фазы ротора, L_{Rr}, Ом	0,1792
Взаимные индуктивности, L_{sm}, Ом	4,148

Известно, что магнитное поле вращающегося ротора работающего АТЭД воздействует на магнитное поле его статорной обмотки, что приводит к периодическим колебаниям электрических величин электродвигателя, таких как потребляемый ток, мощность или напряжение обмотки статора. Период этих колебаний пропорционален частоте вращения ротора. Таким образом, анализируя форму графика сигнала какой-либо из электрических величин, на данном периоде можно обнаружить повреждение в электромеханической части электродвигателя и распознать его вид. Для решения такой проблемы можно использовать различные подходы. Например, можно построить аппроксимационную функцию по нескольким исходным точкам сигнала, соответствующего конкретному виду повреждения, и в процессе диагностики сравнивать текущие измеряемые значения с величиной данной функции с определенной долей погрешности. Однако аппроксимация сложных нелинейных сигналов вызывает большие погрешности, которые усугубляются дополнительными помехами электрической сети с подключенным электродвигателем. В настоящее время широкое распространение получило использование искусственных нейронных сетей (ИНС) для построения математических моделей сложных нелинейных процессов, распознавания образов и прогнозирования сигналов.

Результаты моделирования неисправностей АТЭД в среде MATLAB в дальнейшем будут применены при создании обучающей выборки в технологии ИНС для диагностики АТЭД.

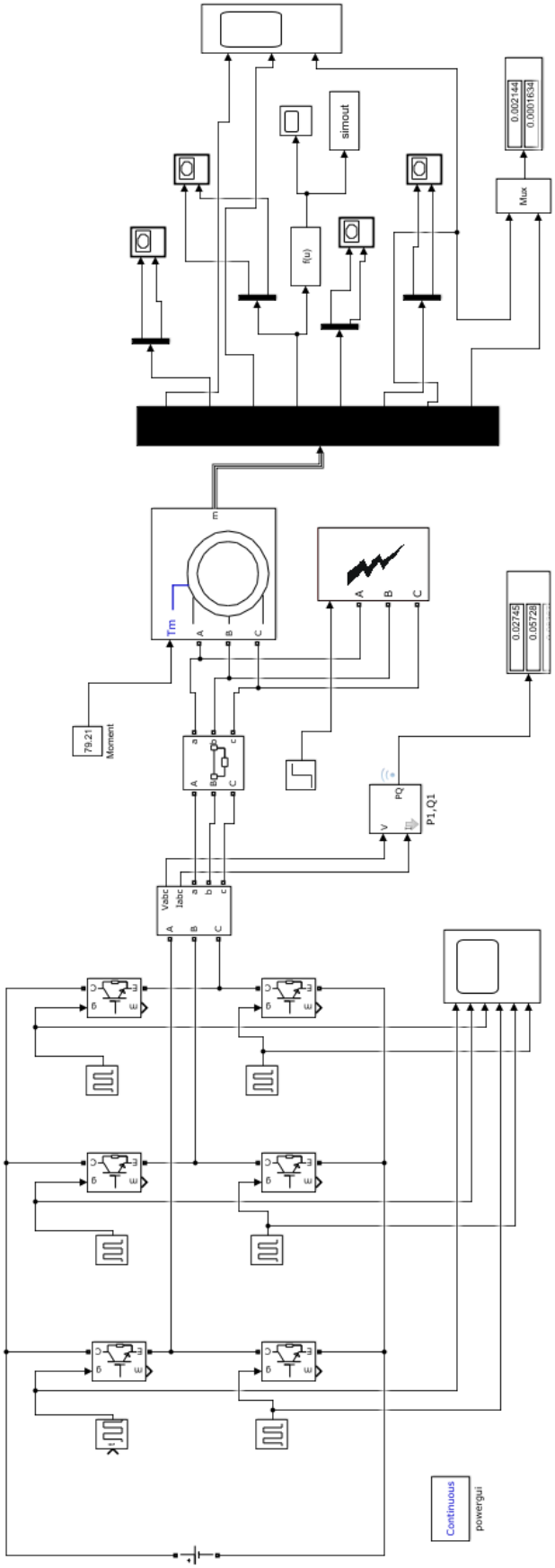


Рис. 3. Моделирование АТЭД в программной среде MATLAB/Simulink 2018b

Описание нейросетевой модели

К наиболее динамично развивающим методам диагностирования относится технология ИНС, которая обладает важными положительными свойствами, такими как быстродействие, обучаемость, хорошие аппроксимационные свойства и др. ИНС дают возможность эффективно определять причину и виды повреждения локомотивных АТЭД, работать с зашумленными данными, избавляя от необходимости применения промежуточных электронных фильтров от помех или фильтрации математическими методами, а также адаптироваться к конкретному типу АТЭД. На рис. 4 представлены структура контроля технического АТЭД на основе применения нейросетевого анализатора.

Математическую модель нейрона можно описать следующим образом:

$$S = \sum_{n=1}^{N} X_n \cdot W_n + b, Y = F(S),$$

где $X_1, X_2, \ldots, X_n$ – входные сигналы нейрона; $W_1, W_2, \ldots, W_n$ – синаптические веса нейронов; b – сдвиг; $F(S)$ – активационная функция; Y – выходной сигнал нейрона.

Диагностика АТЭД локомотивов заключается в решении задачи классификации, когда определяется принадлежность входного набора данных (диагностических признаков) к одному из нескольких заранее известных классов технического состояния АТЭД. Нейросетевая модель для диагностики АТЭД локомотивов приведена на рис. 5.

Для создания анализатора технического состояния АТЭД локомотивов использованы ИНС, служащие эффективным математическим аппаратом для решения задач классификации, аппроксимации, прогнозирования, управления, а также идентификации технических систем.

Для нейронного анализатора АТЭД локомотивов входными данными являются ток, напряжения, угловая скорость, момент сопротивления, оцененные параметры и ошибки предикторов:

$$X = \left[I_A, I_B, I_C, U_A, \mathrm{U}_B, \mathrm{U}_C, \omega, M\right]^T, \quad (20)$$

выходными – определенный класс технического состояния АТЭД локомотивов:

$$Y = \left[Y_1, \mathrm{Y}_2, Y_3, Y_4, Y_5, Y_6\right]^T,$$

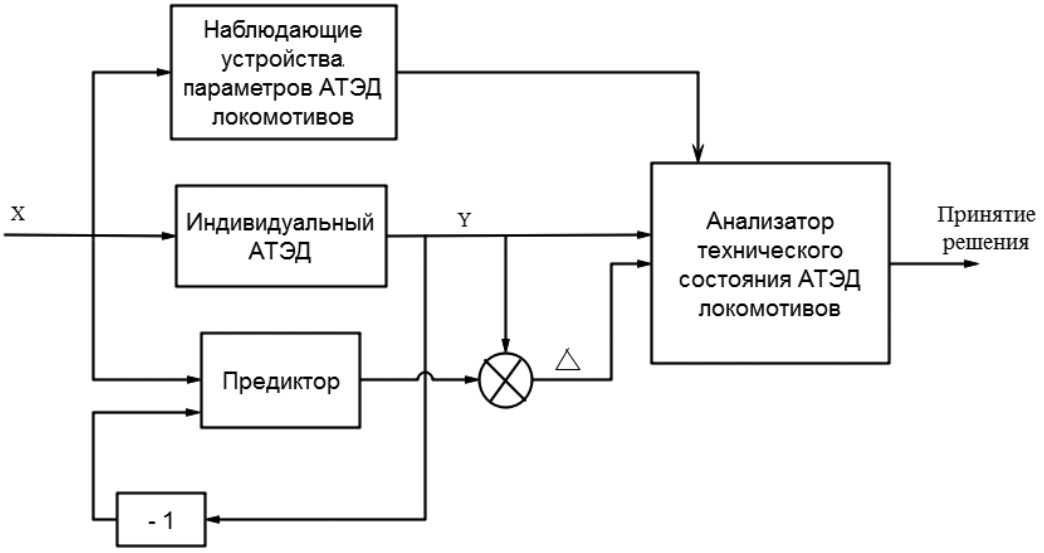


Рис. 4. Структура контроля технического состояния АТЭД

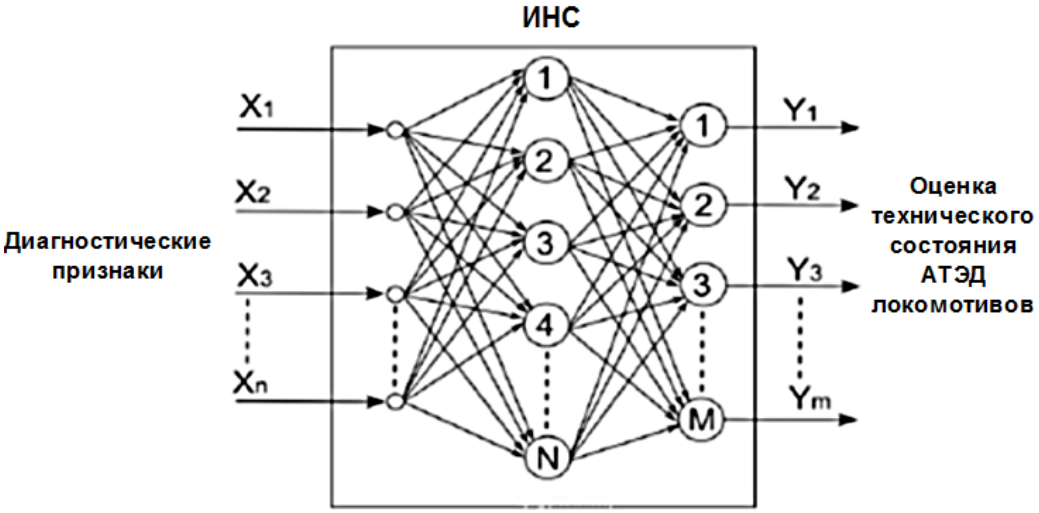


Рис. 5. Нейросетевая модель для оценки технического состояния АТЭД локомотивов

где

$Y = [1 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T$ – исправен;

$Y = [0 \quad 1 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T$ – перегрев;

$Y = [0 \quad 0 \quad 1 \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T$ – обрыв стержней ротора;

$Y = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 1 \quad 0 \quad 0]^T$ – межвитковые замыкания;

$Y = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 1 \quad 0]^T$ – пробой изоляции АТЭД;

$Y = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 1]^T$ – повреждения подшипниковых узлов.

Значения выходных сигналов находятся в диапазоне от 0 до 1, при этом наличие сигнала 1 свидетельствует о том, что нейронная сеть полностью «уверена» в данном режиме. При возникновении неисправности выходной сигнал анализатора, отвечающий за нормальный режим, из состояния 1 становится равным состоянию 0, а сигнал, отвечающий за данную неисправность, наоборот, из состояния 0 – состоянию 1. Также возможны промежуточные значения сигналов, поэтому при определении класса неисправности АТЭД был выбран доверительный интервал – (0,95; 1). Класс неисправности считается достоверно установленным, если значение его выходного сигнала находится в доверительном интервале [9–12].

Для обработки (реализации) полученных данных при выполнении математического моделирования и оценке технического состояния АТЭД локомотивов была применена ИНС пакета программ MATLAB/Simulink. На рис. 6 представлены спектры АТЭД.

Трехфазная модель АТЭД в используемой программной среде позволяет анализировать несимметричные режимы переменных состояния электродвигателя.

Надежность электромагнитной системы АТЭД зависит прежде всего от симметрии магнитного поля, определяемой электрической симметрией обмоток и симметрией воздушных зазоров между ротором и статором, а также от состояния элементов крепления и изоляции электрических обмоток. Несимметрия воздушных зазоров в АТЭД, во-первых, приводит к появлению значительных электромагнитных сил между ротором и статором в зоне пониженного зазора, перегружающих подшипники и снижающих их ресурс. Во-вторых, в этой же зоне может происходить магнитное насыщение зубцов магнитопровода, по которым магнитный поток обходит витки обмотки электродвигателя. В таком случае электродинамические силы начинают действовать непосредственно на обмотки, вызывая ускоренный износ изоляции и элементов крепления обмоток в пазах активного сердечника.

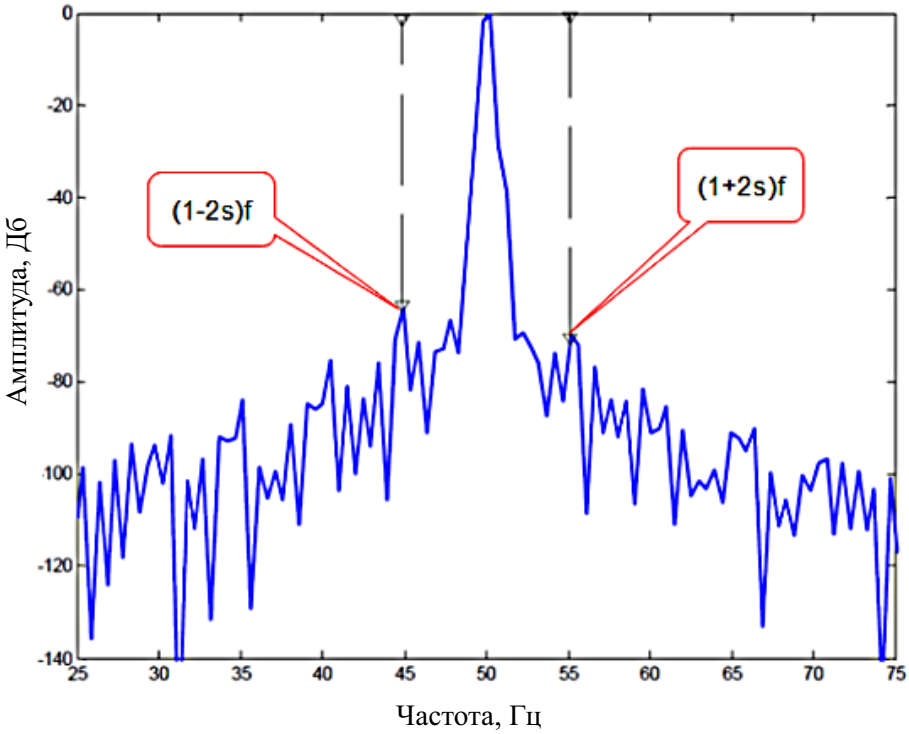


Рис. 6. Спектр АТЭД локомотивов с установленными пороговыми значениями (обрыв стержней)

Заключение

Таким образом, показано, что ИНС являются мощным и доступным инструментом, который способен давать достоверные результаты при технической диагностике АТЭД локомотивов. Представлена математическая модель локомотивного АТЭД в трехфазной системе координат, которая позволяет максимально достоверно описать физические процессы при повреждении АТЭД. С помощью разработанной модели могут быть проведены количественный и качественный анализы электромагнитных и электромеханических процессов в переходных и установившихся режимах работы, исследование динамической механической и рабочих характеристик, анализ спектрального состава и годографов пространственных векторов фазного напряжения и тока АТЭД локомотивов. Задача диагностирования с применением ИНС сводится к выбору типа сети, определению параметров архитектуры и ее обучению.

Библиографический список

1. Хамидов О. Р. Разработка методики комплексного диагностирования асинхронного тягового электродвигателя подвижного состава железнодорожного транспорта / О. Р. Хамидов, О. Т. Касымов // Материалы конференций ГНИИ «Нацразвитие» : сб. избр. статей. – СПб. : ГНИИ «Нацразвитие», 2017. – С. 32–39.

2. Грищенко А. В. Новые электрические машины локомотивов : учеб. пособие для вузов ж.-д. транспорта / А. В. Грищенко, Е. В. Козаченко. – М. : Учеб.-метод. центр по образованию на ж.-д. транспорте, 2008. – 271 с.

3. Хамидов О. Р. Оценка технического состояния асинхронных тяговых электродвигателей электровозов серии «UZ-EL» средствами вибродиагностики / О. Р. Хамидов, О. Т. Касымов // Материалы конференций ГНИИ «Нацразвитие» : сб. избр. статей. – СПб. : ГНИИ «Нацразвитие», 2017. – С. 13–19.

4. Агунов А. В. Использование нейро-нечетких диагностических моделей при оценке технического состояния электрооборудования тепло-

воза / А. В. Агунов, А. В. Грищенко, В. А. Кручек, В. В. Грачев // Электротехника. – 2017. – № 10. – С. 14–18.

5. Брынский Е. А. Неисправности асинхронных электродвигателей и их диагностика : учеб. пособие / Е. А. Брынский, Ю. Л. Преснов. – СПб. : СПбГТУ, 1999. – 68 с.

6. Зарифьян А. А. Динамические процессы в асинхронном тяговом приводе магистральных электровозов : монография / А. А. Зарифьян, Ю. А. Бахвалов. – М. : Маршрут, 2006. – 372 с.

7. Хамидов О. Р. Математическая модель вибровозмущающих сил локомотивного асинхронного электродвигателя / О. Р. Хамидов, М. Н. Панченко // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. – СПб. : ПГУПС, 2013. – Вып. 4 (37). – С. 60–67.

8. Хамидов О. Р. Вибродиагностика повреждения подшипников качения локомотивных асинхронных электродвигателей / О. Р. Хамидов, А. В. Грищенко // VIII Междунар. науч.-технич. конференция «Подвижной состав XXI века : идеи, требования, проекты». Петерб. гос. ун-т путей сообщения, 3–7 июля 2013 г. – СПб. : ПГУПС, 2013. – С. 174–176.

9. Грищенко А. В. Аппарат искусственных нейронных сетей для диагностики современного локомотива / А. В. Грищенко, В. В. Грачев, Ю. В. Бабков, Ю. И. Клименко, С. И. Ким, К. С. Перфильев, М. В. Федотов // Локомотив. – 2012. – № 7. – С. 36–40.

10. Михайлов А. С. Проблемы и перспективы использования искусственных нейронных сетей для идентификации и диагностики технических объектов / А. С. Михайлов, Б. А. Староверов // Вестн. ИГЭУ. – Ивановск : ИГЭУ, 2013. – Вып. 3. – С. 64–66.

11. Kanika G. A review on fault diagnosis of induction motor using artificial neural networks / G. Kanika, K. Arunpreet // Intern. Journal of Scince and Research. – 2014. – Iss. 7. – P. 680–684.

12. Qi Y. Stacked sparse autoencoder-based deep network for fault diagnosis of rotating machinery / Y. Qi, C. Shen, D. Wang, J. Shi, X. Jiang, Z. Zhu // IEEE Access. – 2017. – Vol. 5. – P. 15066–15079.

Дата поступления: 30.04.2019
Решение о публикации: 15.05.2019

Контактная информация:
ХАМИДОВ Отабек Рустамович – канд. техн. наук, докторант, otabek.rustamovich@yandex.ru

Diagnosing and modeling asymmetric modes of locomotive asynchronous traction electric motors using artificial neural networks

O. R. Khamidov

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

For citation: Khamidov O. R. Diagnosing and modeling asymmetric modes of locomotive asynchronous traction electric motors using artificial neural networks. *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2019, vol. 16, iss. 2, pp. 251–262. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2019-2-251-262

Summary

Objective: Diagnosing asynchronous traction electric motors (ATEMs) with a squirrel-cage rotor. **Methods:** Application of artificial neural networks to assess the technical condition of locomotive ATEMs. Analytical study of a mathematical model of locomotive asynchronous traction electric motors in a three-phase coordinate system, which allows most accurately describing the physical processes in the stator windings in case of the damaged windings and the squirrel-cage rotor of the ATEM. **Results:** A mathematical model of an ATEM with a squirrel-cage rotor was proposed. Faults of ATEMs with a squirrel-cage rotor were analyzed. The neural network structures with a number of important benefits, such as speed, learning capability, approximation, etc., were shown to be among the most dynamically developing technologies

for diagnosing ATEMs. The main advantages of a locomotive asynchronous traction electric motor with a squirrel-cage rotor were discussed. A description of the mathematical model of a direct distribution neural network was presented, and the utility of the proactive diagnostics that allows detecting the defects at the earliest stage of their development was substantiated. **Practical importance:** The results obtained using the MATLAB/Simulink 2018b environment make it possible to analyze the asymmetric modes of the asynchronous motor variable states.

Keywords: Mathematical model, diagnostics, asynchronous traction electric motor, modern methods, neural networks, faults.

References

1. Khamidov O. R. & Kasymov O. T. Razrabotka metodiki kompleksnogo diagnostirovaniya asinkhronnogo tyagovogo elektrodvigatelya podvizhnogo sostava zheleznodorozhnogo transporta [Development of method for complex diagnostics of asynchronous traction electric motor for railway rolling stock]. *Materialy konferentsiy GNII "Natsrazvitiye"* [*Proceedings of the conference of the Humanitarian National Research Institute "National Development"*]. Sb. izbr. statey [Selected articles]. Saint Petersburg, GNII "Natsrazvitiye" Publ., 2017, pp. 32–39. (In Russian)

2. Grishchenko A. V. & Kozachenko E. V. *Novyye elektricheskiye mashiny lokomotivov*: ucheb. posobiye dlya vuzov zh. d. transporta [*New electric motors of locomotives*. Training manual for railway transport universities]. Moscow, Uchebno-metodicheskiy tzentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte [Training and Methodology Centre for Railway Transport] Publ., 2008, 271 p. (In Russian)

3. Khamidov O. R. & Kasymov O. T. Otsenka tekhnicheskogo sostoyaniya asinkhronnykh tyagovykh elektrodvigateley elektrovozov serii "UZ-EL" sredstvami vibrodiagnostiki [Assessment of the technical condition of asynchronous traction electric motors of UZ-EL electric locomotives by means of vibrodiagnostics]. *Materialy konferentsiy GNII "Natsrazvitiye"* [*Proceedings of the conference of the Humanitarian National Research Institute "National Development"*]. Sb. izbr. statey [Selected articles]. Saint Petersburg, GNII "Natsrazvitiye" Publ., 2017, pp. 13–19. (In Russian)

4. Agunov A. V., Grishchenko A. V., Kruchek V. A. & Grachev V. V. Ispol'zovaniye neyro-nechetkikh diagnosticheskikh modeley pri otsenke tekhnicheskogo sostoyaniya elektrooborudovaniya teplovoza [The use of neuro-fuzzy diagnostic models in assessing the technical condition of electrical equipment of a diesel locomotive]. *Elektrotekhnika* [*Electrical Engineering*], 2017, no. 10, pp. 14–18. (In Russian)

5. Brynskiy E. A. & Presnov Yu. L. *Neispravnosti asinkhronnykh elektrodvigateley i ikh diagnostika* [*Faults of asynchronous electric motors and their diagnostics*]. Training manual. Saint Petersburg, SPbSTU Publ., 1999, 68 p. (In Russian)

6. Zarif'yan A. A. & Bakhvalov Yu. A. *Dinamicheskiye protsessy v asinkhronnom tyagovom privode magistral'nykh elektrovozov* [*Dynamic processes in asynchronous traction drive of mainline electric locomotives*]. Moscow, Marshrut Publ., 2006, 372 p. (In Russian)

7. Khamidov O. R. & Panchenko M. N. Matematicheskaya model' vibrovozmushchayushchikh sil lokomotivnogo asinkhronnogo elektrodvigatelya [A mathematical model of vibration perturbing forces of a locomotive asynchronous electric motor]. *Proceedings of Petersburg Transport University*. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2013, iss. 4 (37), pp. 60–67. (In Russian)

8. Khamidov O. R. & Grishchenko A. V. Vibrodiagnostika povrezhdeniya podshipnikov kacheniya lokomotivnykh asinkhronnykh elektrodvigateley [Vibration diagnostics of damage to roller bearings of locomotive asynchronous electric motors]. *VIII Mezhdunar. nauch.-tekhnich. konferentsiya "Podvizhnoy sostav XXI veka: idei, trebovaniya, proyekty"* [*8th International Scientific and Technical Conference "Rolling stock of the 21st century: ideas, requirements, projects"*], Petersburg Transport University, July 3–7, 2013. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2013, pp. 174–176. (In Russian)

9. Grishchenko A. V., Grachyov V. V., Babkov Yu. V., Klimenko Yu. I., Kim S. I., Perfil'yev K. S. & Fedotov M. V. Apparat iskusstvennykh neyronnykh setey dlya diagnostiki sovremennogo lokomotiva [System of artificial neural networks for the diagnostics of mo-

dern locomotive]. *Lokomotiv* [*Locomotive*], 2012, no. 7, pp. 36–40. (In Russian)

10. Mikhaylov A. S. & Staroverov B. A. Problemy i perspektivy ispol'zovaniya iskusstvennykh neyronnykh setey dlya identifikatsii i diagnostiki tekhnicheskikh ob"yektov [Problems and prospects of using artificial neural networks for identification and diagnostics of technical objects]. *Vestnik ISPEU* [*Bulletin of ISPEU*]. Ivanovo, IGEU [Ivanovo Power Engineering Institute] Publ., 2013, iss. 3, pp. 64–66. (In Russian)

11. Kanika G. & Arunpreet K. A review on fault diagnosis of induction motor using artificial neural networks. *Journal of Science and Research*, 2014, iss. 7, pp. 680–684.

12. Qi Y., Shen C., Wang D., Shi J., Jiang X. & Zhu Z. Stacked sparse autoencoder-based deep network for fault diagnosis of rotating machinery. *IEEE Access*, 2017, vol. 5, pp.15066–15079.

Received: April 30, 2019
Accepted: May 15, 2019

Author's information:
Otabek R. KHAMIDOV – PhD in Engineering, Postdoctoral Student, otabek.rustamovich@yandex.ru

УДК 629.014.17:629.9

Разработка метода по уменьшению лобового аэродинамического сопротивления капсулы трубопроводного транспорта

К. К. Ким, И. Р. Крон, Я. С. Ватулин, Е. Я. Ватулина

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

Для цитирования: *Ким К. К., Крон И. Р., Ватулин Я. С., Ватулина Е. Я.* Разработка метода по уменьшению лобового аэродинамического сопротивления капсулы трубопроводного транспорта // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2019. – Т. 16, вып. 2. – С. 263–267. DOI: 10.20295/1815-588X-2019-2-263-267

Аннотация

Цель: Разработка метода по уменьшению вредного аэродинамического лобового сопротивления при движении капсулы трубопроводного транспорта с высокой скоростью. **Методы:** Используется среда автоматизированного проектирования «SolidWorks», модуль «Flow Simulation». **Результаты:** Качественно подтверждена гипотеза об уменьшении аэродинамического сопротивления при применении перфорированной лобовой части капсулы и расположенной в ее экипажной части системы динамического отвода воздуха. **Практическая значимость:** Разработанный метод позволит существенно снизить аэродинамическое сопротивление в системе трубопроводного транспорта.

Ключевые слова: Трубопроводный транспорт, аэродинамическое сопротивление, высокоскоростные перевозки, отвод воздуха, крыльчатка.

Трубопроводный транспорт является перспективным решением в области высокоскоростных перевозок. Однако он имеет свои недостатки, которые необходимо учитывать при проектировании. К наиболее существенным недостаткам относится относительно высокое аэродинамическое сопротивление, значительно ограничивающее скорость движения капсулы в трубе [1–7].

При движении капсулы на высоких скоростях в трубе в области перед капсулой образуется избыточное воздушное давление, а за ее кузовом – разрежение. Таким образом, имеет место так называемый поршневой эффект, оказывающий тормозящее воздействие на движущуюся капсулу [8]. Для снижения влияния набегающих воздушных потоков на скорость движения капсулы этого вида транспорта проф. К. К. Кимом, заведующим кафедры «Электротехника и теплоэнергетика» ПГУПСа, было предложено изготовлять головную часть капсулы перфорированной [9]. Отверстия, выполненные в головной части, служат своего рода фильтром для воздушных завихрений, возникающих при высоких скоростях движения и переходе ламинарного характера течения воздуха в турбулентный.

Дальнейший анализ показал, что воздухом, захваченным при помощи таких отверстий, можно устранить разность давлений в передней и задней областях, прилежащих к капсуле, тем самым частично компенсировать негативное влияние поршневого эффекта. Для этого необходимо в кузове установить компрессор, шлангами соединенный с отверстиями в лобовой части, который будет откачивать воздух из передней области и по системе воздухопровода перемещать откачанный воздух

к отверстию, выполненному в задней части капсулы, т. е. подавать его в область разреженного воздуха. Схематично данная разработка представлена на рис. 1 [10].

Для подтверждения такой гипотезы в среде SolidWorks была выполнена упрощенная модель капсулы трубопроводного транспорта, представляющая собой цилиндр со сквозным отверстием, конфигурации, учитывающей реальное взаимодействие воздушных потоков с предложенной системой отвода воздуха. Геометрические параметры выполненного цилиндра со сквозным отверстием переменного по продольному сечению диаметра: длина цилиндра – 5 м; наружный диаметр цилиндра – 2,5 м; минимальный диаметр отверстия (в центральной плоскости, перпендикулярной оси цилиндра) – 460 мм. Также была выполнена труба с размерами: наружный диаметр – 2,7 м, внутренний диаметр – 2,68 м, длина – 30 м. Для имитации компрессора был спроектирован вентилятор, представляющий собой крыльчатку. Наибольший диаметр между лопастями – 280 мм, диаметр пилона – 90 мм, расстояние между центральными точками куполов пилона (длина пилона) – 160 мм. В процессе опытов, производимых с использованием модуля «Flow Simulation», крыльчатка устанавливалась в центральной плоскости, перпендикулярной оси цилиндра (капсулы), и приводилась в движение так, чтобы можно было откачивать воздух из области перед цилиндром, который двигался с крыльчаткой как единая система в трубе с заданными скоростью и частотой вращения вентилятора.

На рис. 2, *а* показано, как распределяются векторы скорости движения воздушных масс (продольное сечение) при движении модели капсулы без установки крыльчатки в наименьшем по диаметру сечении модели капсулы. На нем видно, что в передней области возникают воздушные завихрения, являющиеся источником аэродинамического сопротивления, и скорость воздушного потока в центре сквозного отверстия цилиндра достаточно велика.

На рис. 2, *б* представлены результаты второго опыта, здесь в наименьшем по диаметру сечение цилиндра установлена крыльчатка, отводящая воздух из передней области в заднюю. Из него следует, что движение воздуха в области перед цилиндром приобрело ламинарный характер, т. е. благодаря установленному вентилятору устраняется вредная турбулентность. Также значительно уменьшается скорость в центральной области цилиндра, а в задней возникают выталкивающие завихрения.

В обоих опытах угловая скорость вращения вентилятора устанавливалась равной 100 рад/с.

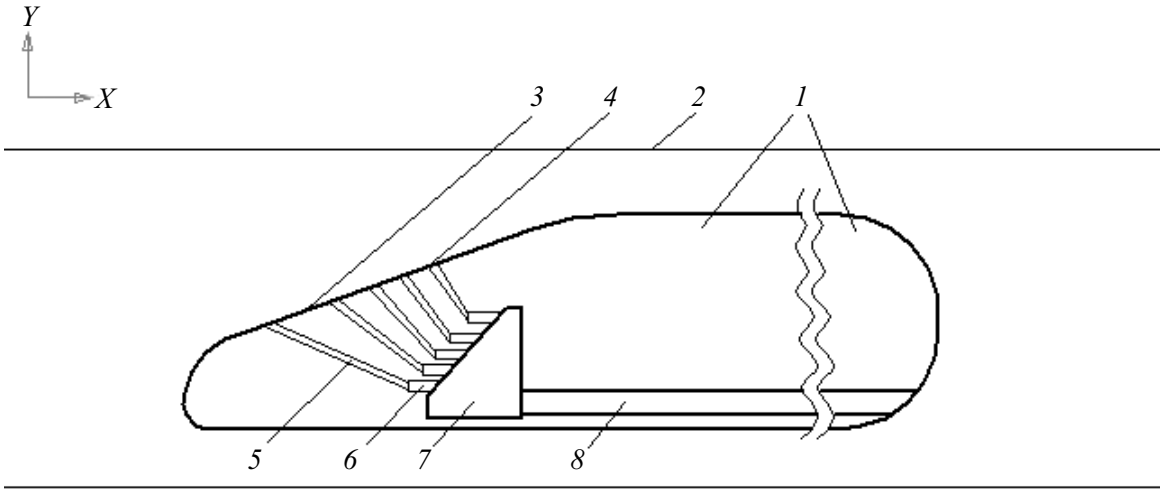
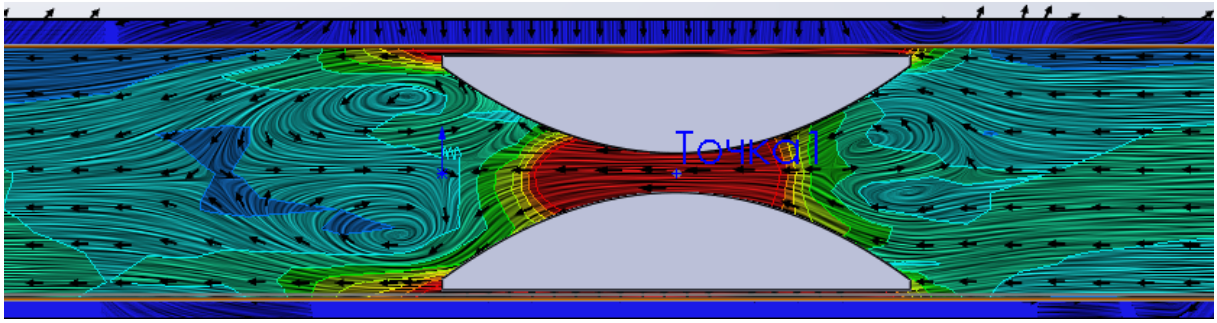


Рис. 1. Схема кузова капсулы трубопроводного транспорта:
1 – корпус; *2* – труба; *3* – лобовая часть; *4* – перфорированные отверстия; *5* – шланги; *6* – входные патрубки; *7* – коллектор с встроенным компрессором; *8* – воздухопровод

а



б

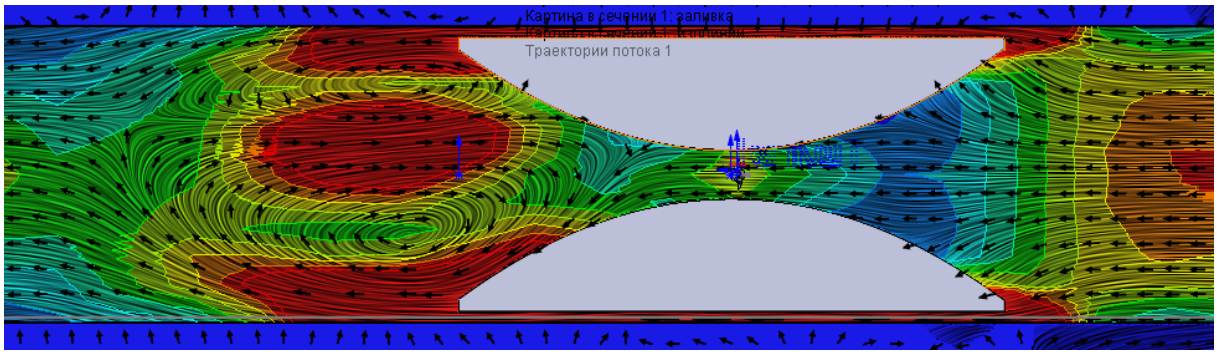


Рис. 2. Первый (без крыльчатки в цилиндре, движение вправо, *а*) и второй (с установленной крыльчаткой, движение вправо, *б*) опыты

С помощью серии выполненных экспериментов с различными скоростями вращения вентилятора удалось качественно подтвердить, что при использовании системы отвода воздуха, состоящей из перфорированной лобовой части кузова вагона трубопроводного транспорта, компрессора и воздухопровода, возможно частично избежать негативных последствий, обусловленных проявлением поршневого эффекта. Разработанный метод позволит существенно снизить аэродинамическое сопротивление в системе трубопроводного транспорта, что положительно повлияет на диапазон реализации возможных скоростей движения.

Библиографический список

1. Ким К.К. Система автоматического управления радиального магнитного подшипника / К.К. Ким, Е.Б. Зазыбина // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2015. – № 1. – С. 30–36.

2. Ким К.К. Процессы диффузии магнитного поля в магнитопровод магнитного подшипника / К.К. Ким, Е.Б. Зазыбина // Учен. зап. КнАГТУ. – 2015. – № I-1 (21). – С. 21–29.

3. Ким К.К. Вариант вакуумной транспортной системы / К.К. Ким // Железнодорожный транспорт. – 2016. – № 12. – С. 67–68.

4. Ким К.К. Метрология и техническое регулирование : учеб. пособие / К.К. Ким, В.Ю. Барбарович, Б.Я. Литвинов. – М. : Маршрут, 2006. – 255 с.

5. Антонов А.Ю. Модель взаимодействия токоприемника с контактным проводом / А.Ю. Антонов, К.К. Ким // Наука и техника транспорта. – 2008. – № 4. – С. 9–12.

6. Ким К.К. Электромеханические процессы на стыках секций путевой структуры линейного синхронного двигателя / К.К. Ким, А.В. Корнух // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. – СПб. : ПГУПС, 2009. – Вып. 2. – С. 187–196.

7. Ким К.К. Сверхпроводниковые электрические машины с магнитным подвесом : монография / К.К. Ким. – Германия : Lambert Academic Publ., 2012. – 173 с.

8. Ким К. К. Проблемы электромагнитного разгона объектов / К. К. Ким // Электричество. – 2007. – № 12. – С. 19–25.

9. Патент № 24670. Российская Федерация, МПК7 B61D17/00, B61D25/00. Кузов головного вагона высокоскоростного поезда / К. К. Ким. – Заявитель и патентообладатель Петерб. гос. ун-т путей сообщения. – № 2001135610/20. – Заявл. 26.12.2001 г. – Опубл. 20.08.2002 г. – Бюл. № 23.

10. Патент № 2677216. Российская Федерация, МПК7 B60L 13/10, B61B 13/08. Система электродинамического подвеса / К. К. Ким, И. Р. Крон, Я. С. Ватулин. – Патентообладатель Петерб. гос. ун-т путей сообщения. – № 2018104370. – Заявл. 05.02.2018 г. – Опубл. 15.01.2019 г. – Бюл. № 2.

Дата поступления: 13.05.2019
Решение о публикации: 31.05.2019

Контактная информация:
КИМ Константин Константинович – доктор техн. наук, профессор, kimkk@inbox.ru
КРОН Игорь Романович – студент, mechenu@icloud.com
ВАТУЛИН Ян Семенович – канд. техн. наук, доцент, yan-roos@yandex.ru
ВАТУЛИНА Екатерина Яновна – аспирант, iglkotik@gmail.com

The development of the method on the reduction of aerodynamic drag of the pipeline transport capsule

K. K. Kim, I. R. Kron, Ya. S. Vatulin, E. Ya. Vatulina

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

For citation: Kim K. K., Kron I. R., Vatulin Y. S., Vatulina E. Ya. The development of the method on the reduction of aerodynamic drag of the pipeline transport capsule. *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2019, vol. 16, iss. 2, pp. 263–267. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2019-2-263-267

Summary

Objective: To develop the method on the reduction of harmful aerodynamic drag during the movement of high-speed capsule of the pipeline transport. **Methods:** The method was developed by means of “SolidWorks” computer-aided design environment, as well as the “Flow Simulation” module. **Results:** The hypothesis on the aerodynamic drag reduction was qualitatively confirmed by using perforated frontal part of the capsule and the system of dynamic air offtake located in the underframe of the capsule. **Practical importance:** The developed method will significantly reduce aerodynamic drag in the pipeline transportation system.

Keywords: Pipeline transport, aerodynamic drag, high-speed transportation, air exhaust, impeller.

References

1. Kim K. K. & Zazibina E. B. Sistema avtomaticheskogo upravleniya radialnogo magnitnogo podshipnika [Automatic control system of a radial magnetic bearing]. *Elektronika i elektrooborudovanie transporta* [*Electronics and transport electrical equipment*], 2015, no. 1, pp. 30–36. (In Russian)

2. Kim K. K. & Zazibina E. B. Processy diffuzii magnitnogo polya v magnitoprovod magnitnogo podshipnika [The processes of diffusion of the magnetic field in the magnetic core of the magnetic bearing]. *Uchenye zapiski KnAGTU* [*Scientific notes of KnAGTU*], 2015, no. I-1 (21), pp. 21–29. (In Russian)

3. Kim K. K. Variant vakuumnoy transportnoy sistemy [The variant of the vacuum transport system].

Zheleznodorozhnyj transport [*Railway transport*], 2016, no. 12, pp. 67–68. (In Russian)

4. Kim K.K., Barbarovich V. Yu. & Litvinov B. Ya. *Metrologiya i tekhnicheskoe regulirovanie*. Uchebnoe posobie [*Metrology and technical regulation*. Textbook]. Moscow, Marshrut Publ., 2006, 255 p. (In Russian)

5. Antonov A.Yu. & Kim K.K. Model vzaimodejstviya tokopriemnika s kontaktnym provodom [Interaction model of a current collector with a contact wire]. *Nauka i tekhnika transporta* [*The science and equipment of transport*], 2008, no 4, pp. 9–12. (In Russian)

6. Kim K.K. & Kornuh A.V. Elektromekhanicheskie protsessy na stykakh sektsiy putevoy struktury lineynogo sinkhronnogo dvigatelya [Electromechanical processes at the junctions of sections of the track structure of a linear synchronous motor]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya* [*Proceedings of Petersburg State Transport University*]. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2009, iss. 2, pp. 187–196. (In Russian)

7. Kim K.K. *Sverkhprovodnikoviye elektricheskiye mashiny s magnitnym podvesom*. Monografiya [*Superconducting electrical machines with magnetic suspension.* Monograph]. Germany, Lambert Academic Publ., 2012, 173 p. (In Russian)

8. Kim K.K. Problemy elektromagnitnogo razgona obiektov [Problems of electromagnetic acceleration of objects]. *Elektrichestvo* [*Electricity*], 2007, no. 12, pp. 19–25. (In Russian)

9. Kim K.K. *Kuzov golovnogo vagona vysokoskorostnogo poezda* [*The body of the head car of a high-speed train*]. Patent RF, no. 24670, 2002. Petersburg State Transport University, no. 2001135610/20. Declare 26.12.2001. Publ. 20.08.2002. Bull. no. 23. (In Russian)

10. Kim K.K., Kron I.R. & Vatulin Ya.S. *Sistema elektrodinamicheskogo podvesa* [*Electrodynamic suspension system*]. Patent RF, no. 2677216, 2019. Petersburg State Transport University, no. 2018104370. Declare 05.02.2018. Publ. 15.01.2019. Bull. no. 2. (In Russian)

Received: May 13, 2019
Accepted: May 31, 2019

Author's information:
Konstantin K. KIM – D. Sci. in Engineering, Professor, kimkk@inbox.ru
Igor R. KRON – Student, mechenu@icloud.com
Yan S. VATULIN – PhD in Engineering, Associate Professor, yan-roos@yandex.ru
Ekaterina Y. VATULINA – Postgraduate Student, iglkotik@gmail.com

УДК 004.5+629.423.3

Совершенствование контроля узлов механической части электрического подвижного состава применением интеллектуальной системы тепловизионного контроля

А. Е. Цаплин, В. А. Васильев, С. А. Фомин

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

Для цитирования: *Цаплин А. Е., Васильев В. А., Фомин С. А.* Совершенствование контроля узлов механической части электрического подвижного состава применением интеллектуальной системы тепловизионного контроля // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2019. – Т. 16, вып. 2. – С. 268–274. DOI: 10.20295/1815-588X-2019-2-268-274

Аннотация

Цель: Совершенствование контроля узлов механической части электрического подвижного состава благодаря внедрению современных технических средств на основе методик тепловизионного контроля. Применение тепловизоров при контроле узлов механической части электрического подвижного состава позволит значительно повысить безопасность движения, что является актуальной задачей. **Методы:** Использована неохлаждаемая микроболометрическая матрица при создании корпуса с применением 3D-печати с программным обеспечением среды визуального программирования LabView. **Результаты:** Разработана интеллектуальная система тепловизионного контроля. Аппаратная часть системы выполнена с применением технологии 3D-печати, программная часть, благодаря наличию модуля Vision, дает возможность реализовать распознавание образов, что полностью автоматизирует процесс контроля различных узлов механической части электрического подвижного состава. В разработанном макете используется программное обеспечение в среде LabView, которое разделено на 3 части в рамках одного проекта: код для программируемой логической интегральной схемы (LabView FPGA), код для системы реального времени (LabView Real-Time) и код операционной системы Windows. **Практическая значимость:** Интеллектуальная система тепловизионного контроля позволяет бесконтактно определять тепловое состояние узлов механической части электрического подвижного состава с возможностью прогнозирования остаточного ресурса оборудования в режиме реального времени.

Ключевые слова: Тепловизионный контроль, механическая часть, подвижной состав, интеллектуальная система, неразрушающий контроль.

Введение

Успехи, достигнутые за последние 25 лет в освоении инфракрасного диапазона электромагнитного спектра, привели к созданию разнообразной информационной аппаратуры, в частности, тепловизоров – устройств, предназначенных для наблюдения объектов по их собственному инфракрасному излучению. Предшественники тепловизоров – теплогенераторы – были способны только обнаруживать теплоизлучающие объекты и определять на них направление. По мере развития теплопеленгенераторов появилась возможность использовать их не только для указанных целей, но и для визуального наблюдения распределения температуры теплоизлучающих объектов и их опознания. Так совершился логический

переход от теплогенераторов к тепловизорам. Возможность тепловизоров дистанционно оценивать температурные поля в реальном масштабе времени и без каких-либо нарушений тепловой среды, неизбежных при применении контактных датчиков температуры, вызвала широкое внедрение тепловизоров в различные области промышленного производства и научные исследования [1–3].

Физические основы тепловизионного контроля

Все тела, температура которых отличается от абсолютного нуля, являются источниками инфракрасного излучения. Характер излучения зависит от агрегатного состояния вещества.

Инфракрасное излучение – часть оптического излучения и занимает в спектре электромагнитных волн диапазон, характеризуемый длинами волн от 0,76 до 1000 мкм, – весьма протяженную спектральную область, примыкая с одной стороны к видимому излучению, а с другой – к электромагнитным колебаниям радиодиапазона. Инфракрасную область спектра принято делить на четыре части: ближнюю (λ = 0,76–3 мкм), среднюю (λ = 3–6 мкм), дальнюю (λ = 6–15 мкм) и очень далекую (λ = 15–1000 мкм).

Инфракрасное излучение так же, как и видимый свет, распространяется в однородной среде по прямой линии, подчиняется закону обратных квадратов, способно отражаться, преломляться, претерпевать дифракцию, интерференцию и поляризацию. Скорость распространения инфракрасных лучей равна скорости света.

В отличие от изображений в видимой и ближней инфракрасных областях спектра, полученных за счет отраженного излучения объекта и различий в отражательной способности его элементов и отражающего фона, тепловые (инфракрасные) изображения создаются за счет собственного теплового излучения объекта и обусловливаются различиями в температуре и излучательной способности его элементов и окружающего фона. Изменения температуры поверхности излучения объекта в определенной мере соответствуют деталям визуально наблюдаемой картины, по этой причине создаваемые тепловизором изображения в основном отвечают представлениям о форме и размерах рассматриваемых объектов.

В настоящее время широкое распространение получили полупроводниковые болометры. Полупроводниковый болометр – это прибор, предназначенный для индикации и измерения теплового излучения (оптического или инфракрасного диапазона частот электромагнитного излучения).

Для характеристики болометров используют следующие параметры:

1) сопротивление активного термистора болометра при комнатной температуре;

2) рабочее напряжение;

3) чувствительность при определенной частоте модуляции лучистого потока, равная отношению полезного сигнала, снимаемого с болометра на вход усилителя, к мощности излучения, падающего на болометр;

4) порог чувствительности, численно равный мощности излучения, которая вызывает сигнал, эквивалентный уровню собственных шумов болометра, т. е. порог чувствительности зависит от минимальной мощности излучения, которую при данных условиях способен зарегистрировать болометр;

5) постоянная времени, характеризующая тепловую инерционность активного термистора;

6) уровень собственных шумов.

После создания первых тепловизоров длительное время считалось достаточным качественное наблюдение теплоизлучающих объектов. Затем появилась необходимость количественного измерения температуры объектов по получаемым термограммам. В настоящее время применение тепловизоров для дистанционного измерения температурных полей является одним из важных приложений тепловидения, используемых при неразрушающем контроле различных объектов [4–8].

Создание интеллектуальной системы тепловизионного контроля

Механические узлы технических средств электрического подвижного состава в процессе эксплуатации подвержены физическому износу, что приводит к дополнительным затратам на эксплуатацию и ремонт подвижного состава. При этом важное значение для безопасности движения имеет осуществление качественной и своевременной дефектоскопии узлов и деталей механической части подвижного состава.

Использование тепловизоров при контроле узлов механической части электрического подвижного состава позволит значительно повысить безопасность движения, что является актуальной задачей [9–13].

На кафедре «Электрическая тяга» ПГУПС совместно с американской компанией «National Instruments» разработан макет интеллектуальной системы тепловизионного контроля узлов механической части электрического подвижного состава.

Основным ее компонентом стала программируемая инфракрасная камера на базе встраиваемой системы sbRIO-9651 (SOM) [14].

Данная система (рис. 1) идеально подходит для работы с цифровыми сигналами, обладает малыми размерами и большой вычислительной мощностью. Она имеет программируемую логическую интегральную схему Xilinx Zynq-7000, 2-ядерный процессор ARM Cortex-A9 667 MHz, 512 MB памяти DDR3 и 512 MB SLC NAND Flash. Для программирования SOM не нужно применять программаторов, а также на ней уже реализованы все популярные интерфейсы (Ethernet, USB и т. д.).

Важнейшим компонентом любой цифровой камеры является ее матрица. В настоящее время имеются два типа матриц для камер, работающих в дальнем инфракрасном диапазоне (8–14 мкм) – охлаждаемые и неохлаждаемые. Использование охлаждаемых матриц оправдано в системах, где необходимы высокие разрешающая способность и чувствительность, однако их стоимость высокая и они нуждаются в системах охлаждения на жидком азоте.

В свою очередь, неохлаждаемые микроболометрические матрицы, хотя и обладают более низким разрешением и чувствительностью 50 мК против 20 мК у охлаждаемых, но они дешевле и просты в эксплуатации, поэтому для создания программируемой инфракрасной камеры использована именно такая матрица (рис. 2).

В разработанном макете применяется программное обеспечение в среде LabView, которое разделено на 3 части в рамках одного проекта: код для программируемой логической интегральной схемы (LabView FPGA), код для си-

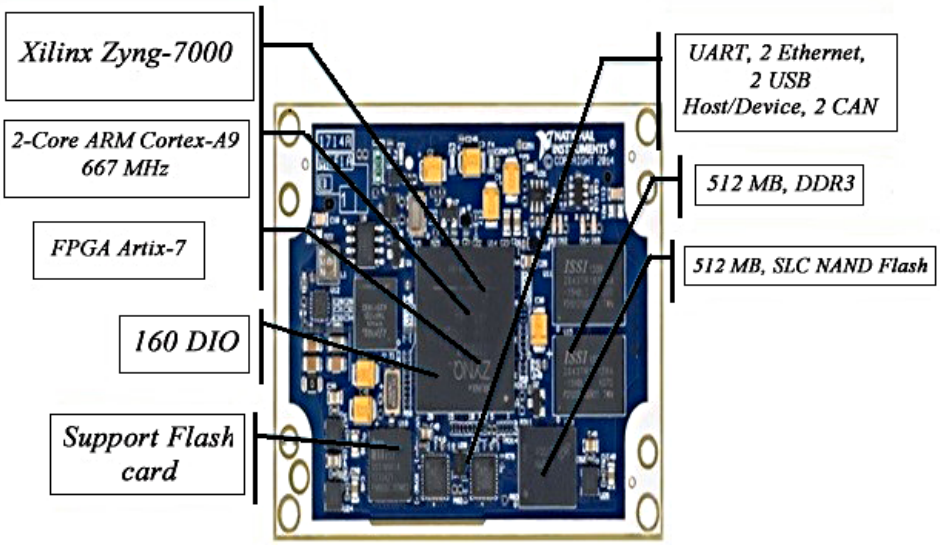


Рис. 1. Встраиваемая система sbRIO-9651 (SOM)

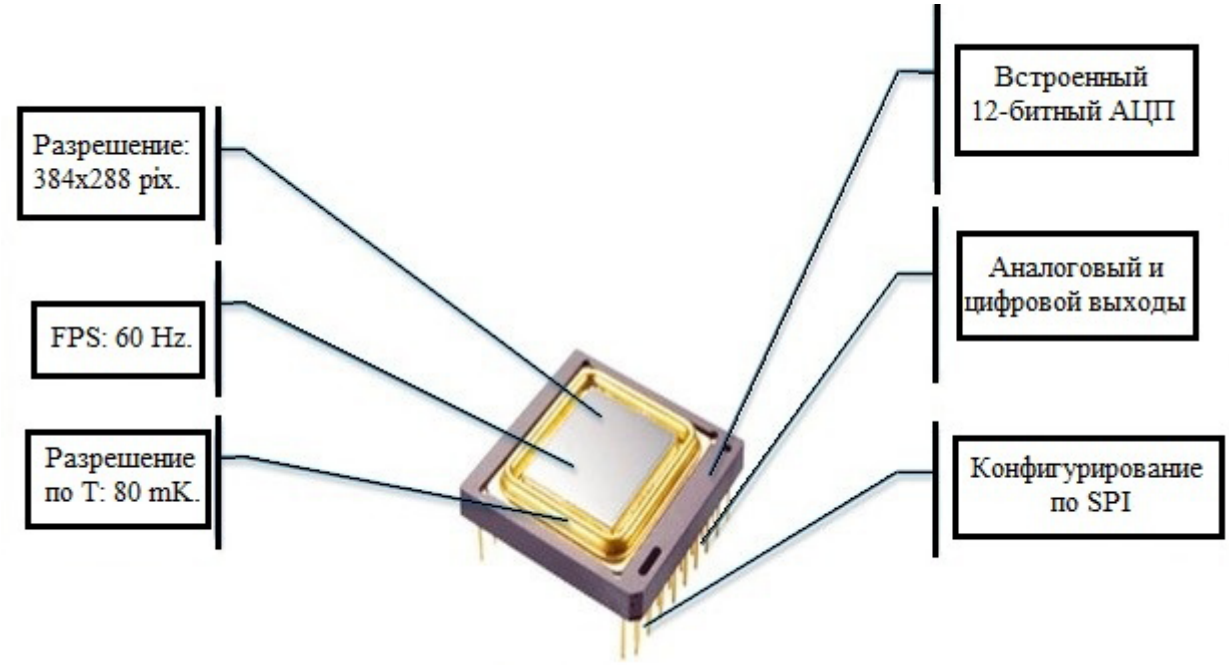


Рис. 2. Микроболометрическая матрица UL-03362-040 (АЦП – аналогово-цифровой преобразователь, SPI – последовательный периферийный интерфейс)

стемы реального времени (LabView Real-Time) и код операционной системы Windows [15, 16].

Благодаря наличию в LabView модуля Vision FPGA, можно получать изображение и работать с ним на программируемой логической интегральной схеме, что значительно увеличивает производительность и разгружает процессор, позволяя полностью отказаться от обработки изображения на Real-Time. При этом код выполняет лишь стриминг изображения на персональный компьютер, где производится его визуализация.

Аппаратная часть системы создана с применением технологии 3D-печати, программная часть, благодаря наличию модуля Vision, дает возможность реализовать распознавание образов, что полностью автоматизирует процесс контроля различных узлов механической части электрического подвижного состава.

Заключение

Разработанное программное обеспечение позволяет бесконтактно определять тепловое состояние узлов механической части электрического подвижного состава с возможностью прогнозирования остаточного ресурса оборудования в режиме реального времени.

Библиографический список

1. Зеленченко А. П. Диагностические комплексы электрического подвижного состава : учеб. пособие / А. П. Зеленченко, Д. В. Федоров. – М. : Учеб.-метод. центр по образованию на ж.-д. транспорте, 2014. – 112 с.

2. Зеленченко А. П. Техническая диагностика электрического подвижного состава : учеб. пособие / А. П. Зеленченко, И. А. Ролле, А. Е. Цаплин. – СПб. : ПГУПС, 2016. – 68 с.

3. Зеленченко А. П. Надежность электроподвижного состава : учеб. пособие / А. П. Зеленченко, И. А. Ролле, А. Е. Цаплин. – СПб. : ПГУПС, 2014. – 36 с.

4. Афонин А. В. Инфракрасная термография в энергетике : в 2 т. Т. 1. Основы инфракрасной термографии / А. В. Афонин, Р. К. Ньюпорт, В. С. Поляков

и др. ; под ред. Р.К. Ньюпорта, А.И. Таджибаева. – СПб. : Изд-во ПЭИПК, 2000. – 240 с.

5. Ллойд Дж. Системы тепловидения / Дж. Ллойд ; пер. с англ. Н.В. Васильченко ; под ред. А.И. Горячева. – М. : Мир, 1978. – 414 с.

6. Бажанов С.А. Тепловизионный контроль электрооборудования в эксплуатации / С.А. Бажанов. – М. : НТФ «Энергопрогресс», 2005. – Вып. 5 (77), ч. 1. – 80 с.

7. Бажанов С.А. Тепловизионный контроль электрооборудования в эксплуатации / С.А. Бажанов. – М. : НТФ «Энергопрогресс», 2005. – Вып. 6 (78), ч. 2. – 64 с.

8. Госсорг Ж. Инфракрасная термография. Основы, техника, применение / Ж. Госсорг ; пер. с фр. Н.В. Васильченко ; под ред. Л.Н. Курбатова. – М. : Мир, 1988. – 399 с.

9. Козлов Е.Е. Рекомендации по тепловизионному контролю / Е.Е. Козлов // Электрооборудование : эксплуатация и ремонт. – 2015. – № 5–6. – С. 12–18.

10. Нестерин В.А. Применение методов тепловизионного обследования при профилактическом контроле электрооборудования / В.А. Нестерин, В.С. Генин, А.М. Акимов, Д.Н. Афанасьев // Труды Академии электротехнич. наук Чувашской Республики. – 2001. – № 1. – С. 18–23.

11. Основные положения методики инфракрасной диагностики электрооборудования и ВЛ. РД 153-34.0-20.363. – М. : Департамент стратегии развития и научно-технической политики РАО ЕЭС России, 1999. – 78 с.

12. Хренников А.Ю. Тепловизионный контроль электротехнического оборудования и опыт диагностики силовых трансформаторов / А.Ю. Хренников, А.В. Рубцов, В.В. Щербаков, С.А. Языков // Электрические станции. – 2006. – № 5. – С. 63–67.

13. Володин А.И. Тепловизионный контроль технического состояния узлов подвижного состава / А.И. Володин, О.В. Балагин, В.К. Фоменко // Наука и техника транспорта. – 2009. – № 1. – С. 73–77.

14. NI sbRIO-9651. System on Module. Carrier Board Design Guide. – National Instruments Corporation. 2017. – 76 p.

15. LabView user manual. – National Instruments Corporation. 2003. – 456 p.

16. LabView measurements manual. – National Instruments Corporation. 2003. – 256 p.

Дата поступления: 12.04.2019
Решение о публикации: 24.04.2019

Контактная информация:
ЦАПЛИН Алексей Евгеньевич – канд. техн. наук, доцент, tsaplin.alexey@mail.ru
ВАСИЛЬЕВ Виталий Алексеевич – канд. техн. наук, доцент, ralagj@mail.ru
ФОМИН Сергей Анатольевич – аспирант, fomin.s@metro.spb.ru

Improving the monitoring of mechanical elements of electric rolling stock by application of the intelligent thermal imaging system

A. E. Tsaplin, V. A. Vasiliev, S. A. Fomin

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

For citation: Tsaplin A.E., Vasiliev V.A., Fomin S.A. Improving the monitoring of mechanical elements of electric rolling stock by application of the intelligent thermal imaging system. *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2019, vol. 16, iss. 2, pp. 268–274. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2019-2-268-274

Summary

Objective: Improving the control of mechanical elements of electric rolling stock through the introduction of modern technical means based on thermal imaging techniques. The use of thermal imagers in the monitoring of mechanical elements of electric rolling stock will significantly improve traffic safety,

which is a relevant objective. **Methods:** An uncooled microbolometric matrix was used when creating a case using 3D printing with LabView visual programming software. **Results:** An intelligent system for thermal imaging was developed. The hardware part of the system is made using 3D printing, the software part, due to the Vision module, makes it possible to implement pattern recognition, which fully automates the monitoring of various mechanical elements of electric rolling stock. The developed layout uses LabView software, which is divided into 3 parts within one project: code for a programmable logic integrated circuit (LabView FPGA), code for a real-time monitoring system (LabView Real-Time), and Windows code. **Practical importance:** Intelligent thermal imaging system provides for contactless determination of the thermal condition of mechanical elements of electric rolling stock with the ability to predict the residual life of the equipment in real time.

Keywords: Thermal imaging, mechanical part, rolling stock, intelligent system, non-destructive inspection.

References

1. Zelenchenko A.P. & Fedorov D.V. *Diagnosticheskiye kompleksy elektricheskogo podvizhnogo sostava.* Ucheb. posobiye [*Diagnostic complexes of electric rolling stock.* Training manual]. Moscow, Uchebno-metodicheskiy tzentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte [Training and Methodical Center for Education in Railway Transport] Publ., 2014, 112 p. (In Russian)

2. Zelenchenko A.P., Rolle I.A. & Tsaplin A.E. *Tekhnicheskaya diagnostika elektricheskogo podvizhnogo sostava.* Uchebn. posobiye [*Technical diagnostics of electric rolling stock*. Training manual]. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2016, 68 p. (In Russian)

3. Zelenchenko A.P., Rolle I.A. & Tsaplin A.E. *Nadezhnost' elektropodvizhnogo sostava*. Uchebn. posobiye [*Reliability of electric rolling stock*. Training manual]. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2014, 36 p. (In Russian)

4. Afonin A.V., Newport R.K., Polyakov V.S. et al. *Infrakrasnaya termografiya v energetike.* V 2 t. *T. 1. Osnovy infrakrasnoy termografii* [*Infrared thermography in the energy sector.* In 2 vol. *Vol. 1. Basics of infrared thermography*]. Eds by R.K. Newport, A.I. Tadzhibayev. Saint Petersburg, PEIPK Publ., 2000, 240 p. (In Russian)

5. Lloyd J. *Sistemy teplovideniya* [*Thermal imaging systems*]. Translated from English by N.V. Vasil'chenko, ed. by A.I. Goryachev. Moscow, Mir Publ., 1978, 414 p. (In Russian)

6. Bazhanov S.A. *Teplovizionnyj kontrol' elektrooborudovaniya v ekspluatacii* [*Thermovision control of electrical equipment in operation*]. Moscow, Energyprogress Publ., 2005, iss. 5(77), ch. 1, 80 p. (In Russian)

7. Bazhanov S.A. *Teplovizionnyj kontrol' elektrooborudovaniya v ekspluatacii* [*Thermovision control of electrical equipment in operation*]. Moscow, Energyprogress Publ., 2005, iss. 6(78), ch. 2, 64 p. (In Russian)

8. Gaussorgues G. *La thermographie infrarouge. Principes, technologies, applications* [*Infrared thermography. The basics, methods, application*]. Translated from French by N.V. Vasil'chenko, ed. by L.N. Kurbatova. Moscow, Mir Publ., 1988, 399 p. (In Russian)

9. Kozlov E.E. Rekomendatsii po teplovizionnomu kontrolyu [Recommendations for thermal imaging]. *Elektrooborudovaniye: ekspluatatsiya i remont* [*Electrical equipment: operation and repair*], 2015, no. 5–6, pp. 12–18. (In Russian)

10. Nesterin V.A., Genin V.S., Akimov A.M. & Afanas'yev D.N. Primeneniye metodov teplovizionnogo obsledovaniya pri profilakticheskom kontrole elektrooborudovaniya [Application of thermal imaging methods for preventive control of electrical equipment]. *Proceedings of the Academy of Electrical Sciences of the Chuvash Republic*, 2001, no. 1, pp. 18–23. (In Russian)

11. Osnovnye polozenia metodiki infrakrasnoy diagnostiki electrooborydovania i VL. RD 153-34.0-20.363 [*Main provisions of the method for infrared inspection of electrical equipment and overhead lines. RD 153-34.0-20.363*]. Moscow, The Department of Development Strategy and the Science and Technology Policy of RAO UES of Russia Publ., 1999, 78 p. (In Russian)

12. Khrennikov A. Yu., Rubtsov A. V., Shcherbakov V. V. & Yazykov S. A. Teplovizionnyy kontrol' elektrotekhnicheskogo oborudovaniya i opyt diagnostiki silovykh transformatorov [Thermovision control of electrical equipment and experience in diagnosing power transformers]. *Electrical stations*, 2006, no. 5, pp. 63–67. (In Russian)

13. Volodin A. I., Balagin O. V. & Fomenko V. K. Teplovizionnyy kontrol' tekhnicheskogo sostoyaniya uzlov podvizhnogo sostava [Thermovision control of the technical condition of rolling stock units]. *Nauka i tehnika transporta* [*Science and Technology in Transport*], 2009, no. 1, pp. 73–77. (In Russian)

14. *NI sbRIO-9651. System on Module. Carrier Board Design Guide.* National Instruments Corporation, 2017, 76 p.

15. *LabView user manual*. National Instruments Corporation, 2003, 456 p.

16. *LabView measurements manual*. National Instruments Corporation, 2003, 256 p.

Received: April 12, 2019
Accepted: April 24, 2019

Author's information:
Aleksey E. TSAPLIN – PhD in Engineering, Associate Professor, tsaplin.alexey@mail.ru
Vitaly A. VASILIEV – PhD in Engineering, Associate Professor, ralagj@mail.ru
Sergey A. FOMIN – Postgraduate Student, fomin.s@metro.spb.ru

УДК 629.4.027.3

Характеристики упруго-фрикционных комплектов рессорного подвешивания

А. Н. Савоськин [1], **Ю. С. Ромен** [2], **А. П. Васильев** [1]

[1] Российский университет транспорта (МИИТ), Российская Федерация, 127994, Москва, ул. Образцова, 9
[2] АО «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта», Российская Федерация, 129626, Москва, 3-я Мытищинская ул., 10

Для цитирования: *Савоськин А. Н., Ромен Ю. С., Васильев А. П.* Характеристики упруго-фрикционных комплектов рессорного подвешивания // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2019. – Т. 16, вып. 2. – С. 275–284. DOI: 10.20295/1815-588X-2019-2-275-284

Аннотация

Цель: Исследование характеристик упругих и фрикционных элементов рессорного подвешивания при различных схемах их соединений. **Методы:** В рессорном подвешивании рельсовых экипажей упругие и диссипативные элементы могут быть соединены параллельно или последовательно-параллельно. Кроме того, могут быть использованы схемы с клиновыми гасителями колебаний, сила трения в которых создается за счет упругой силы дополнительной (подклиновой) пружины, зависящей от ее деформации. Во всех этих схемах энергия колебаний, рассеиваемая фрикционным гасителем за период, уменьшается и силовая характеристика изменяется. **Результаты:** Показано, что, если динамическая сила, развиваемая в комплекте подвешивания, меньше, чем сила трения, фрикционный гаситель заклинивает комплект подвешивания и суммарное динамическое перемещение верхней точки комплекта становится равным возмущению. **Практическая значимость:** Полученные выражения для определения сил и деформаций в упруго-фрикционных комплектах позволяют выполнять расчеты колебаний подвижного состава с такими комплектами рессорного подвешивания.

Ключевые слова: Пружина, фрикционный гаситель, клиновой гаситель, сила трения, деформация, рессорное подвешивание.

Известно, что силу трения фрикционного гасителя в соответствии с законом Кулона [1] определяют выражением

$$F_{\text{тр}} = -F_N \mu_{\text{тр}} \frac{\dot{\Delta}}{\left|\dot{\Delta}\right|} = -F_N \mu_{\text{тр}} \sin \dot{\Delta}, \qquad (1)$$

где $F_{\text{тр}}$ – нормальная сила нажатия фрикционных элементов гасителя; $\mu_{\text{тр}}$ – коэффициент трения между фрикционными элементами; $\dot{\Delta}$ – скорость деформации; $\sin \dot{\Delta}$ – операция, означающая выделение знака скорости.

Это выражение описывает скачкообразное изменение силы трения гасителя (рис. 1, *а*) и широко используется [2–4] при исследовании колебаний тягового подвижного состава с такими гасителями колебаний.

Для построения силовой характеристики гасителя $F_{\text{тр}} = f(\Delta)$ примем, что $\Delta = \Delta_m \sin \omega t$ и $\dot{\Delta} = \Delta_m \omega \cos \omega t$ (рис. 1, *б*). Тогда при изменении знака $\dot{\Delta}$ сила трения фрикционного гасителя, согласно (1), будет изменяться скачком на величину $2F_{\text{тр}}$ и зависимость $F_{\text{тр}}(t)$ будет иметь вид прямоугольных импульсов.

Если замерить в одноименные моменты времени t_i величины $\ddot{\Delta}(t_i)$ и $F_{\text{тр}}(t_i)$, то можно построить силовую характеристику гасителя $F_{\text{тр}}(t_i)$, $F_{\text{тр}}(\Delta)$ (рис. 1, *в*). Данная харак-

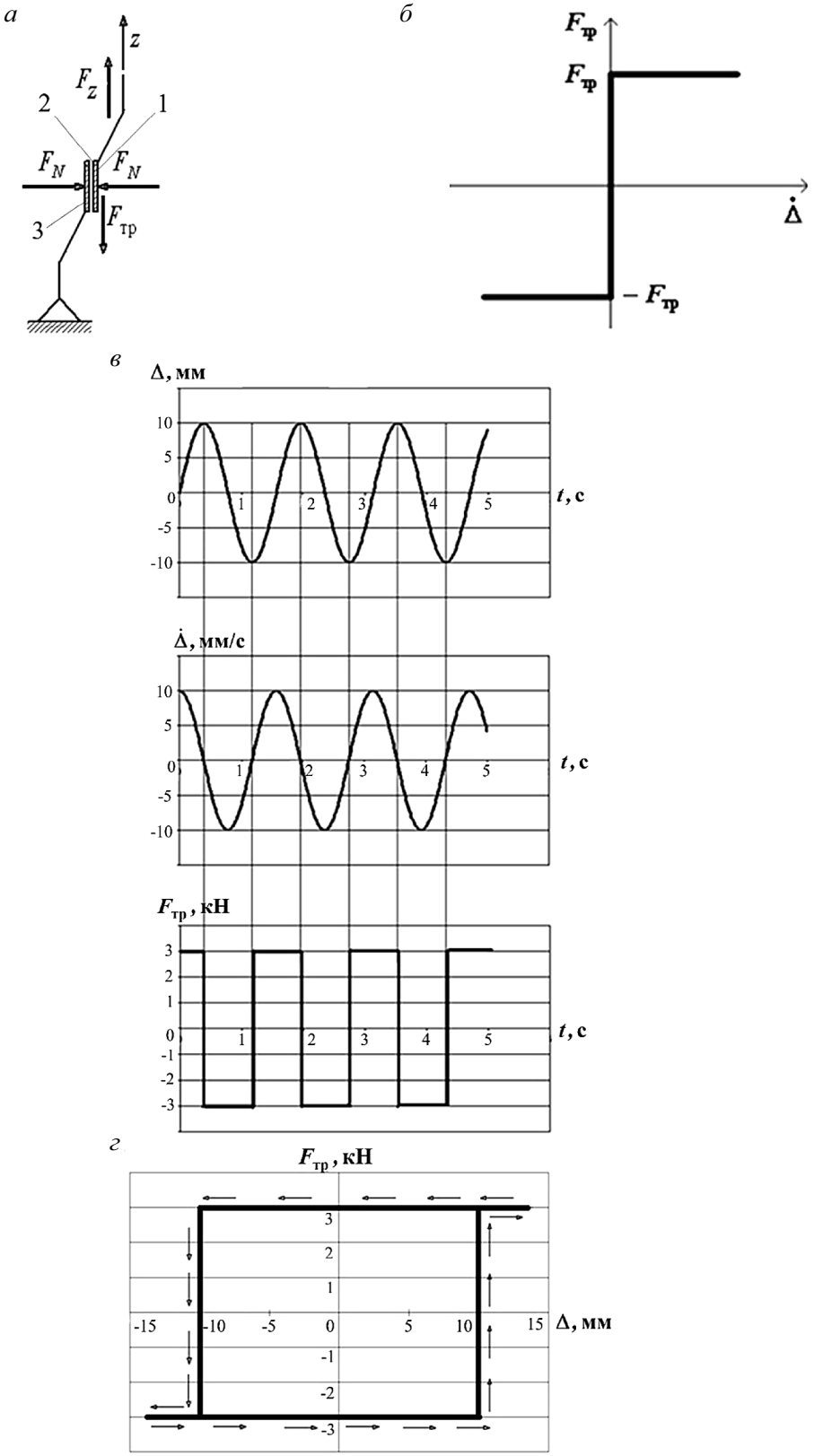


Рис. 1. Принципиальная схема фрикционного гасителя (*а*), зависимость силы трения от скорости (*б*), графики изменения $\Delta, \dot{\Delta}$ и $F_{тр}$ (*в*), силовая характеристика гасителя (*г*): *1* – верхний фрикционный элемент; *2* – фрикционная накладка; *3* – нижний фрикционный элемент

теристика имеет вид прямоугольника [5, 6], горизонтальные стороны которого соответствуют величинам силы трения $F_{тр}$ и $-F_{тр}$. Вертикальные стороны этого прямоугольника отвечают моментам изменения знака производной и, следовательно, моментам перехода от положительного направления силы трения к отрицательному.

В рессорном подвешивании рельсовых экипажей упругие и диссипативные элементы могут быть соединены параллельно или последовательно-параллельно. Кроме того, могут быть использованы схемы с клиновыми гасителями колебаний, в которых сила трения создается за счет упругой силы дополнительной (подклиновой) пружины, зависящей от ее деформации. Во всех этих схемах энергия колебаний, рассеиваемая фрикционным гасителем за период, уменьшается и силовая характеристика изменяется. Для примера рассмотрим работу трех различных схем рессорного подвешивания, состоящих из пружин и фрикционных гасителей колебаний.

Пример 1. Параллельное включение пружины и фрикционного гасителя колебаний

Такая схема реализована в буксовых ступенях рессорного подвешивания электропоездов серий ЭР и ЭД, а также тепловозов 2ТЭ116. На кинематической схеме такого комплекта (рис. 2, *а*) буксовая пружина с жесткостью $ж_1$ включена параллельно с фрикционным гасителем, создающим неизменную по величине силу трения $F_{тр} = \text{const}$.

Сила тяжести подрессоренной массы $F_{тр} = mg$ воспринимается пружиной с жесткостью $ж_1$ и создает статический прогиб этой пружины $\Delta_{ст}$. Кроме того, под действием геометрической неровности $\eta(vt)$ возникают колебания $z(t)$ подрессоренной массы m. При этих колебаниях появляется относительное перемещение $\Delta_д(t) = z(t) - \eta(vt)$; примем, что $\Delta_д(t) = \Delta_{дт}\sin\omega t$ (рис. 2, *б*). Тогда полное перемещение $\Delta(t) = \Delta_{ст} + \Delta_д(t)$.

Сила трения создается за счет нормальной силы нажатия N на фрикционные элементы гасителя другой пружиной с жесткостью $ж_2$:

$$F_{тр} = \mu_{тр} N \sin\dot{\Delta}_1, \qquad (2)$$

где $\dot{\Delta}_1$ – скорость деформации пружины $ж_1$.

При этом следует учесть, что при малом перемещении подрессоренной массы, когда $\Delta_д(t) \le \Delta_0$, действующая на фрикционный гаситель сила меньше, чем сила трения $F_{тр}(t)$, и колебания $\Delta_1(t)$ пружины с жесткостью $ж_1$ происходить не будут из-за эффекта анкилозиса (заклинивания) фрикционного гасителя. Здесь

$$\Delta_0 = \frac{F_{тр}}{ж_1} = \frac{\mu_{тр} N}{ж_1}. \qquad (3)$$

Тогда деформация $\Delta_1(t)$ пружины $ж_1$, упругая сила в пружине $F_y(t)$, сила трения гасителя $F_{тр}(t)$ и реакция комплекта $F_к(t)$ будут равны

$$\Delta_1(t) = \begin{cases} \Delta_{ст} & \text{при } |\Delta_д(t)| \le \Delta_0, \\ \Delta_{ст} + \Delta_д(t) & \text{при } |\Delta_д(t)| > \Delta_0, \end{cases} \qquad (4)$$

$$F_у = \begin{cases} ж_1\Delta_{ст} \\ \text{при } |\Delta_д(t)| \le \Delta_0, \\ ж_1\Delta_{ст} + ж_1(\Delta_{дт} - \Delta_0)\sin\omega t \\ \text{при } |\Delta_д(t)| \le \Delta_0, \end{cases} \qquad (5)$$

$$F_{тр}(t) = \begin{cases} 0 \\ \text{при } |\Delta_1 - \Delta_{ст}| \le \Delta_0, \\ \mu_{тр} N \operatorname{sign}\dot{\Delta}_1 \\ \text{при } |\Delta_1 - \Delta_{ст}| > \Delta_0, \end{cases} \qquad (6)$$

$$F_к(t) = \begin{cases} F_{ст} \\ \text{при } |\Delta_1 - \Delta_{ст}| \le \Delta_0, \\ F_{ст} + F_у(t) + F_{тр}(t) \\ \text{при } |\Delta_1 - \Delta_{ст}| > \Delta_0. \end{cases} \qquad (7)$$

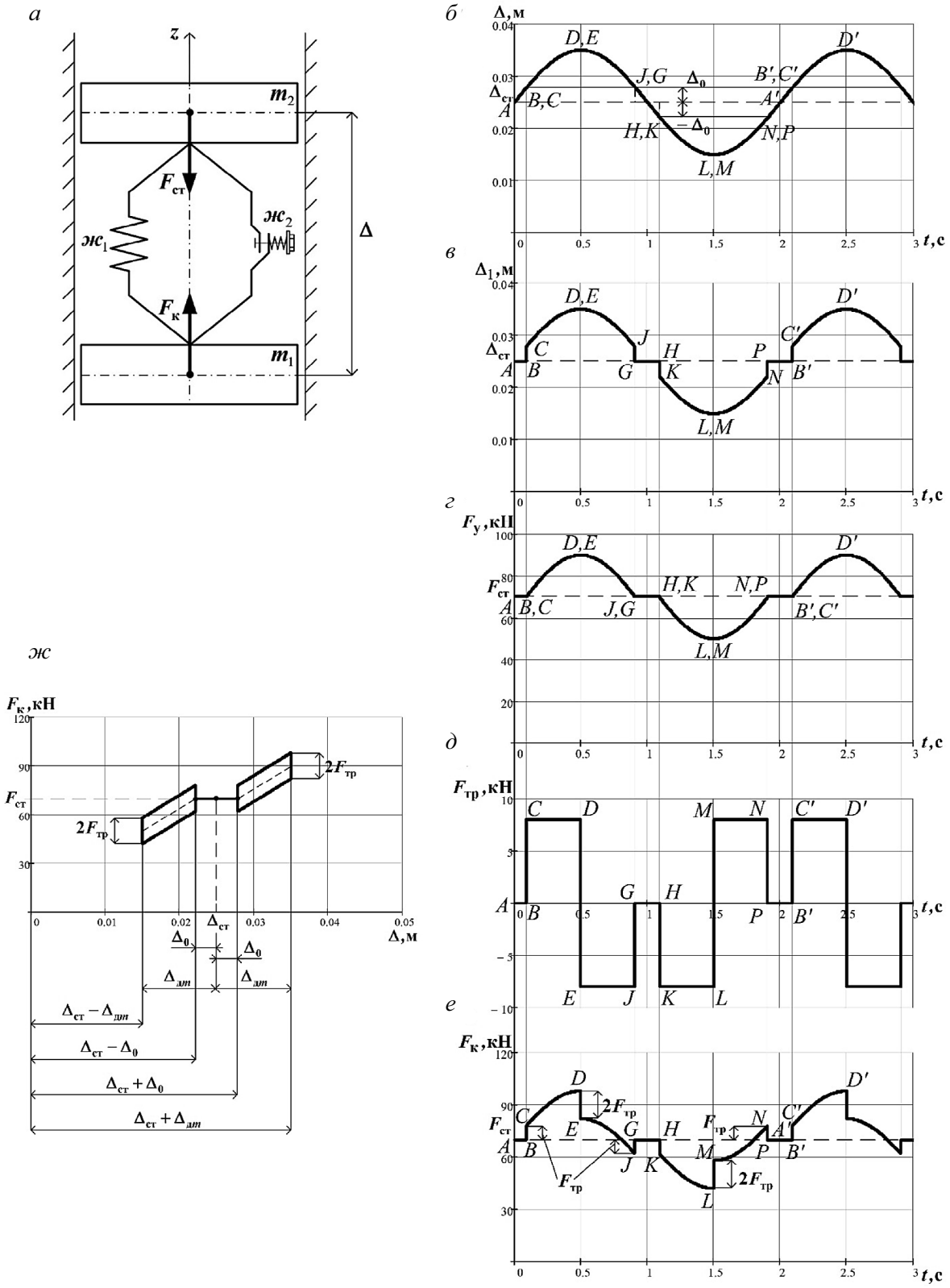


Рис. 2. Схема параллельного включения пружины и фрикционного гасителя колебаний с постоянной силой трения: *а* – расчетная схема; *б–е* – зависимости от времени: *б* – деформации, *в* – деформации пружины, *г* – упругой силы, *д* – силы трения, *е* – силы реакции комплекта; *ж* – силовая характеристика комплекта

Силовая характеристика $F_к(\Delta)$ такого комплекта (рис. 1, *ж*) имеет вид двух петель, расположенных симметрично относительно среднего горизонтального участка с координатами $[\Delta_{ст}-\Delta_0;\ \Delta_{ст}-\Delta_0]$, на котором $F_к(t)=F_{ст}$. Таким образом, когда $\Delta(t)\le\Delta_0$, реакция комплекта $F_к(\Delta)$ равна статической силе. При превышении величиной $\Delta(t)$ указанных границ $F_к(\Delta)$ скачком изменяется на $F_{тр}$. При изменении знака $\dot{\Delta}_1$ происходит скачок $F_к(t)$ на величину $2F_{тр}$. Наклон петель определяется жесткостью пружины $ж_1$.

Пример 2. Схема параллельного включения буксовой пружины и подпружиненного фрикционного гасителя

Резиновые прокладки или резиновые амортизаторы, которые зачастую вводят с поводок гасителя, можно представить в виде дополнительной пружины с жесткостью $ж_3$, включенной последовательно с фрикционным элементом (рис. 3, *а*). В этой схеме сила трения $F_{тр}$ по-прежнему создается нажимной пружиной $ж_2$, а сила $F_к(t)$, развиваемая комплектом рессорного подвешивания, зависит от соотношения величин $F_{тр}$ и упругой силы $F_{уп3}(t)=ж_3\Delta_д(t)$ третьей пружины $ж_3$.

Зависимости $\Delta_1(t), F_у(t), F_{тр}(t)$ и $F_к(t)$ для этого комплекта будут равны

$$\Delta_1(t)=\begin{cases}\Delta_{ст} & \text{при}\,|\Delta_д|\le\Delta_0,\\ \Delta_{ст}+\Delta_д(t) & \text{при}\,|\Delta_д|\le\Delta_0,\end{cases}\qquad(8)$$

$$F_у(t)=\begin{cases}(ж_1+ж_3)[\Delta_{ст}+\Delta_д(t)]\\ \text{при}\,|\Delta_д|\le\Delta_0,\\ ж_1[\Delta_{ст}+\Delta_д(t)]\\ \text{при}\,|\Delta_д|>\Delta_0,\end{cases}\qquad(9)$$

$$F_{тр}(t)=\begin{cases}0 & \text{при}\,|\Delta_д|\le\Delta_0,\\ F_{тр}\operatorname{sign}\dot{\Delta}_1 & \text{при}\,|\Delta_д|>\Delta_0,\end{cases}\qquad(10)$$

$$F_к(t)=\begin{cases}(ж_1+ж_3)[\Delta_{ст}+\Delta_д(t)]\\ \text{при}\,|\Delta_д|\le\Delta_0,\\ ж_1[\Delta_{ст}+\Delta_д(t)]+F_{тр}\operatorname{sign}\dot{\Delta}_1\\ \text{при}\,|\Delta_д|>\Delta_0.\end{cases}\qquad(11)$$

Графики зависимостей (8)–(10) приведены на рис. 3, *б–е*, а силовая характеристика $F_к=f(\Delta)$ – на рис. 3, *ж*.

Силовая характеристика $F_к(\Delta)$ представляет собой две петли с наклоном $ж_1$, разделенных участком прямой с наклоном $ж_1+ж_3$, центр которой совмещен с точкой статического равновесия $[F_{ст};\ \Delta_{ст}]$.

Пример 3. Схема параллельного включения буксовой пружины и фрикционного гасителя с силой трения, пропорциональной деформации

В таком гасителе параллельно буксовой пружине с жесткостью $ж_1$ включена дополнительная (подклиновая) пружина с жесткостью $ж_2$, создающая нажатие на фрикционные пластины гасителя, расположенные под углом α, в которых появляется сила трения [7–10] (рис. 4, *а*). Эта схема применена, например, в рессорном подвешивании грузовых вагонов, а также в буксовых узлах тележек пассажирских вагонов типа КВЗ-ЦНИИ и тележек прицепных вагонов электропоездов серий ЭР и ЭД.

Деформация пружин в данном комплекте (рис. 4, *б*) изменяется по закону

$$\Delta(t)=\Delta_{ст}+\Delta_д(t)=\Delta_{ст}+\Delta_{дm}\sin\omega t.\qquad(12)$$

Упругая сила (рис. 4, *в*) равна

$$F_у(t)=(ж_1+ж_2)[\Delta_{ст}+\Delta_д(t)].\qquad(13)$$

Сила трения в этом комплекте (рис. 4, *г*) создается нажатием пружины $ж_2$ и определяется выражением

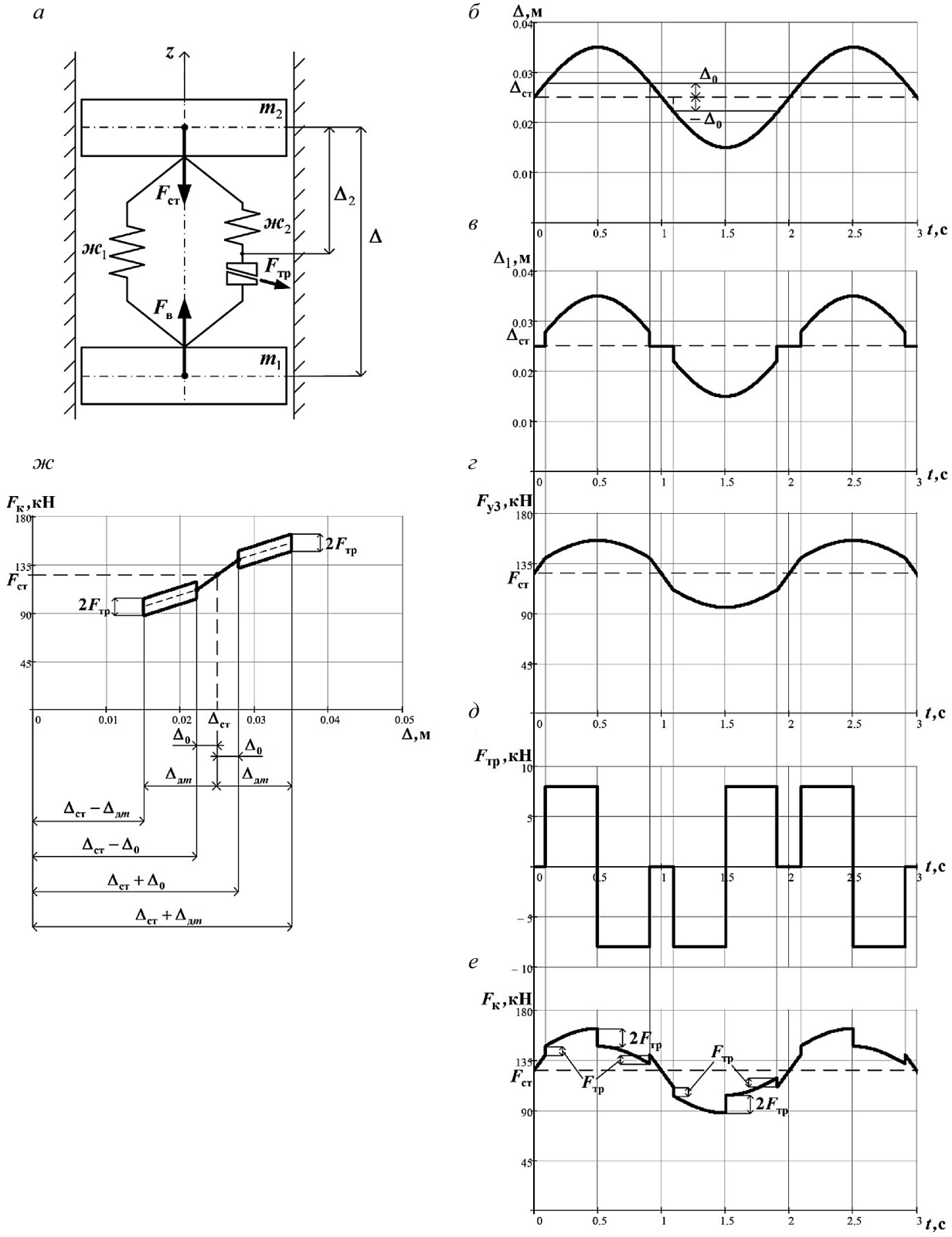


Рис. 3. Схема параллельного включения буксовой пружины и подпружиненного фрикционного гасителя: *а* – расчетная схема; *б–е* – зависимости от времени:
б – деформации, *в* – деформации пружины, *г* – силы трения, *д* – упругой силы, *е* – силы реакции комплекта; *ж* – силовая характеристика комплекта

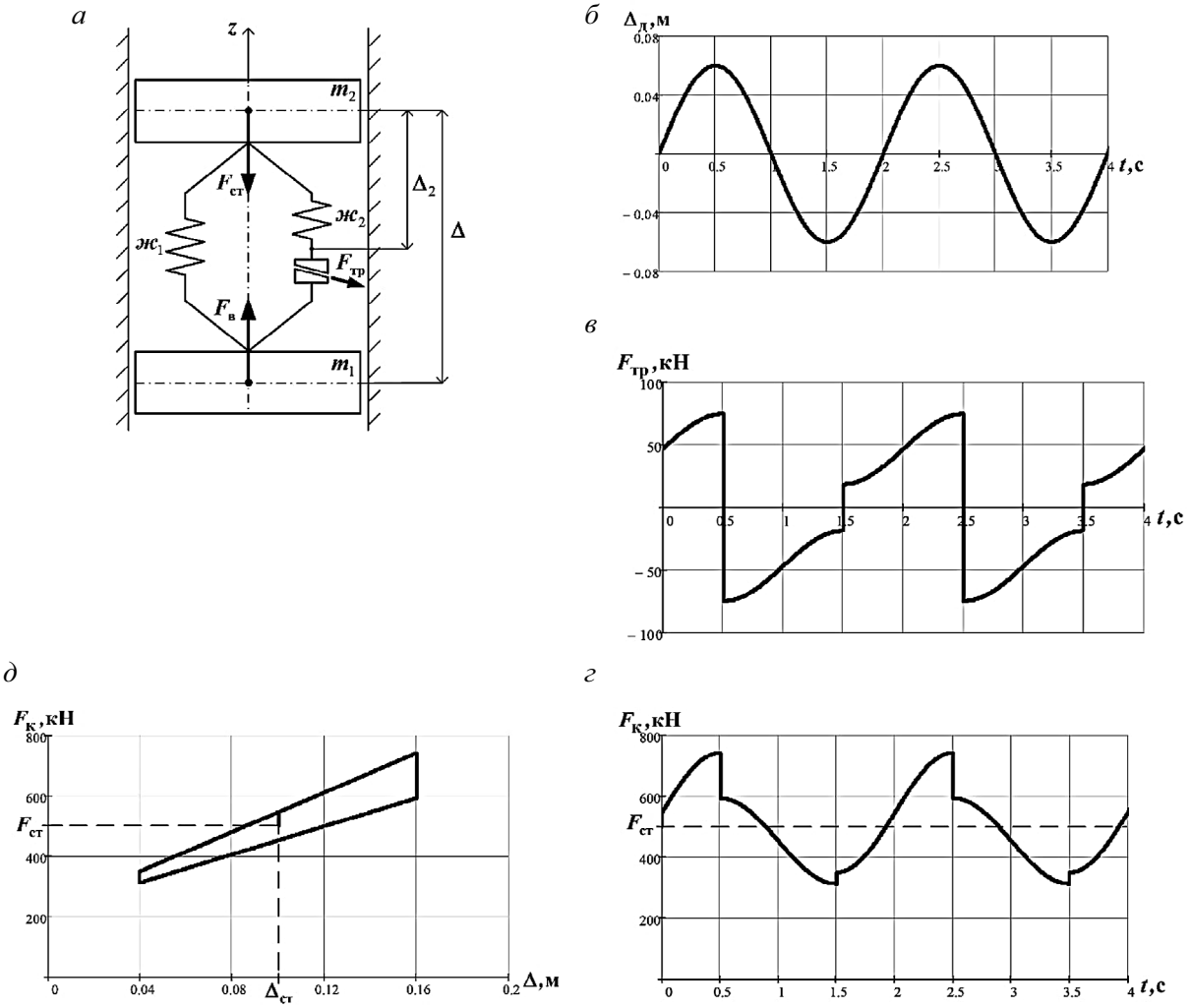


Рис. 4. Схема параллельного включения буксовой пружины и фрикционного гасителя с силой трения, пропорциональной деформации пружины: *а* – расчетная схема; *б–д* – зависимости от времени: *б* – деформации, *в* – силы трения, *г* – упругой силы, *д* – силы реакции комплекта

$$F_{\text{тр}}(t) = ж_2\left[\Delta_{\text{ст}} + \Delta_{\text{д}}(t)\right] \times \times \mu_{\text{тр}} \cos\alpha \operatorname{sign}\dot{\Delta}_1. \quad (14)$$

Тогда реакция $F_{\text{к}}(t)$ комплекта (рис. 4, *д*) определяется суммой упругой силы и силы трения гасителя:

$$F_{\text{к}}(t) = F_{\text{у}}(t) + F_{\text{тр}}(t) = = (ж_1 + ж_2)\left[\Delta_{\text{ст}} + \Delta_{\text{д}}(t)\right] + + ж_2\left[\Delta_{\text{ст}} + \Delta_{\text{д}}(t)\right]\mu_{\text{тр}} \cos\alpha \operatorname{sign}\dot{\Delta}_1. \quad (15)$$

Силовая характеристика $F_{\text{к}}(\Delta)$ имеет форму трапеции, основания которой равны соответственно $2F_{\text{тр1}}$ и $2F_{\text{тр2}}$, а боковые стороны расположены симметрично относительно линии с наклоном $ж_1 + ж_2$.

Заключение

1. Выражения, полученные для различных схем включения пружин и фрикционных гасителей (см. (2)–(15)), позволяют выполнять рас-

четы колебаний подвижного состава с такими схемами рессорного подвешивания.

2. Следует иметь в виду, что если динамическая сила, развиваемая в комплекте подвешивания, меньше, чем сила трения, фрикционный гаситель заклинивает комплект подвешивания и суммарное динамическое перемещение верхней точки комплекта $z_{\sum_i}(t)$ становится равным возмущению:

$$z_{\sum_i}(t)=\begin{cases}\eta_i(t) \\ \text{при}\,(ж_1+ж_3)\Delta_д(t)\le F_{тр}, \\ \eta_i(t)+\Delta_д(t) \\ \text{при}\,(ж_1+ж_3)\Delta_д(t)>F_{тр}.\end{cases}$$

При этом величина $z_{\sum_i}(t)$ складывается из колебаний подпрыгивания, галопирования и боковой качки.

Библиографический список

1. Пановко Я. Г. Введение в теорию колебаний : учеб. пособие. – 2-е изд., перераб. / Я. Г. Пановко. – М. : Наука, 1980. – 272 с.

2. Челноков И. И. Гасители колебаний вагонов / И. И. Челноков, Б. И. Вишняков, В. М. Гарбузов, А. А. Эстлинг. – М. : Трансжелдориздат, 1963. – 176 с.

3. Бирюков И. В. Механическая часть тягового подвижного состава : учебник для вузов ж.-д. транспорта / И. В. Бирюков, А. Н. Савоськин, Г. П. Бурчак и др. ; под ред. И. В. Бирюкова. – М. : Транспорт, 1992. – 440 с. (Репринт. воспроизв.). – М. : Альянс, 2013. – 440 с.

4. Лазарян В. А. Динамика вагонов / В. А. Лазарян. – М. : Транспорт, 1964. – 255 с.

5. Sheng X. Simulations of roughness initiation and growth on railway rails / X. Sheng, D. J. Thompson, C. J. C. Jones, G. Xie, S. D. Iwnicki, P. Allen, S. S. Hsu // Journal of Sound and Vibration. – 2006. – Vol. 293, iss. 3–5. – P. 819–829.

6. Jin X. S. Three-dimensional train–track model for study of rail corrugation / X. S. Jin, Z. F. Wen, K. Y. Wang, Z. R. Zhou, Q. Y. Liu, C. H. Li // Journal of Sound and Vibration. – 2006. – Vol. 293, iss. 3–5. – P. 830–855.

7. Boronenko Yu. The influence of the condition of three-piece freight bogies on wheel flange wear: simulation and operation monitoring / Yu. Boronenko, A. Orlova // Vehicle System Dynamics International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility, Selected and Extended Papers from the 21st Symposium of the International Association for Vehicle System Dynamics. – London : Taylor & Francis Group, 2010. – Vol. 48, Supplement 1. – P. 37–53.

8. Boronenko Yu. Reconsidering requirements to friction wedge suspensions from freight wagon dynamics point of view / Yu. Boronenko, A. Orlova // 22nd International symposium on Dynamics of Vehicles on Roads and Tracks / Programme and Abstracts. Manchester Metropolitan University, 14–19 August, 2011. – Manchester : Metropolitan Iniversity, 2011. – P. 10.2.

9. Бороненко Ю. П. Сравнительная оценка сопротивления движению грузовых вагонов на тележках различных типов / Ю. П. Бороненко, А. Н. Комарова // Транспорт Российской Федерации. – 2014. – № 3 (52). – С. 69–72.

10. Бороненко Ю. П. Влияние типов и параметров гасителей колебаний вагона на сопротивление движению / Ю. П. Бороненко, А. Н. Комарова // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. – СПб. : ПГУПС, 2014. – Вып. 2 (39). – С. 35–41.

Дата поступления: 01.06.2019
Решение о публикации: 10.06.2019

Контактная информация:
САВОСЬКИН Анатолий Николаевич – доктор техн. наук, профессор, elmechtrans@mail.ru
РОМЕН Юрий Семенович – гл. науч. сотрудник, профессор, uromen@mail.ru
ВАСИЛЬЕВ Андрей Павлович – канд. техн. наук, доцент, stud16@yandex.ru

Characteristics of elastic friction sets of bogie suspension

A. N. Savoskin [1], Yu. S. Romen [2], A. P. Vasiliev [1]
[1] Russian University of Transport (MIIT), 9, Obraztsova ul., Moscow, 127994, Russian Federation
[2] JCS "VNIIZHT" Railway Research Institute, 10, 3d Mytishchin ul., Moscow, 129626, Russian Federation

For citation: Savoskin A. N., Romen Yu. S., Vasiliev A. P. Characteristics of elastic friction sets of bogie suspension. *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2019, vol. 16, iss. 2, pp. 275–284. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2019-2-275-284

Summary

Objective: To study characteristics of elastic friction elements of bogie suspension taking into account different configurations of these elements. **Methods:** Elastic and dissipative elements can have parallel or series-parallel connection in bogie suspension of a rail vehicle. Moreover, configurations with wedge-type shock absorbers can be used, where friction force is created by means of spring force of additional (wedged-up) spring, depending on its deflection. In all these configurations vibrational energy, dissipated by the friction shock absorber in a period, reduces and power characteristic changes. **Results:** It was shown that in case dynamic force, developed in a suspension set, is lower than friction force, the friction shock absorber wedges up a suspension set. Thus, the total dynamic movement of the top point of the set equals disturbance. **Practical importance:** The obtained expressions for determination of forces and deflection in elastic friction sets make it possible to perform vibration analysis of the rolling stock with the bogie suspension sets.

Keywords: Spring, friction shock absorber, wedge-type shock absorber, friction force, deflection, bogie suspension.

References

1. Panovko Ya. G. *Vvedeniye v teoriyu kolebaniy* [*Introduction to the theory of oscillations*]. Tutorial. 2nd ed., revised. Moscow, Nauka Publ., 1980, 272 p. (In Russian)

2. Chelnokov I. I., Vishnyakov B. I., Garbuzov V. M. & Estling A. A. *Gasitely kolebaniy vagonov* [*Shock absorbers*]. Moscow, Transzheldorizdat Publ., 1963, 176 p. (In Russian)

3. Biryukov I. V., Savoskin A. N., Burchak G. P. et al. *Mekhanicheskaya chast tyagovogo podvizhnogo sostava* [*Traction vehicle: mechanical section*]. Textbook for colleges of railway transport. Ed. by I. V. Biryukov. Moscow, Transport Publ., 1992, 440 p. (Reprint reproduced ed. Moscow, Alliance Publ., 2013, 440 p.). (In Russian)

4. Lazaryan V. A. *Dinamika vagonov* [*Dynamics of railroad cars*]. Moscow, Transport Publ., 1964, 255 p. (In Russian)

5. Sheng X., Thompson D. J., Jones C. J. C., Xie G., Iwnicki S. D., Allen P. & Hsu S. S. Simulations of roughness initiation and growth on railway rails. *Journal of Sound and Vibration*, 2006, vol. 293, iss. 3–5, pp. 819–829.

6. Jin X. S., Wen Z. F, Wang K. Y., Zhou Z. R., Liu Q. Y. & Li C. H. Three-dimensional train-track model for study of rail corrugation. *Journal of Sound and Vibration*, 2006, vol. 293, iss. 3–5, pp. 830–855.

7. Boronenko Yu. & Orlova A. The influence of the condition of three-piece freight bogies on wheel flange wear: simulation and operation monitoring. *Vehicle System Dynamics International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility. Selected and Extended Papers from the 21st Symposium of the International Association for Vehicle System Dynamics*. London, Taylor & Francis Group Publ., 2010, vol. 48, suppl. 1, pp. 37–53.

8. Boronenko Yu. & Orlova A. Reconsidering requirements to friction wedge suspensions from freight wagon dynamics point of view. *The 22nd International symposium on Dynamics of Vehicles on Roads and*

Tracks. Programme and Abstracts. Manchester, Manchester Metropolitan University Publ., 14–19 August, 2011, p. 10.2.

9. Boronenko Yu. P. & Komarova A. N. Sravnitelnaya otsenka soprotivleniya dvizheniyu gruzovykh vagonov na telezhkakh razlichnykh tipov [Comparative valuation of resistance to traction of freight cars on bogies of different types]. *Transport Rossiyskoy Federatsii* [*Transport of the Russian Federation*], 2014, no. 3 (52), pp. 69–72. (In Russian)

10. Boronenko Yu. P. & Komarova A. N. Vliyaniye tipov i parametrov gasiteley kolebaniy vagona na soprotivleniye dvizheniyu [The influence of types and parameters of shock absorbers on resistance to traction]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [*Proceedings of Petersburg State Transport University*], Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2014, iss. 2 (39), pp. 35–41. (In Russian)

Received: June 01, 2019
Accepted: June 10, 2019

Author's information:
Anatoliy N. SAVOSKIN – D. Sci. in Engineering, Professor, elmechtrans@mail.ru
Yuriy S. ROMEN – Principal Researcher, Professor, uromen@mail.ru
Andrey P. VASILIEV – PhD in Engineering, Associate Professor, stud16@yandex.ru

УДК 629.4:539.4(045)

Расчетно-экспериментальные методы оценки ресурса базовых частей подвижного состава

А. С. Гасюк, Э. С. Оганьян

АО «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава» (АО «ВНИКТИ»), Российская Федерация, 140402, Московская область, Коломна, ул. Октябрьской революции, 410

Для цитирования: *Гасюк А. С., Оганьян Э. С.* Расчетно-экспериментальные методы оценки ресурса базовых частей подвижного состава // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2019. – Т. 16, вып. 2. – С. 285–291. DOI: 10.20295/1815-588X-2019-2-285-291

Аннотация

Цели: Разработка методов определения, назначения и продления сроков службы железнодорожного подвижного состава по ресурсу критических элементов их несущих конструкций на примере главной рамы и рамы тележки тепловоза ТЭМ2; решение задачи безопасной эксплуатации подвижного состава (в том числе с истекшим назначенным сроком службы) на основе расчетно-экспериментальной оценки ресурса базовых частей по критериям прочности, жесткости, сопротивления усталости. **Методы:** Применен метод оценки ресурса (срока службы) подвижного состава по вероятностным параметрам его прочности и нагруженности, который основан на концепции «безопасной эксплуатации объекта по его техническому состоянию» и заключается в разработке и применении ресурсных показателей для оценки технического состояния и долговечности несущих конструкций. **Результаты:** Показана актуальность обоснованного установления назначенного срока службы подвижного состава в соответствии с требованиями технических регламентов и нормативной документации. Представлен подход к решению излагаемой проблемы с использованием экспериментальных данных, полученных на натурных объектах. **Практическая значимость:** Показана обоснованность такого подхода, указаны критерии и описан алгоритм расчетно-экспериментальной оценки ресурса. На основе расчетно-экспериментальных методов исследования напряженно-деформированного состояния рамы тележки и главной рамы тепловоза и накопленных эксплуатационных данных разработан подход к оценке и прогнозированию технического состояния подвижного состава и обеспечению его безопасной эксплуатации в заданный период по ресурсу базовых несущих конструкций.

Ключевые слова. Ресурс, методы исследования, напряженно-деформированное состояние, сопротивление усталости, безопасная эксплуатация.

В результате длительной работы конструкций экипажной части подвижного состава (ПС) и локомотивов в частности (рама и кузов локомотива, их шкворневые узлы, рамы тележек, оси колесных пар и др.) под действием знакопеременных циклических нагрузок происходит деградация прочностных свойств металла деталей, снижается их сопротивление усталости, что может привести к разрушению конструкции. Работоспособность конструкции в целом обеспечивается принятыми методами проектирования, отраслевыми нормативными требованиями к прочности и динамическим качествам подвижного состава (например,

локомотивов [1, 2], вагонов [3, 4]) на определенный период эксплуатации – назначенный срок службы.

Однако предусмотренная в них оценка прочности и долговечности по коэффициентам запаса не в полной мере учитывает случайный характер эксплуатационных нагрузок, под действием которых накапливаются усталостные повреждения, не позволяет оценить ресурс и судить о вероятности отказа детали или степени такого риска за срок службы.

Старение подвижного состава и требования, сформулированные в техническом регламенте Таможенного союза ТР ТС 001/2011 [5], делают актуальным обоснованное установление нового назначенного срока службы [6, 7].

Задача установления (для проектируемого ПС) или назначения нового (для эксплуатируемого) срока службы состоит в том, чтобы с высокой надежностью оценить и спрогнозировать техническое состояние подвижного состава, обеспечив безопасную эксплуатацию в заданный период по ресурсу (по критериям прочности, жесткости, сопротивления усталости) его несменяемых (базовых) несущих конструкций. Эта задача решается расчетно-экспериментальными методами исследования напряженно-деформированного состояния базовых частей локомотива, а также использованием накопленных эксплуатационных данных.

Базовыми частями, лимитирующими срок службы подвижного состава (в частности локомотива), являются главная рама и рама тележки.

При эксплуатации главная рама испытывает значительные продольные повторно-статические и ударные нагрузки с относительно малым числом циклов нагружения. Под действием этих нагрузок в ряде элементов конструкции главной рамы могут возникать напряжения, близкие к пределу текучести материала с возможным образованием в них остаточных деформаций.

В этом случае оценка ресурса должна производиться по результатам испытаний и расчетов несущей способности конструкции по деформационным критериям и малоцикловой усталости [8]. Для этого на локомотиве проводят испытания от действия продольных сил по оси автосцепок, в том числе испытания на соударения, по результатам которых определяют напряженно-деформированное состояние несущих конструкций. При необходимости выявляют элементы, требующие конструктивной доработки. Необходимые мероприятия определяют расчетом на конечно-элементной модели рамы.

Рамы тележек работают главным образом в условиях переменных циклических нагрузок. Многоцикловое их воздействие ведет к снижению сопротивления усталости конструкции рамы (из-за накопления повреждений и деградации свойств материала). Оценка ее ресурса может быть произведена на основе расчета долговечности по показателям нагруженности и сопротивления усталости конструкции, полученным по результатам ходовых динамико-прочностных испытаний локомотива и стендовых испытаний на усталость рам тележек [8, 9].

Для получения необходимых показателей испытания на усталость проводятся как на раме тележки в целом (рис. 1), так и на отдельных, наиболее нагруженных в эксплуатации несущих элементах (боковых балках рамы) (рис. 2) с целью построения кривой усталости и определения ее параметров, требуемых для последующего расчета ресурса конструкции (рис. 3).

Величины испытательных нагрузок ($P_{\text{исп}}$) при циклическом нагружении рамы в целом задаются в виде

$$P_{\text{исп}} = P_{\text{эксп}}^{\text{верт}} + P_{\text{эксп}}^{\text{бок}},$$

где $P_{\text{эксп}}^{\text{верт}} = P_{\text{ст}}^{\text{верт}} \cdot (1 + k_{\text{д}}^{\text{в}})$; $P_{\text{эксп}}^{\text{бок}} = P_{\text{ст}}^{\text{бок}} \cdot (1 + k_{\text{д}}^{\text{гор}})$; $k_{\text{д}}^{\text{в}} \geq 0,4$ и $k_{\text{д}}^{\text{гор}} \geq 0,3$ – коэффициенты вертикальной и горизонтальной динамики соответственно [1].

Испытания отдельных частей рамы проводятся на нескольких (4–6) образцах. Величи-

Рис. 1. Рама тележки тепловоза ТЭМ2 при стендовых испытаниях на усталость

Рис. 2. Боковина рамы тележки тепловоза ТЭМ2 при испытании на усталость при изгибе на резонансном стенде

ны испытательных нагрузок задаются как $P^{\text{верт}} = P_{\text{ст}}^{\text{верт}} \cdot (1 + k_{\text{д}}^{\text{в}})$ и варьируются при $k_{\text{д}}^{\text{в}}$ от 0,2 до 1,0.

По результатам строится кривая усталости при вероятности неразрушения $P = 0{,}5$ с перестроением на кривую при заданной вероятности $P \geq 0{,}95$–$0{,}99$ по формуле [3]

$$\sigma_{-1\partial} = \overline{\sigma}_{-1\partial}(1 - U_p \upsilon) .$$

Для полученной кривой усталости определяются ее параметры: $m_1, m_2, \sigma_{-1\partial}$.

Определение ресурса главной рамы. При сжатии, растяжении главной рамы и соударениях нормативной силой напряжения в элементах конструкций концевых частей и шкворневых балок могут оказаться близкими или достигать предела текучести материала. При многократном повторении таких напряжений возможно накопление остаточных деформаций в зонах концентрации напряжений. Такой случай нагружения описывается деформационным критерием малоцикловой усталости в форме уравнения Мэнсона–Коффина [9, 10],

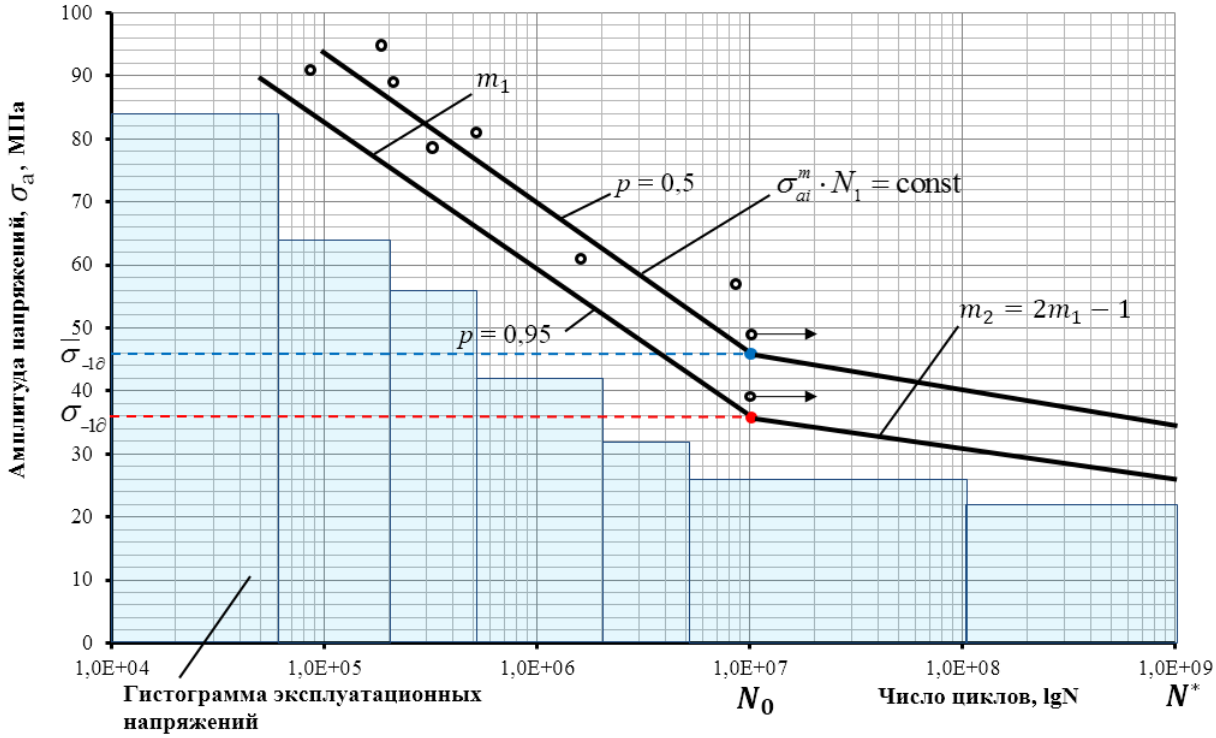


Рис. 3. Кривая усталости

характеризующего исчерпание пластических свойств стали при разрушающем числе циклов нагружения N_p:

$$\Delta\varepsilon_p = C \cdot N_p^{-m_p},$$

где $\Delta\varepsilon_p$ – размах или односторонняя пластическая относительная деформация в цикле нагружения заданной силой (определяется по результатам расчетов напряженно-деформированного состояния рамы); m_p – показатель диаграммы упрочнения за пределом упругости материала; $C = -0,5\ \ln(1-\psi)$, ψ – относительное сужение материала при растяжении.

Расчетный ресурс главной рамы локомотива по малоцикловой усталости под действием продольных сил через автосцепки находится из соотношения

$$T = \frac{N_P}{N_э \cdot n_N} \text{ лет}, \qquad (1)$$

здесь n_N – запас по долговечности, выбирается на основании имеющейся зависимости $n_N = f(n_\sigma)$ [10], N_P вычисляется по формуле (1), $N_э$ находится из статистического анализа уровней продольных сил (P), действующих на локомотив в эксплуатации.

Определение ресурса рамы тележки. Расчет ресурса рамы тележки выполняется с использованием результатов стендовых испытаний на усталость рам тележек и ходовых динамико-прочностных испытаний. Его выполняют для наиболее нагруженных зон рамы тележки.

Накопление усталостных повреждений в материале детали характеризует кривая усталости, которая описывается уравнением вида $\sigma_{ai}^m \cdot N_i = \text{const}$ на основании гипотезы линейного суммирования повреждений.

Из уравнения кривой усталости (ее второй наклонной ветви) (рис. 3) $\sigma_{-1\partial}^{m_2} \cdot N_0 = \sigma_{аэ}^{m_2} \cdot N_P$ определяют число циклов (N_P) нагружения детали до предельного состояния по исчерпанию сопротивления усталости (начала разрушения):

$$N_P = \left(\frac{\sigma_{-1\partial}}{\sigma_{аэ}}\right)^{m_2} \cdot N_0 = n_\sigma^{m_2} \cdot N_0. \qquad (2)$$

В (2) m_2 – показатель степени наклона второй ветви кривой усталости (по результатам стендовых испытаний, для боковины рамы тележки $m_2 = 9$); $N_0 = 10^7$ циклов – число циклов, соответствующее базовому (или точке изгиба кривой усталости); $\sigma_{аэ}$ – амплитуда (эквивалентная) динамических напряжений от эксплуатационных нагрузок, находится путем статистической обработки схематизированных случайных процессов с построением гистограмм распределения (P_{σ_i}) текущих значений амплитуд динамических напряжений $(\sigma_{аэ})$ при различных скоростях движения локомотива с учетом их доли (P_{V_i}) в эксплуатации по формуле [1, 9]

$$\sigma_{аэ} = \sqrt[m_2]{\frac{N_{сум}}{N_0}\sum P_{V_i} \cdot \sum \sigma_{ai}^{m_2} \cdot P_{\sigma_i}},$$

где $N_{сум} = N_1 \cdot T$ – суммарное число циклов динамических напряжений (с учетом доли повреждающих амплитуд за срок службы T); при $N_1 = f_э \cdot \frac{365 \cdot 10^3}{\overline{V}} \cdot \overline{L}$ – суммарное число циклов динамических напряжений за год; $f_э$ – эффективная частота процесса нагружения рамы тележки (по результатам ходовых испытаний), Гц; $\overline{V}$ – расчетная техническая (средняя) скорость движения локомотива, м/с; $\overline{L}$ – среднесуточный пробег локомотива, км/сут.

Блок (спектр) нагружения формируется по результатам ходовых прочностных испытаний при движении локомотива по различным элементам пути (с количеством прямых участков пути – 65 %, кривых больших радиусов – 20 %, кривых малых радиусов – 15 %) во всем диапазоне балльности состояний пути и эксплуатационных скоростей [3].

Тогда, определив коэффициент запаса сопротивления усталости рамы тележки по напряжениям с учетом изменения (деградации) физико-механических свойств материала за срок эксплуатации, вычислив N_P, можно рассчитать допускаемое (безопасное) число циклов нагружения детали (ресурс по числу циклов) $[N] = \frac{N_P}{n_N}$ и безопасный срок эксплуатации локомотива $[T] = \frac{[N]}{N_1}$.

Библиографический список

1. ГОСТ Р 55513–2013. Локомотивы. Требования к прочности и динамическим качествам. – М. : Стандартинформ, 2013. – 75 с.

2. Коссов В. С. Нормативная база анализа прочности и ресурса объектов железнодорожного транспорта / В. С. Коссов, Г. М. Волохов, Э. С. Оганьян, М. Н. Овечников // Вестн. Ин-та проблем естеств. монополий. Техника железных дорог. – 2018. – № 4. – С. 60–67.

3. Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 (несамоходных). – М. : ГосНИИВ–ВНИИЖТ, 1996. – 319 с.

4. ГОСТ 33788–2016. Вагоны грузовые и пассажирские. Методы испытаний на прочность и динамические качества. – М. : Стандартинформ, 2016. – 41 с.

5. О безопасности железнодорожного подвижного состава : Техн. регламент Таможенного союза ТР ТС 001/2011 Евраз. экон. комиссии. – М. : ЕЭК, 2019. – URL : https://docs.eaeunion.org/docs/ru-ru/0024963/cuc_02082011_710 (дата обращения : 15.05.2019).

6. Оганьян Э. С. Обоснование назначенного срока безопасной эксплуатации локомотивов / Э. С. Оганьян // Локомотив. – 2017. – № 7. – С. 34–35.

7. Третьяков А. В. Продление срока службы подвижного состава : монография / А. В. Третьяков. – М. : Изд-во МБА, 2011. – 304 с.

8. Коссов В. С. Подходы к оценке ресурса грузовых вагонов / В. С. Коссов, Н. А. Махутов, Э. С. Оганьян, Н. Ф. Красюков // Ренессанс железных дорог : Фундаментальные научные исследования и прорывные инновации : колл. монография / Объед. учен. совет ОАО «РЖД» ; под ред. Б. М. Лапидуса. – Ногинск : Аналитика Родис, 2015. – С. 126–129.

9. Оганьян Э. С. Расчеты и испытания на прочность несущих конструкций локомотивов / Э. С. Оганьян, Г. М. Волохов. – М. : Учеб.-метод. центр по образованию на ж.-д. транспорте, 2013. – 326 с.

10. Махутов Н. А. Конструкционная прочность, ресурс и техногенная безопасность : в 2 ч. – Ч. 1 :

Критерии прочности и ресурса / Н. А. Махутов. – Новосибирск : Наука, 2005. – 494 с.

Дата поступления: 01.06.2019
Решение о публикации: 11.06.2019

Контактная информация:
ГАСЮК Александр Сергеевич – зав. отделом, vnikti@ptl-kolomna.ru
ОГАНЬЯН Эдуард Сергеевич – доктор техн. наук, гл. науч. сотр., vnikti@ptl-kolomna.ru

Computational and experimental methods of assessing the useful life of basic rolling stock components

A. S. Gasyuk, E. S. Ogan'yan

JSC Research, Design and Technology Institute of Rolling Stock (JSC VNIKTI), 410, Oktyabr'skoy Revolyutsii ul., Kolomna, Moscow Region, 140402, Russian Federation

For citation: Gasyuk A. S., Ogan'yan E. S. Computational and experimental methods of assessing the useful life of basic rolling stock components. *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2019, vol. 16, iss. 2, pp. 285–291. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2019-2-285-291

Summary

Objective: To develop methods for determining, assigning and extending the service life of railway rolling stock according to the useful life of critical components of its supporting structures using the main frame and bogie frame of a TEM2 diesel locomotive as an example; to solve the problem of safe operation of rolling stock (including items with expired design service life) based on the computational and experimental assessment of the useful life of basic components with respect to strength, stiffness, and fatigue strength criteria. **Methods:** The useful (service) life of the rolling stock has been estimated with respect to probabilistic parameters of its strength and loading using a method that is based on the concept of "safe operation of an object according to its technical condition" and involves developing and applying useful life indicators to assess the technical condition and durability of supporting structures. **Results:** The relevance of the reasonable determination of the design service life of rolling stock in accordance with the technical regulations and regulatory documentation was shown. The approach to solving the stated problem was presented using experimental data obtained in full-scale tests. **Practical importance:** The validity of this approach was shown; the criteria were indicated, and the algorithm was described for the computational and experimental useful life assessment. Based on the computational and experimental methods of the stress-strain analysis of the bogie frame and the main frame of a diesel locomotive, and using the accumulated operational data, an approach was developed to assess and predict the technical condition of rolling stock and ensure its safe operation over a given period based on the useful life of basic supporting structures.

Keywords: Useful life, analysis methods, stress-strain condition, fatigue strength, safe operation.

References

1. *GOST R 55513–2013. Lokomotive. Trebovania k prochnosti i dinamicheskim kachestvam* [*GOST R 55513–2013. Locomotives. Requirements for strength and dynamic qualities*]. Moscow, Standartinform Publ., 2013, 75 p. (In Russian)

2. Kossov V. S., Volokhov G. M., Ogan'yan E. S. & Ovechnikov M. N. Normativnaya baza analiza prochnosti i resursa ob"yektov zheleznodorozhnogo transporta [Regulatory framework for the analysis of strength and useful life of railway transport facilities]. *Bulletin of the Institute of Natural Monopolies Research. Railway Equipment*, 2018, no. 4, pp. 60–67. (In Russian)

3. *Normy dlya rascheta i proyektirovaniya vagonov zheleznykh dorog MPS kolei 1520 (nesamokhodnykh)* [*Norms for calculation and design of wagons of the railroads of Ministry of Railways of a track of 1520 mm (not self-propelled)*]. Moscow, GosNIIV, VNIIZhT Publ., 1996, 319 p. (In Russian)

4. *GOST 33788–2016. Vagoni grusovie i passazirskie. Metodu ispitanii na prochnosti i dinamicheskim kachestva* [*GOST 33787–2016. Freight and passenger railcars. Methods of testing structural strength and dynamic performance*]. Moscow, Standartinform Publ., 2016, 41 p. (In Russian)

5. *Technical Regulations 001/2011 of the Customs Union "On Safety of Railway Rolling Stock"*. Eurasian Economic Commission electronic database. Moscow, EEC Publ., 2019. Available at: https://docs.eaeunion.org/docs/ru-ru/0024963/cuc_02082011_710 (accessed: 15.05.2019) (In Russian)

6. Ogan'yan E. S. Obosnovaniye naznachennogo sroka bezopasnoy ekspluatatsii lokomotivov [Rationale for the design period of safe operation of locomotives]. *Lokomotiv* [*Locomotive*], 2017, no. 7, pp. 34–35. (In Russian)

7. Tret'yakov A. V. *Prodleniye sroka sluzhby podvizhnogo sostava* [*Extension of the rolling stock service life*]. Moscow, MBA Publ., 2011, 304 p. (In Russian)

8. Kossov V. S., Makhutov N. A., Ogan'yan E. S. & Krasyukov N. F. Podkhody k otsenke resursa gruzovykh vagonov [Approaches to the assessment of freight cars useful life]. *Renessans zheleznykh dorog: fundamental'nyye nauchnyye issledovaniya i proryvnyye innovatsii* [*Railways Renaissance: Fundamental scientific researches and breakthrough innovations*]. Joint Scientific Council of Russian Railways; ed. by B. M. Lapidus. Noginsk, Analitika Rodis Publ., 2015, pp. 126–129. (In Russian)

9. Ogan'yan E. S., Volokhov G. M. *Raschety i ispytaniya na prochnost' nesushchikh konstruktsiy lokomotivov* [*Calculations and strength tests of the supporting structures of locomotives*]. Moscow, Training and Methodology Centre for Railway Transport Publ., 2013, 326 p. (In Russian)

10. Makhutov N. A. *Konstruktsionnaya prochnost', resurs i tekhnogennaya bezopasnost'*. V 2 ch. *1. Kriterii prochnosti i resursa* [*Structural strength, useful life and technology-related safety.* In 2 pt. *1. Criteria of strength and useful life*]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2005, 494 p. (In Russian)

Received: June 01, 2019
Accepted: June 11, 2019

Author's information
Aleksandr S. GASYUK – Head of Department, vnikti@ptl-kolomna.ru
Eduard S. OGAN'YAN – D. Sci in Engineering, Chief Researcher, vnikti@ptl-kolomna.ru

УДК 004.05

Об одном подходе к созданию информационно-безопасных систем связи

В. Б. Вилков [1], А. И. Дергачев [2], А. К. Черных [3], А. О. Кравцов [2]

[1] Военная академия материально-технического обеспечения им. генерала армии А. В. Хрулёва, Российская Федерация, 199034, Санкт-Петербург, наб. Макарова, 8
[2] Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9
[3] Санкт-Петербургский военный институт войск национальной гвардии Российской Федерации, Российская Федерация, 198206, Санкт-Петербург, ул. Пилютова, 1

Для цитирования: *Вилков В. Б., Дергачев А. И., Черных А. К., Кравцов А. О.* Об одном подходе к созданию информационно-безопасных систем связи // Известия Петербургского университета железнодорожного транспорта. – СПб.: ПГУПС, 2019. – Т. 16, вып. 2. – С. 292–300. DOI: 10.20295/1815-588X-2019-2-292-300

Аннотация

Цель: Рассмотреть вопрос о создании систем связи, в максимальной степени обеспечивающих информационную безопасность обрабатываемых в их рамках данных. Использовать для определения оптимального варианта применения всей сети связи вместо вероятностной модели, разработка которой представляет собой достаточно сложную техническую задачу, теорию нечетких множеств. На основе двух предложенных теорем доказать обоснованность предлагаемого подхода. Сформулировать задачи, являющиеся развитием предложенного подхода. **Методы:** Применяются следующие методы: математического программирования (модификация задачи о кратчайшем соединении), теория графов, теория нечетких множеств и нечеткой логики. **Результаты:** Разработан алгоритм нахождения системы связи в состоянии, в максимальной степени обеспечивающем информационную безопасность обрабатываемых данных. Приведены две теоремы, доказывающие адекватность указанного алгоритма и расчетный пример. Предложены две задачи, реализующие создание рассматриваемых систем связи, основанные на идеях многокритериальной оптимизации. **Практическая значимость:** Сформулированная и решенная задача дает возможность минимизировать доступ хакеров к информации. Кроме того, на основе описанного алгоритма легко может быть создана компьютерная программа, позволяющая проектировать системы связи, в максимальной степени обеспечивающие информационную безопасность обрабатываемых данных.

Ключевые слова: Информационная безопасность системы, надежность системы связи, теория нечетких множеств, нечеткая логика, ребра графов, максимальный остов.

В статье рассматривается задача по созданию наиболее эффективной по критерию информационной безопасности (в дальнейшем надежной) системы связи. Она является модификацией известной задачи о кратчайшем соединении [1–4]. Их отличие состоит в том, что в качестве характеристики канала связи используется не его стоимость, а его надежность (информационная безопасность), для чего привлекаются теория нечетких множеств и нечеткая логика [5–13].

Отметим, что с помощью этой задачи Росси, Хайзер и Кинг предложили схему прокладки телевизионных кабелей, соединяющих все станции в единую сеть [14]. Кроме того, предложенная задача актуальна и в ряде других

случаев, когда требуется связать определенные узлы (пункты) с наименьшей затратой сил и средств, т. е. построить минимальную сеть. В [15] рассмотрен пример, в котором в качестве характеристики канала связи используется вероятность утери информации при его применении. В литературе отмечается, что некоторые задачи приводят к необходимости построить сеть не минимального, а максимального веса. К этой задаче также применим алгоритм Краскала, если изменить знак веса каждого ребра на противоположный. Если требуется построить сеть с минимальным произведением весов ребер, то, учитывая, что $\log(ab) = \log(a) + \log(b)$, минимальное остовное дерево графа, в котором веса ребер заменены их логарифмами, дает нужное решение. Правда, вес ребер обязательно должен быть положительным.

Сформулируем задачу на языке теории графов [2, 3]. Ребро, которому соотнесено некоторое число (длина, вес, пропускная способность, надежность и т. п.), будем называть взвешенным. Граф, все ребра которого взвешенные, будем также называть взвешенным. Назовем *остовом связного графа G* подграф, представляющий собой дерево и содержащий все вершины графа *G*. Требуется найти самый надежный остов.

Сформулированная задача особенно актуальна при создании сетей связи, когда важно минимизировать доступ хакеров к информации.

Под надежностью канала связи естественно понимать то, насколько мы уверены в безопасности его использования в ходе информационного обмена. Показателем надежности канала связи может служить вероятность того, что никаких отрицательных последствий из-за воздействия на него со стороны хакеров, природных и техногенных катаклизмов в ходе информационного обмена не будет. Но здесь возникает серьезный вопрос: откуда взять эти вероятности, особенно, если параметры функционирования канала связи конфиденциальные, что вполне естественно. К тому же, даже если такие вероятности известны, остается достаточно сложная технически задача по определению оптимального варианта применения всей сети связи.

Для определения надежности каналов связи и всей сети связи будем использовать теорию нечетких множеств. Напомним необходимые понятия данной теории.

Понятие нечеткого множества – попытка математической формализации нечеткой информации для построения математических моделей. В основе такого понятия лежит представление о том, что составляющие это множество элементы, характеризующиеся общим свойством, могут обладать им в различной мере и, следовательно, принадлежать к данному множеству с различной степенью. При таком подходе говорят о том, что некоторый элемент принадлежит данному множеству, и необходимо указать, с какой степенью элемент удовлетворяет свойствам множества.

Нечетким множеством $\widehat{A}$ на универсальном множестве U называется совокупность пар $\left(\mu_{\widehat{A}}(u), u\right)$, где $\mu_{\widehat{A}}(u)$ – степень принадлежности элемента $u \in U$ к нечеткому множеству $\widehat{A}$. Функция $\mu_{\widehat{A}}(u)$ называется функцией принадлежности нечеткого множества $\widehat{A}$, $\mu_{\widehat{A}}(u)$ выражает степень принадлежности элемента $u \in U$ к нечеткому множеству $\widehat{A}$. Степень принадлежности – это число из отрезка $[0, b]$. Чем она выше, тем в большей мере элемент универсального множества соответствует свойствам нечеткого множества, тем с большей надежностью можно утверждать, что он является элементом этого множества.

Как правило, предполагается, что функция принадлежности принимает значения из отрезка [0, 1]. Вопросы, связанные с определением вида функции принадлежности и их построения, изучаются, например, в [10, 16].

В дальнейшем вместо словосочетания «значение функции принадлежности» будем использовать словосочетания «степень принадлежности», «информационная безопасность», «надежность».

Определения нечетких теоретико-множественных операций объединения, пересечения и других могут быть обобщены из обыч-

ной теории множеств. Приведем определения нечетких теоретико-множественных операций пересечения и объединения, предложенные Л. Заде [17].

Пересечением нечетких множеств $\widehat{A}$ и $\widehat{B}$, заданных на *U*, называется нечеткое множество $\widehat{C} = \widehat{A} \cap \widehat{B}$ с функцией принадлежности

$$\mu_{\widehat{C}}(u) = \min\left\{\mu_{\widehat{A}}(u), \mu_{\widehat{B}}(u)\right\} \qquad (1)$$

для всех $u \in U$ (рис. 1).

Операция нахождения минимума также обозначается знаком $\wedge$, т. е.

$$\mu_{\widehat{C}}(u) = \mu_{\widehat{A}}(u) \wedge \mu_{\widehat{B}}(u).$$

Объединением нечетких множеств $\widehat{A}$ и $\widehat{B}$, заданных на *U,* называется нечеткое множество $\widehat{D} = \widehat{A} \cup \widehat{B}$ с функцией принадлежности

$$\mu_{\widehat{D}}(u) = \max\left\{\mu_{\widehat{A}}(u), \mu_{\widehat{B}}(u)\right\} \qquad (2)$$

для всех $u \in U$ (рис. 2).

Операция нахождения максимума также обозначается знаком $\vee$, т. е.

$$\mu_{\widehat{D}}(u) = \mu_{\widehat{A}}(u) \vee \mu_{\widehat{B}}(u).$$

Нечеткое множество в случае, когда универсальным множеством является числовая ось, принято называть нечеткой величиной. Если функция ее принадлежности непрерывна и имеет единственный максимум, она называется нечетким числом.

Следуя [17–19], введем некоторые понятия нечеткой логики. В классической математической логике значениями истинности высказываний могут быть только два: «истина» и «ложь», при этом первому соответствует логическая единица, а второму – логический нуль. В нечеткой логике рассматриваются нечеткие высказывания, которые могут быть истинными или ложными в какой-то степени. Степень истинности нечеткого высказывания принимает значения из замкнутого промежутка [0; 1], при этом 0 совпадает со значением «ложь», 1 – со значением «истина».

Степень истинности нечеткого высказывания $\tilde{F}$ обозначим через $\mu\left(\tilde{F}\right)$.

Над нечеткими высказываниями вводятся различные логические операции, остановимся на двух из них: конъюнкции и дизъюнкции.

Рассмотрим два нечетких высказывания $\widehat{A}$ и $\widehat{B}$. Нечеткие логические операции И ($\wedge$) и ИЛИ ($\vee$) по аналогии с теоретико-множественными операциями объединения и пересечения выполняются по следующим правилам:

$$\begin{aligned} \mu(\tilde{A} \wedge \tilde{B}) &= \min\{\mu(\tilde{A}), \mu(\tilde{B})\}, \\ \mu(\tilde{A} \vee \tilde{B}) &= \max\{\mu(\tilde{A}), \mu(\tilde{B})\}. \end{aligned} \qquad (3)$$

Под надежностью канала связи будем понимать степень истинности нечеткого высказывания «канал связи надежен». Предполагается, что этот показатель известен для любого из каналов связи, который можно создать. В силу определения конъюнкции нечетких высказываний (формула (3)) надежность (степень истинности) сети равна минимальной из надеж-

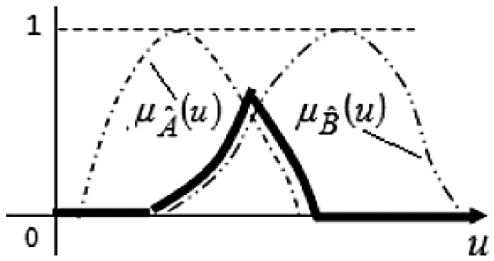


Рис. 1. Пересечение нечетких множеств с функцией принадлежности (1)

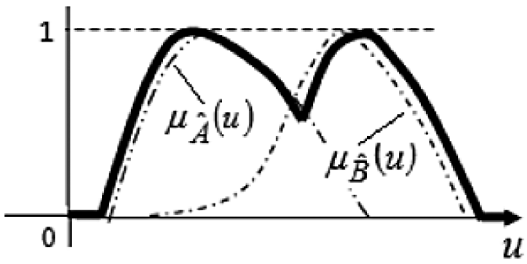


Рис. 2. Объединение нечетких множеств с функцией принадлежности (2)

ностей (степеней истинности) каналов связи, входящих в эту сеть.

Итак, пусть дан связный взвешенный граф $G = (V, E)$, его ребра соответствуют каналам связи, каждому из них соотнесено число – степень истинности нечеткого высказывания «канал связи надежен». Требуется найти остов этого графа, для которого степень истинности нечеткого высказывания «все каналы связи надежны» максимальна.

Решать задачу будем при помощи модифицированного алгоритма Краскала, заменив в нем только критерий присоединения очередного ребра к уже построенному (перспективному) множеству ребер, и искать будем не минимальный, а максимальный остов (остов максимального веса). Обозначим максимальный остов МакО.

Для рассматриваемого случая имеют место теоремы 1 и 2.

Теорема 1. *Среди решений задачи о самом надежном подграфе, содержащим все ребра рассматриваемого графа, имеется остов.*

Доказательство. Предположим противное, т. е. подграф, являющийся решением задачи (соединяющий все вершины рассматриваемого графа и имеющий максимальный вес), не является деревом. Тогда в нем существует цикл. Убрав произвольный канал связи данного цикла, получим подграф, содержащий все вершины, но не меньшего веса. Если подграф – дерево, то построим требуемый остов, в противном случае в этом подграфе есть цикл и, убирая в нем произвольное ребро, будем иметь новый подграф не меньшего веса и т. д. В силу конечности числа ребер в исходном графе, в конце концов, находим требуемый остов. Теорема доказана.

Изменяя с учетом рассматриваемого понятия «веса» алгоритм Краскала, построим следующий алгоритм.

Пусть дан связный граф $G = (V, E)$, имеющий n вершин и m ребер, пусть для любого ребра $e \in E$ определен его вес $d(e)$ (его надежность).

Начинаем с графа $G_0 = (V, \varnothing)$, который состоит только из вершин графа $G = (V, E)$ и не имеет ребер. Его можно рассматривать как n компонент связности, каждая из которых содержит только одну вершину.

Алгоритм состоит из последовательности этапов. На этапе с номером $k = 1, 2, \ldots, n-1$ строится граф $G_k = (V, T_k)$, для этого к множеству ребер T_{k-1} графа G_{k-1} добавляется одно ребро, которое выбирается по такому правилу:

– в графе $G = (V, E)$ выбираем ребро максимального веса из числа ребер, не принадлежащих T_{k-1};

– если добавление этого ребра к T_{k-1} не приводит к образованию цикла, то, присоединив это ребро к T_{k-1}, получаем T_1 и граф $G_k = (V, T_k)$;

– если цикл образуется, то из оставшихся ребер графа $G_k = (V, T_k)$, не принадлежащих T_{k-1}, выбираем ребро максимального веса и т. д.

Граф G_{n-1} является остовом графа G максимального веса.

Теорема 2. *Изложенный алгоритм дает МакО.* (Для классической постановки см. [4].)

Доказательство. Покажем сначала, что при $0 < i < n-1$ можно построить граф G_i. Действительно, рассмотрим множества ребер T_{i-1} и $E \backslash T_{i-1}$. В силу связности графа G найдется такое ребро (k,l), что $k \in T_{i-1}$ и $l \in E \setminus T_{i-1}$. Оно не образует цикла с ребрами из T_{i-1}. Выбрав из всех таких ребер ребро с максимальным весом, получим ребро, присоединение которого к T_{i-1} даст T_i.

Докажем теперь, что T_{n-1} является остовом максимального веса в графе G.

Рассмотрим граф G_{n-1} с множеством ребер T_{n-1}. Так как он связный, состоит из n вершин, $n-1$ ребра и не имеет циклов, то он является деревом (см. [20]). Покажем, что вес дерева G_{n-1} максимален.

Предположим, что это не так. Среди всех остовов графа G, имеющих максимальный вес, выберем такой остов с множеством ребер T, который имеет с T_{n-1} максимальное число общих ребер.

Пусть $e_i = (a, b)$ – ребро из T_{n-1}, не содержащееся в T и имеющее минимальный номер p среди ребер множества T_{n-1}, которые не вхо-

дят в T. (Предполагается, что ребра в множестве T_{n-1} получили номера в процессе его построения, в порядке их присоединения к строящемуся графу.) В множестве T есть простая цепь, соединяющая вершины a и b. Присоединив к ней ребро e_i, получим цикл, в котором есть ребро e, не входящее в T_{n-1}. Заменив в T ребро e на e_i, имеем новый остов $T' = T \setminus \{e\} \cup \{e_i\}$. Но T – остов максимального веса, таким образом, вес T' не больше веса T. Отсюда следует, что ребро e_i весит не больше ребра e.

Вместе с тем, присоединяя ребро e к T_{i-1}, при $i = 1$ полагаем $T_{i-1} = \varnothing$, тогда не получим цикла, поскольку ребра $e_1, e_2, \ldots, e_{i-1}, e$ входят в множество T. Если бы вес ребра e был больше веса ребра e_i, то при построении дерева T_i взяли бы не e_i, а e (или другое ребро с весом, бóльшим веса e_i). Следовательно, вес ребра e_i равен весу ребра e и веса деревьев с множествами ребер T и T' одинаковые.

Итак, T' – остов максимального веса. Число ребер, общих для множеств T' и T, больше, чем число общих ребер для T_{n-1} и T ($T' = T \setminus \{e\} \cup \{e_i\}$), что противоречит выбору множества T. Полученное противоречие доказывает теорему.

Проиллюстрируем предложенные теоретические положения примером.

Возможные линии связи представлены в виде графа G на рис. 3. Рядом с ребрами, изображающими линии связи, указаны надежности этих линий (например, степень уверенности в том, что при передаче информации по данной линии несанкционированного доступа к информации не будет). Основным источником информации (пунктом выдачи директивных указаний) является пункт 1, т. е. необходимо передавать сообщения из него во все остальные и установить, какие каналы связи следует создать, чтобы надежность передачи информации без нарушения ее конфиденциальности в рамках этой системы связи была бы максимальной.

Определим $G_0 = (V, \varnothing)$, $V = \{1, 2, 3, 4\}$. Перечислим ребра, из которых состоит МакО, указав их в том порядке, в котором они присоединялись к создаваемому остову:

$$(4,6), (3,4), (4,5), (2,5), (1,2).$$

Это остов максимальной надежности, его показатель надежности равен 0,7.

Заметим, что порядок построения остова мог быть и другим. Отметим также, что присоединение ребра (3,5) вместо, скажем, (2,5) невозможно, так как ребра $(3,5), (3,4), (4,5)$ образуют цикл.

Усложним немного формулировку рассмотренной задачи: будем учитывать не только показатель надежности канала связи, но и стоимость его создания. Пусть каждому ребру

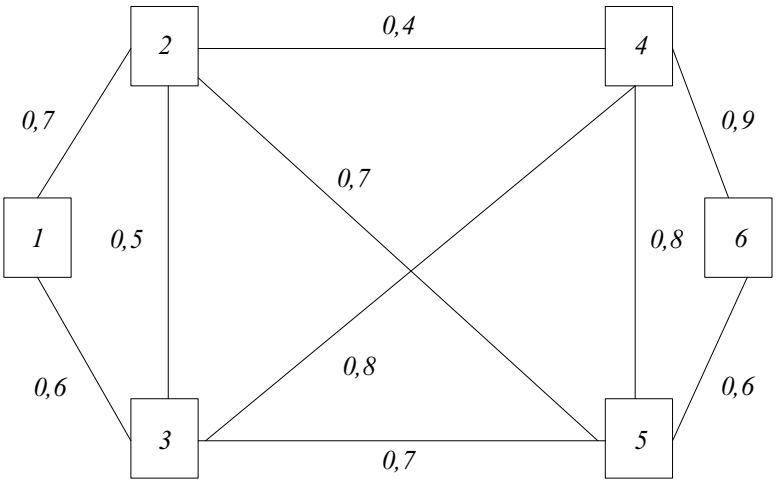


Рис. 3. Структура графа, на котором указаны все возможные каналы связи

графа $G = (V, E)$ соотнесены степень истинности высказывания «канал связи надежен» (надежность) и значение стоимости его создания (стоимость). Рассмотрим в связи со сказанным следующее:

1) построить максимально надежный остов при условии, что его стоимость не должна быть больше S;

2) построить остов минимальной стоимости при условии, что его надежность должна быть не меньше R.

Первую задачу можно решать, последовательно исключая из исходного графа ребра минимальной надежности.

Решение начинается с рассмотрения исходного графа, для которого строится остов минимальной стоимости. Пусть его стоимость меньше S и его надежность равна r_1. Удаляем из исходного графа каналы связи, надежность которых не превосходит r_1. Для получившегося графа опять строим остов минимальной стоимости. Его стоимость и надежность будут не меньше, чем у полученного ранее. Пусть его надежность равна r_2. Удаляем из исходного графа каналы связи, надежность которых не превосходит r_2, и т. д., пока не будем иметь остов стоимостью больше S или граф, не содержащий все вершины исходного.

Для решения второй задачи уберем из исходного графа каналы связи, надежность которых меньше R, и построим остов минимальной стоимости для полученного графа. Если при этом граф содержит не все вершины исходного графа, то, значит, сформулированная задача не имеет решения.

В результате проведенной работы предложен легко программируемый алгоритм создания системы связи, в максимальной степени обеспечивающей информационную безопасность, который реализуется в рамках информационного обмена.

Библиографический список

1. Белоусов А. И. Дискретная математика : учебник для студентов высш. техн. учеб. заведений / А. И. Белоусов, С. Б. Ткачев ; под ред. В. С. Зарубина, А. П. Кришенко. – Изд. 4-е, испр. – М. : Изд-во МГТУ, 2006. – 744 с. – (Математика в технических университетах. Вып. 19.)

2. Кормен Т. Минимальные остовные деревья / Т. Кормен, Ч. Лейзерсон, Р. Ривест, К. Штайн ; под ред. И. В. Красикова // Алгоритмы : построение и анализ. – 2-е изд. – М. : МЦНМО, 2005. – 1296 с.

3. Таха Х. А. Введение в исследование операций / Х. А. Таха ; пер. с англ. и ред. А. А. Минько. – 7-е изд. – М.: Вильямс, 2005. – 901 с.

4. Kruskal B. On the shortest spanning subtree of a graph and the travelimg salesman problem / B. Kruskal // Proc. AMS. – 1956. – Vol. 7, N 1. – P. 48–49.

5. Черных А. К. Управление безопасностью транспортных перевозок при организации материального обеспечения сил и средств МЧС России в условиях чрезвычайной ситуации / А. К. Черных, В. Б. Вилков // Пожаровзрывобезопасность. – 2016. – Т. 25, № 9. – С. 52–59.

6. Вилков В. Б. Алгоритм поиска оптимального маршрута выдвижения подразделения войск национальной гвардии / В. Б. Вилков, А. К. Черных, А. Ю. Гарькушев, А. И. Зайцев // Изв. Рос. академии ракетных и артиллерийских наук. – 2017. – № 1 (96). – С. 29–33.

7. Вилков В. Б. Теория и практика оптимизации решений на основе нечетких множеств и нечеткой логики / В. Б. Вилков, А. К. Черных, А. В. Флегонтов. – СПб. : Изд-во РГПУ им. А. И. Герцена, 2017. – 160 с.

8. Vilkov V. B. The choice of an optimal methodology for the retraining organization of psychologists based on the use of mathematical methods / V. B. Vilkov, O. I. Shcherbakova, A. K. Chernykh, V. P. Andreev, T. L. Khudyakova, S. N. Kazakova // Espacios. – 2018. – Vol. 39, N 20. – P. 16.

9. Кофман А. Введение в теорию нечетких множеств / А. Кофман. – М. : Радио и связь,1982. – 429 с.

10. Леоненков А. В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH / А. В. Леоненков. – СПб. : БХВ-Петербург, 2005. – 725 с.

11. Орловский С. А. Проблемы принятия решений при нечеткой исходной информации / С. А. Орловский. – М. : Наука, 1981. – 206 с.

12. Яхъяева Г. Э. Нечеткие множества и нейронные сети / Г. Э. Яхъяева. – М. : Бином, 2006. – 315 с.

13. Zadeh L. Fuzzy sets / L. Zadeh // Information and Control. – 1965. – N 8. – P. 338–353.

14. Rossi J. A. A cost analysis of minimum gistance NV networking for Broadcasting Medical Information / J. A. Rossi, R. S. Heiser, N. S. King. – Santa Monica, California : RM-6204-HLM RAND Corp., 1970. – 89 p.

15. Прикладная теория графов. Лекция 7 // URL : http://www.studfiles.ru/preview/3350252. L7.doc (дата обращения : 08.04.2019).

16. Борисов А. Н. Принятие решений на основе нечетких моделей : Примеры использования / А. Н. Борисов, О. А. Крумберг, И. П. Федоров. – Рига : Зинатне, 1990. – 184 с.

17. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений / Л. Заде ; пер. с англ. ; под ред. Н. Н. Моисеева, С. А. Орловского. – М. : Мир, 1976. – 166 с. – (Математика. Новое в зарубежной науке. 3.)

18. Асаи К. Прикладные нечеткие системы / К. Асаи, Д. Ватада, С. Сокуке и др. ; под ред. Т. Тэрано и др. ; пер. с англ. Ю. Н. Чернышова. – М. : Мир, 1993. – 368 с.

19. Штовба С. Д. Введение в теорию нечетких множеств и нечеткую логику / С. Д. Штовба. – Винница : УНИВЕРСУМ–Винница, 2001. – 71 с.

20. Емеличев В. А. Лекции по теории графов / В. А. Емеличев, О. И. Мельников, В. И. Сарванов, Р. И. Тышкевич. – М. : Наука, 1990. – 384 с.

21. Гладких В. П. Особенности моделирования системы информационной безопасности в органах военного управления / В. П. Гладких, В. Г. Швед, А. И. Дергачев // Национальные приоритеты России. Сер. 1. Наука и военная безопасность. – 2015. – № 1 (1). – С. 47–49.

Дата поступления: 26.03.2019
Решение о публикации: 04.04.2019

Контактная информация
ВИЛКОВ Валерий Борисович – канд. физ-мат. наук, доцент, amirusha@rambler.ru
ДЕРГАЧЕВ Алексей Иванович – канд. воен. наук, доцент, профессор, d_ader@mail.ru
ЧЕРНЫХ Андрей Климентьевич – доктор техн. наук, профессор, nataliachernykh@mail.ru
КРАВЦОВ Антон Олегович – аспирант, kravcovanton@mail.ru

On an approach to data-secure communication systems

V. B. Vilkov[1], A. I. Dergachev[2], A. K. Chernykh[3], A. O. Kravtsov[2]
[1] Military Academy for Logistics named after General of the Army A. V. Khrulev, 8, Makarova nab., Saint Petersburg, 199034, Russian Federation
[2] Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation
[3] Saint Petersburg Military Institution of the Russian Federation National Guard, 1, Pilyutov ul., Saint Petersburg, 198206, Russian Federation

For citation: *Vilkov V. B., Dergachev A. I., Chernykh A. K., Kravtsov A. O.* On an approach to data-secure communication systems. *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2019, vol. 16, iss. 2, pp. 292–300. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2019-2-292-300

Summary

Objective: To consider the question of communication system design, that will fully provide information security of the data processed within the framework of the former. To use fuzzy set theory for determination of an optimum application alternative of the whole communication network instead of a probabilistic model, the development of which represents a rather complicated technical task. To justify the use of the given approach on the basis of the two presented theorems. To formulate the tasks, that will make it possible to develop the approach in question. **Methods:** The following methods are used in

the study: mathematical programming (modification of the task on the shortest connection), the theory of graphs, fuzzy set theory and fuzzy logic. **Results:** An algorithm of detecting communication system in the state that will fully provide information security of the processed data was developed. Two theorems were introduced, that justify application of the given algorithm as well as the design example. Two tasks were introduced that implement the design of communication systems in question based on the ideas of multicriteria optimization. **Practical importance:** The stated and solved task makes it possible to minimize hackers' access to information. Moreover, a software program that will be used for the design of communication systems fully providing information security of the processed data can be easily created on the basis of the described algorithm.

Keywords: Information security of the system, reliability of the communication system, theory of fuzzy sets, fuzzy logic, edges of graphs, maximum skeleton.

References

1. Belousov A. I. & Tkachev S. B. *Diskretnaya matematika* [*Discrete mathematics*]. Textbook for students of technical colleges. Ed. by V. S. Zarubin, A. P. Krishenko. 4th ed., rev. Moscow, MGTU [Bauman Moscow State Technical University] Publ., 2006, 744 p. (Mathematics in technical universities. Iss. 19.) (In Russian)

2. Kormen T., Leizerson Ch., Rivest R. & Shtain K. Minimalniye ostovniye derevya [Minimum spanning trees]. Ed. by I. V. Krasikov. *Algoritmy: postroeniye i analiz* [*Algorithms: design and analysis*]. 2nd ed. Moscow, MTsNMO [Moscow Center for Continuous Mathematical Education] Publ., 2005, 1296 p. (In Russian)

3. Taha H.A. *Vvedeniye v issledovniye operatsiy* [*Introduction to operational analysis*]. Tr. from Eng.; ed. by A. A. Minko. 7th ed. Moscow, Williams Publ., 2005, 901 p. (In Russian)

4. Kruskal B. On the shortest spanning subtree of a graph and the travelimg salesman problem. *Proceedings of the AMS*, 1956, vol. 7, no. 1, pp. 48–49.

5. Chernykh A. K. & Vilkov V. B. Upravleniye bezopasnostyu transportnykh perevozok pry organizatsii materialnogo obespecheniya sil i sredstv MCHS Rossii v usloviyakh chrezvychainoy situatsii [Transportation security control in providing logistical support for the Ministry of Emergency Situations of Russia under the conditions of emergency situations]. *Pozharovzryvobezopasnost* [*Fire explosion safety*], 2016, vol. 25, no. 9, pp. 52–59. (In Russian)

6. Vilkov V. B., Chernykh A. K., Garkushev A. Y. & Zaitsev A. I. Algoritm poiska optimalnogo marshruta vydvizheniya podrazdeleniya voisk natsionalnoy gvardii [Search algorithm for optimum approach route of the National Guard military forces]. *Izvestiya Ros. Akademii raketnykh i artilleriyskykh nauk* [*Proceedings of the Russian Academy of Rocket and Artillery Sciences*], 2017, no. 1 (96), pp. 29–33. (In Russian)

7. Vilkov V. B., Chernykh A. K. & Flegontov A. V. *Teoriya i praktika optimizatsii resheniy na osnove nechetkykh mnozhestv i nechetkoy* [*Theory and practice of decision optimization on the basis of fuzzy sets and fuzzy*]. Saint Petersburg, RGPU [Herzen State Pedagogical University] Publ., 2017, 160 p. (In Russian)

8. Vilkov V. B., Shcherbakova O. I., Chernykh A. K., Andreev V. P., Khudyakova T. L. & Kazakova S. N. The choice of an optimal methodology for the retraining organization of psychologists based on the use of mathematical methods. *Espacios*, 2018, vol. 39, no. 20, p. 16.

9. Kofman A. *Vvedeniye v teoriyu nechetkikh mnozhestv* [*Introduction to fuzzy-set theory*]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1982, 429 p. (In Russian)

10. Leonenkov A. V. Nechetkoye modelirovaniye v srede MATLAB i fuzzyTECH [Fuzzy modeling in MATLAB and fuzzyTECH environment]. Saint Petersburg, BHV-Petersburg Publ., 2005, 725 p. (In Russian)

11. Orlovskiy S. A. Problemy prinyatiya resheniy pry nechetkoy iskhodnoy informatsii [Decision problems in case of fuzzy input information]. Moscow, Nauka Publ., 1981, 206 p. (In Russian)

12. Yakhyeva G. E. *Nechetkiye mnozhestva i neyronniye sety* [*Fuzzy sets and neural networks*]. Moscow, Binom Publ., 2006, 315 p. (In Russian)

13. Zadeh L. Fuzzy sets. *Information and Control*, 1965, no. 8, pp. 338–353.

14. Rossi J.A., Heiser R.S. & King N.S. A cost analysis of minimum gistance NV networking for Broadcasting Medical Information. Santa Monica, California, RM-6204-HLM RAND Corp. Publ., 1970, 89 p.

15. *Prikladnaya teoriya grafov. Lektsiya 7* [*Applied graph theory. Lecture 7*]. Available at: http://www.studfiles.ru/preview/3350252L7.doc (accessed: 08.04.2019). (In Russian)

16. Borisov A.N., Krumberg O.A. & Fedorov I.P. *Prinyatiye resheniy na osnove nechetkikh modeley. Primery ispolzovaniya* [*Decision-making on the basis of fuzzy models. Examples of use*]. Riga, Zinatne Publ., 1990, 184 p. (In Russian)

17. Zade L. Ponyatiye linvisticheskoy peremennoy i ego primeneniye k prinyatiyu priblizhennykh resheniy [The notion of a linguistic variable and its application in making approximate solutions]. Tr. from Eng.; ed. by N.N. Moiseyev, S.A. Orlovskiy. Moscow, Mir Publ., 1976, 166 p. (Mathematics. The new in foreign science. 3.)

18. Asau K., Vatada D., Sokuke S. et al. *Prikladniye nechetkiye sistemy* [*Application fuzzy systems*]. Ed. by T. Terano et al.; tr. from Eng. Y.N. Chernyshova. Moscow, Mir Publ., 1993, 368 p. (In Russian)

19. Shtovba S.D. *Vvedeniye v teoriyu nechetkikh mnozhestv i nechetkuyu logiku* [*Introduction to the fuzzy-set theory and fuzzy logics*]. Vinnitsa, UNIVERSUM–Vinnitsa Publ., 2001, 71 p. (In Russian)

20. Emelichev V.A., Melnikov O.I., Sarvanov V.I. & Tashkevich R.I. *Lektsii po teorii grafov* [*Lectures on graph theory*]. Moscow, Nauka Publ., 1990, 384 p. (In Russian)

21. Gladkikh V. P,, Shved V.G. & Dergachev A.I. Osobennosty modelirovaniya sistemy informatsionnoy bezopasnosty v organakh voyennogo upravleniya [The specificities of modeling security information systems for military authorities]. *Natsionalniye prioritety Rossii. Series 1. Nauka i voennaya bezopasnost* [*National priorities of Russia. Ser. 1. Science and military security*], 2015, no. 1 (1), pp. 47–49. (In Russian)

Received: March 26, 2019
Accepted: April 04, 2019

Author's information:
Valery B. VILKOV – PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor, amirusha@rambler.ru
Aleksey K. DERGACHEV – PhD in Military, Associate Professor, Professor, d_ader@mail.ru
Andrey K. CHERNYKH – D. Sci. in Engineering, Professor, nataliachernykh@mail.ru
Anton O. KRAVTSOV – Postgraduate Student, kravcovanton@mail.ru

УДК 519.816

Отладка типовых одномерных функций полезности в модели многомерной полезности*

С. В. Микони [1], **Д. П. Бураков** [2]

[1] Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук, Российская Федерация, 199178, Санкт-Петербург, 14-я линия В. О., 39

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

Для цитирования: *Микони С. В., Бураков Д. П.* Отладка типовых одномерных функций полезности в модели многомерной полезности // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2019. – Т. 16, вып. 2. – С. 301–314. DOI: 10.20295/1815-588X-2019-2-301-314

Аннотация

Цель: Решение задачи по созданию одномерных функций полезности (ценности) показателей, адекватно отражающих предпочтения лица, принимающего решение (ЛПР), является наиболее наукоемким и трудоемким этапом разработки многомерной модели полезности объекта. **Методы:** При ограниченных трудовых и временных ресурсах на практике прибегают к упрощенному построению одномерных функций полезности, в частности, на базе параметризации типовых функций с последующим уточнением значений параметров на основе известного ЛПР порядка объектов (обучающей выборки). Используются методы теории многомерной полезности, основанные на выявлении склонности (несклонности) ЛПР к риску. Параметризация функций осуществляется путем определения условий изменения мест в рейтинге, характеризующем порядок объектов. **Результаты:** Предложенный подход позволяет значительно сократить время создания одномерных функций полезности оцениваемых показателей, адекватных предпочтениям ЛПР, даже с учетом увеличения времени на отладку многомерной модели полезности. **Практическая значимость:** Описанный подход ориентирован на оценивание качества и технического уровня сложных объектов при наличии ограничений на трудовые и временные ресурсы, отводимые на разработку моделей оценивания. Он может быть также применен в практике оценивания качества изделий массового применения ЛПР, не обладающими высокой квалификацией в области теории принятия решений.

Ключевые слова: Критерий, предпочтения, склонность к риску, функция полезности, логистическая функция, многомерная полезность, рейтинг.

Введение

Одним из подходов к решению задач многокритериального оценивания альтернатив (объектов) является оценивание их по полезности [1]. Под полезностью объекта в таких задачах понимается степень его соответствия цели, поставленной лицом, принимающим решение (ЛПР). В методах скалярной многокритериальной оптимизации полезность

* Исследования, выполненные по данной тематике, проводились при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 17-01-00139 и 19-08-00989) в рамках бюджетной темы № 0073-2019-0004.

объекта вычисляется путем обобщения значений одномерных функций полезности (ФП) показателей (признаков), характеризующих оцениваемые объекты. ФП в таких задачах играют двойственную роль: с одной стороны, они отражают предпочтения ЛПР, а с другой – выполняют нормирование значений разнородных признаков [2], приводя их к единой шкале с целью последующего агрегирования в обобщенную оценку полезности объекта.

Построение ФП, адекватно отражающих предпочтения ЛПР, представляет собой отдельную сложную задачу. К одному из первых способов создания одномерных ФП относится построение ее по точкам [3]. В этой работе в качестве модели предпочтений, связанных с риском потерять вложенные средства, использовалась лотерея. Метод опроса ЛПР базируется на основе решения уравнения, определяющего условия его отказа от участия в лотерее в пользу получения гарантированного выигрыша. В результате опроса ЛПР находятся значения ФП на некотором множестве точек шкалы показателя, на основе чего строится ее график.

Экспериментально было установлено, что в общем случае ФП нелинейна, более того, она может иметь и отрицательные значения, отражающие риск потерь. На основе отношения безразличия между участием в лотерее и получением гарантированного выигрыша было сформулировано условие склонности ЛПР к риску: оно не склонно к риску, если предпочитает получить наверняка ожидаемый выигрыш вместо участия в любой невырожденной лотерее. Мера склонности (несклонности) ЛПР к риску отражается формой ФП: она выпукла на областях склонности к риску, линейна на областях безразличия к риску и вогнута там, где ЛПР склонно избегать риска (проявляет осторожность).

В работе [4] рассмотрены аналитические способы построения одномерной монотонной ФП, учитывающие меру склонности (несклонности) ЛПР к риску. Отмечено, что линейная ФП, соответствующая нормирующей функции критерия, отражает нейтральное отношение (безразличие) ЛПР к риску. Анализ риска был распространен и на немонотонные ФП.

В работе [5] был предложен алгоритм построения ФП относительно реальной цели, заданной на шкале показателя. Целевое значение показателя разбивает его шкалу на два смежных интервала. Для каждого из них строится своя ФП с учетом склонности (несклонности) ЛПР к риску. Метод расширяется на несколько участков.

Оригинальные методы построения одномерных ФП излагаются в [6–9]. Работа [6] посвящена ранним этапам создания функций многих атрибутов при отсутствии априорных предположений о структуре предпочтений ЛПР; в ней предлагается практический метод оценивания взаимодействий монотонных функций. В [7] рассматривалось широкое семейство функций, представляющих различные структуры предпочтений. Построены интерактивные алгоритмы поиска наиболее предпочтительной структуры, соответствующей предпочтениям ЛПР. Сближение алгоритмов достигается путем постепенного уменьшения пространства решений на базе информации о предпочтениях, получаемой от ЛПР с учетом свойств ФП.

В статье [8] рассматривается альтернатива непараметрическим сегментарным вогнутым формам, удовлетворяющим теоретическим свойствам ФП, связанным с монотонностью и вогнутостью. Предлагается использовать приближение к произвольной форме ФП, основанной на плавном смешивании функций Кобба–Дугласа. Соответствие ФП предпочтениям ЛПР оценивается с помощью байесовского подхода. Для экспериментальной проверки используется метод Монте-Карло, где в качестве истинной формы ФП принято симметричное обобщение Макфаддена. Предложенный метод применялся к большому банковскому набору данных США, а также к набору глобальных банковских данных. Байесовский под-

ход использован также в работе [9], предлагающей метод оценивания соответствия предпочтениям ЛПР ФП, построенных по точкам на основе ответов ЛПР на вопросы о его предпочтениях.

Анализ публикаций [3–9] позволяет охарактеризовать приведенные в них методы построения одномерных ФП как наукоемкие и трудно реализуемые на практике. Поэтому при решении многих практических задач оценивания объектов с большим количеством показателей прибегают к упрощенным способам построения одномерных ФП. В частности, в [10] одномерные ФП показателей задаются балльными оценками.

В работе [11] было предложено трактовать ФП как функцию, характеризующую частичное достижение цели: ЛПР задает на шкале показателя целевое значение (точечное или интервальное), далее определяется склонность или несклонность ЛПР к риску относительно этого значения. Такой подход дает возможность перейти от трудоемкого создания ФП по точкам к параметризации обоснованной типовой функции [2].

Приведем монотонные ФП, принятые за типовые, параметризация которых будет рассматриваться в данной работе:

$$u_P^{\max}(y;\alpha)=\left(\frac{y-y_{\min}}{y_{\max}-y_{\min}}\right)^{\alpha}, \qquad (1)$$

$$u_P^{\min}(y;\alpha)=\left(\frac{y_{\max}-y}{y_{\max}-y_{\min}}\right)^{\alpha}, \qquad (2)$$

$$u_L^{\max}(y;c,\beta)=\left(1+\exp\left(-\beta\cdot(y-c)\right)\right)^{-1}, \qquad (3)$$

$$u_L^{\min}(y;c,\beta)=\left(1+\exp\left(\beta\cdot(y-c)\right)\right)^{-1}. \qquad (4)$$

Функции (1), (2) – степенные монотонные, где степень $\alpha > 0$ регулирует их нелинейность: при $\alpha > 1$ они выпуклы, а при $\alpha \in (0; 1)$ – вогнуты. Отрезок $[y_{\min}; y_{\max}]$ является их областью определения, а $[0; 1]$ – областью значений. Функции (3), (4), называемые *логистическими*, также монотонны и имеют точку перегиба при $y = c$, $c \in [y_{\min}; y_{\max}]$, $u_L(c; c, \beta) = 0{,}5$. Параметр β определяет их нелинейность и задается следующим образом: $\beta = m^{-1} \cdot \ln(d^{-1}-1)$, где $d \in (0; 0{,}5)$ соответствует предельному отклонению от граничных значений 0 и 1 на концах отрезка $[c-m; c+m]$, симметричного относительно точки c, $[c-m; c+m] \subseteq [y_{\min}; y_{\max}]$.

Графики типовых ФП (1)–(4), определенных на отрезке [1; 9], приведены на рис. 1.

При выборе ФП на основе склонности (несклонности) ЛПР к риску открытым остается вопрос задания параметров, характеризующих ее нелинейность. В [14] рассматривается подход к уточнению параметров ФП на основе известного упорядочения оцениваемых объектов. Нужный порядок объектов достигается изменением параметров нелинейности ФП.

Тот факт, что функции (1)–(4) выполняют приведение всех признаков к общей шкале и унифицируют критерии к виду $u_j(y) \to \max$, $j=\overline{1,n}$, позволяет вычислять обобщенную оценку $u_O(x)$ для объекта x, характеризуемого вектором значений разнородных показателей.

В многомерной теории полезности для обобщения значений одномерных ФП преимущественно применяются аддитивные (АОФ) и мультипликативные (МОФ) обобщающие функции соответственно:

$$u_O(x)=u_A(x;\mathbf{w})=\sum_{j=1}^{n} w_j\cdot u_j\left(y_j(x)\right), \qquad (5)$$

$$u_O(x)=u_M(x;\mathbf{w})=\prod_{j=1}^{n} u_j\left(y_j(x)\right)^{w_j}. \qquad (6)$$

Здесь $\mathbf{w} = (w_1, \ldots, w_j, \ldots, w_n)$ – вектор важности (весов) показателей, $w_j \geq 0$, $\mathbf{w} \neq \mathbf{0}$, а $y_j(x)$ – значение j-го показателя для объекта x, $j=\overline{1,n}$. Учитывая сводимость МОФ к АОФ путем ее логарифмирования [12], для получения обобщенных оценок полезности будем использовать только АОФ.

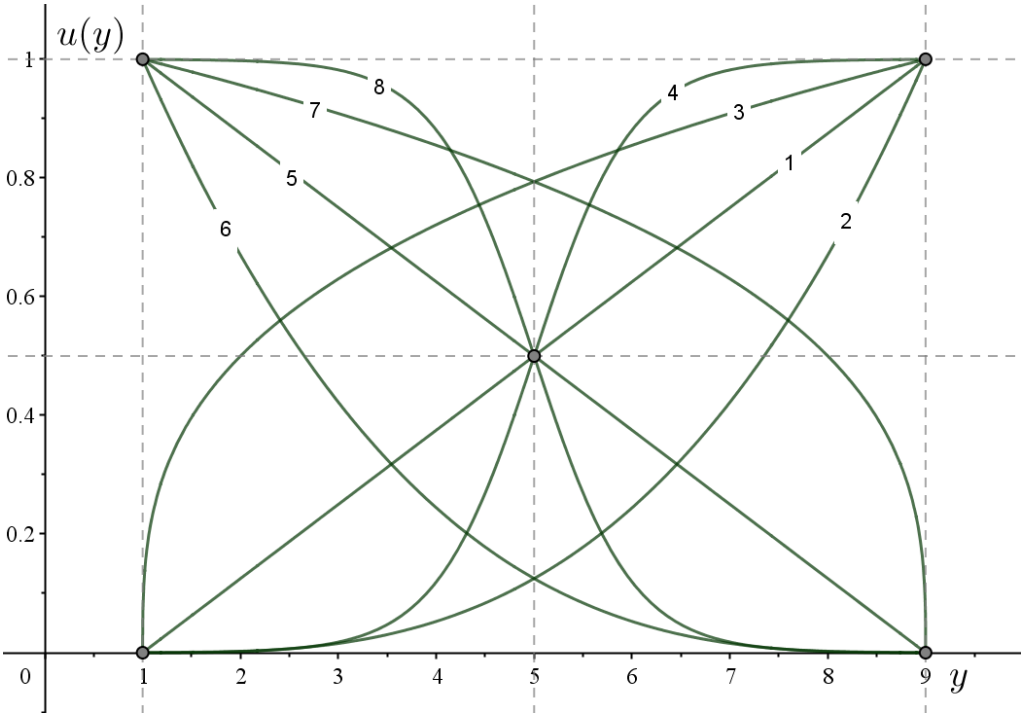


Рис. 1. Типовые монотонные ФП:
1 – $u_P^{\max}$ (y; 1); *2* – $u_P^{\max}$ (y; 3); *3* – $u_P^{\max}$ (y; 1/3); *4* – $u_L^{\max}$ (y; 5, 1/3); *5* – $u_P^{\min}$ (y; 1); *6* – $u_P^{\min}$ (y; 3); *7* – $u_P^{\min}$ (y; 1/3); *8* – $u_L^{\min}$ (y; 5, 1/3)

Постановка задачи

Будем решать задачу, исходными данными которой являются:

• одномерные ФП, выбранные из списка типовых на основе известных целевых значений показателей и склонности ЛПР к риску на смежных к этим значениям участках шкалы;

• ожидаемый рейтинг контрольного множества объектов с наибольшей уверенностью в местах лучших и худших объектов.

Требуется приблизиться к данному рейтингу от рейтинга, полученного на множестве объектов при начальных условиях оценивания, изменяя параметры типовых ФП (1)–(4), заданных ЛПР, используя для этого значения обобщенной полезности АОФ (5).

Приближение рейтинга к ожидаемому можно выполнить, осуществляя последовательный обмен местами объектов с близкими оценками обобщенной полезности. Для этого определим условия обмена местами объектов с близкими оценками.

Условия обмена мест объектов

Рассмотрим условия обмена мест двух объектов x_i и x_k в общем рейтинге объектов, основанные на нелинейности монотонной ФП. Места объектов ρ (x) измеряются в ранговой (порядковой) шкале. Ранги объектов определяются на основе соотношения многомерных оценок полезности [13]: объект x_i займет в рейтинге более высокое место, чем объект x_k, если его многомерная оценка полезности будет иметь большую величину:

$$u_O(x_i) > u_O(x_k) \Leftrightarrow \rho(x_i) < \rho(x_k).$$

Согласно [12, 14], обобщающие функции (5) и (6) монотонны относительно отношения доминирования Парето, поэтому обмен мест объектов x_i и x_k возможен только в случае, если они взаимно недоминируемые (принадлежат одному уровню доминирования). Поэтому предварительным этапом определения возможности обмена мест двух

объектов является установление их принадлежности одному уровню доминирования Парето. Если они находятся на одном уровне, добиться взаимного изменения мест можно за счет изменения соотношения вкладов по каждому из признаков-аргументов АОФ, меняя веса или значения ФП.

Пусть при начальных условиях, заданных ЛПР, соотношение полезностей объектов следующее: $u_O^{(0)}(x_i) > u_O^{(0)}(x_k)$, и, таким образом, $x_i \succ x_k$. Рассмотрим условия изменения этого соотношения на обратное $u_O^{(1)}(x_i) < u_O^{(1)}(x_k)$ за счет изменения соотношения полезностей $u_l(y_l(x_i))$ и $u_l(y_l(x_k))$ этих объектов по l-му признаку, для этого выделим вклад полезности по l-му признаку в многомерную аддитивную оценку:

$$u_O(x) = \sum_{j=1, l \neq j}^{n} w_j \cdot u_j\big(y_j(x)\big) + w_l \cdot u_l\big(y_l(x)\big).$$

Чтобы получить обратное предпочтение $x_i \prec x_k$, необходимо изменить соотношение вкладов в пользу объекта x_k путем изменения полезности объектов x_i и x_k по l-му признаку: $\Delta u_{li} = u_l^{(1)}(y_l(x_i)) - u_l^{(0)}(y_l(x_i))$ и $\Delta u_{lk} = u_l^{(1)}(y_l(x_k)) - u_l^{(0)}(y_l(x_k))$. Эти разности могут быть как положительными, так и отрицательными. Поскольку весовой коэффициент w_l полагается неизменным, *необходимым* условием изменения соотношения вкладов является ***положительная разность*** изменения полезности объектов x_k и x_i по l-му признаку:

$$\Delta u_{lk} - \Delta u_{li} > 0. \qquad (7)$$

Применив условие (7) по отношению к разности начальных общих оценок $u_O^{(0)}(x_i) - u_O^{(0)}(x_k)$, получим необходимое условие обмена местами объектов x_k и x_i за счет изменения соотношения их полезности по l-му признаку:

$$w_l \cdot \left(\Delta u_{lk} - \Delta u_{li}\right) > u_O^{(0)}(x_i) - u_O^{(0)}(x_k). \qquad (8)$$

Однако условие (8) может оказаться недостаточным для обмена мест объектов x_i и x_k, поскольку изменение вкладов в многомерную полезность объектов x_i и x_k по l-му признаку приведет к изменению соотношения относительных вкладов $V_j(x)$ и по остальным признакам $j = \overline{1,n},\ j \neq l$, что следует из формулы

$$V_j(x) = \frac{w_j \cdot u_j\big(y_j(x)\big)}{u_O(x) + w_l \cdot \Delta u_{lx}}. \qquad (9)$$

Добавление взвешенной полезности по l-му признаку в знаменателе (9) уменьшает вклад в многомерную оценку объекта остальных признаков. Отмеченное изменение соотношения относительных вкладов $V_j(x)$ по остальным признакам учитывает разность новых многомерных оценок объектов $u_O^{(1)}(x_k) - u_O^{(1)}(x_i)$. Эта разность должна быть не меньше разности начальных оценок данных объектов:

$$u_O^{(1)}(x_k) - u_O^{(1)}(x_i) > u_O^{(0)}(x_i) - u_O^{(0)}(x_k). \qquad (10)$$

Таким образом, условие (10), усиливающее условие (8), является необходимым и достаточным для обмена мест объектов x_i и x_k.

Поскольку значения признаков $y_l(x_k)$ и $y_l(x_i)$ на шкале l-го признака остаются постоянными, то при неизменном типе ФП u_l разницы в приращениях полезности Δu_{lk} и Δu_{li} можно добиться только за счет варьирования параметров, влияющих на ее нелинейность.

В качестве регулируемого параметра M выберем параметр, определяющий нелинейность функции u_l. Для степенной функции в качестве M принимается показатель степени ($M = \alpha$). Начальным значением степени для выпуклой степенной функции будем считать $M^{(0)} = 2$, а для вогнутой степенной функции – $M^{(0)} = 0{,}5$. Нелинейность выпуклой функции возрастает с увеличением M, а во-

гнутой функции – с уменьшением $M > 0$. Для логистической функции, зависящей от трех параметров сразу, в качестве регулируемого параметра выберем параметр m, влияющий на скорость ее изменения около целевого значения c. Средней нелинейности логистической функции отвечает величина

$$M^{(0)} = \frac{|m-c|}{y_{\max} - y_{\min}} = 1/3.$$

Определение претендентов на обмен местами

Очевидно, что далеко не все взаимно недоминируемые объекты могут обменяться местами только за счет изменения нелинейности ФП. Согласно правой части условия (8), наибольшую возможность по обмену местами имеют объекты x_i и x_k с минимальной начальной разностью многомерных оценок:

$$(x_i, x_k) = \\ = \arg\min_{\substack{i \in \overline{1,N-1}; \\ k \in \overline{i+1,N}}} \left| u_O^{(0)}(x_i) - u_O^{(0)}(x_k) \right|. \qquad (11)$$

К ним относятся соседние объекты в рейтинге, рассчитанном на основе многомерных оценок полезности с начальными значениями параметров нелинейности $M_j^{(0)}$, $j = \overline{1,n}$. Для обнаружения пары (x_i, x_k), отвечающей условию (11), необходимо выполнить $N \cdot (N-1)/2$ операций сравнения многомерных оценок полезности $u_O(x_i)$, $i = \overline{1,N}$.

Однако условие (8) необходимое, но недостаточное для определения возможности обмена местами объектов x_i и x_k, поскольку оно не учитывает новые значения многомерной полезности $u_O^{(1)}(x_i)$ и $u_O^{(1)}(x_k)$, а следовательно, и их разности $\Delta u_O(x_i) = u_O^{(1)}(x_i) - u_O^{(0)}(x_i)$ и $\Delta u_O(x_k) = u_O^{(1)}(x_k) - u_O^{(0)}(x_k)$. Последние в зависимости от изменения нелинейности ФП u_l могут быть как положительными, так и отрицательными. Это зависит как от исходной нелинейности рассматриваемой ФП, определяемой начальным значением $M_l^{(0)}$, так и от направления изменения ее нелинейности.

Очевидно, что изменение параметра нелинейности M_l ФП $u_l(y_l(x))$ до его граничного значения $M_{l,\max}$ ($M_{l,\min}$) может и не привести к выполнению условия (10) для пары объектов (x_i, x_k), отвечающей условию (8). В этом случае следует перейти к анализу ФП u_j другого признака, участвующего в оценивании объектов, $j = \overline{1,n}$, $j \neq l$. Максимальное число попыток удовлетворить условие (7) при двунаправленном изменении параметра M_j до граничных значений будет равно $2 \cdot n$. Естественно, оно увеличится при подборе промежуточных значений параметра M_l.

Таким образом, удовлетворение условия (7) для найденной по условию (11) пары объектов (x_i, x_k) сводится к моделированию изменений нелинейности n ФП. При этом следует иметь в виду, что может использоваться любая из типовых ФП. Рассмотрим возможности сокращения объема моделирования.

Определение возможности обмена объектов местами

Согласно левой части условия (8), наибольшую возможность по обмену мест для объектов x_i и x_k получает признак с максимальной разностью изменений полезности при варьировании параметра нелинейности M:

$$l^* = \arg\max_{l \in \overline{1,n}} \left(\Delta u_{lk} - \Delta u_{li} \right). \qquad (12)$$

Для нахождения l^*-го признака, отвечающего условию (12), нужно выполнить $2 \cdot n$ операций вычисления разности изменений полезности по l-му признаку, имея в виду необходимость изменения параметра M_l в обе стороны от его начального (типового) значения $M_l^{(0)}$.

Сокращения объема вычислений можно добиться за счет предварительного анализа вариантов изменения величин Δu_{lk} и Δu_{li} для

объектов x_k и x_i при варьировании значения параметра M_l с $M_l^{(0)}$ на $M_l^{(1)}$. Имеют место следующие варианты направленности изменений полезности объектов x_k и x_i по l-му признаку:

1) $\Delta u_{lk} > 0$, $\Delta u_{li} > 0$;
2) $\Delta u_{lk} > 0$, $\Delta u_{li} < 0$;
3) $\Delta u_{lk} < 0$, $\Delta u_{li} > 0$;
4) $\Delta u_{lk} < 0$, $\Delta u_{li} < 0$.

Положительной разности Δu_l соответствует приращение полезности по l-му признаку, а отрицательной – ее уменьшение.

Наибольший интерес представляют варианты 2 и 3 с разнонаправленным изменением полезности. Из них вариант 2 является наиболее перспективным для обмена мест, поскольку он увеличивает разность изменений полезности. Как следствие, возрастает разность полезности $u_l(y_l(x_k)) - u_l(y_l(x_i))$ объектов x_i и x_k по l-му признаку в пользу объекта x_k. Для варианта 3 имеет место обратная картина. Разность полезности $u_l(y_l(x_k)) - u_l(y_l(x_i))$ объектов x_i и x_k по l-му признаку увеличивается в пользу объекта x_i. Поэтому вариант 3 следует исключить из рассмотрения.

Разнонаправленное изменение полезности имеет место только для логистической ФП (3), (4), если значения признака $y_l(x_i)$ и $y_l(x_k)$ находятся по *разные* стороны от ее точки перегиба c (рис. 1). Если же они расположены по одну сторону от этой точки, то анализ сводится к вариантам 1 и 4, присущим функциям (1), (2), не имеющим точек перегиба. Эти варианты отражают однонаправленное изменение полезности. В них все зависит от величины разности (7) независимо от одновременного увеличения или уменьшения полезности.

Таким образом, из четырех возможных вариантов изменений полезности объектов x_k и x_i по l-му признаку рассматриваются три варианта и в первую очередь наиболее перспективный вариант 2. На основе изложенного сформулируем алгоритм анализа возможности изменения мест объектов в рейтинге.

Алгоритм анализа изменения мест

Исходными данными для алгоритма являются характеристики $y_j(x)$ объектов $x \in X$ по n признакам и величины ФП $u_j(y_j(x))$ этих признаков при установленных начальных значениях $M_j^{(0)}$ параметров нелинейности M_j, $j = \overline{1, n}$. Алгоритм состоит из следующих шагов:

1) на множестве X оцениваемых объектов задается отношение доминирования Парето $R_{\text{П}} \subset X \times X$ и выполняется ранжирование графа этого бинарного отношения на $p \geq 1$ уровней;

2) определяются подмножества объектов X_r, относящихся к одному, r-му, уровню ранжирования, являющихся по отношению друг к другу взаимно недоминируемыми, $X = \bigcup_{r=1}^{p} X_r$. Обмен местами в рейтинге может выполняться для любой пары объектов этого множества;

3) вычисляются многомерные оценки полезности $u_0(x_i)$, $i = \overline{1, N}$;

4) выполняется ранжирование объектов по их многомерным оценкам полезности;

5) относительно условия (11) находится пара (x_i, x_k) объектов-претендентов на обмен местами, $i, k \in \{1, \ldots, N\}$;

6) выбирается признак y_l, $l \in \{1, \ldots, n\}$, с различными оценками претендентов на обмен местами;

7) анализируется возможность обмена мест в паре объектов (x_i, x_k) за счет изменения величины параметра нелинейности M_l ФП $u_l(y_l(x))$ в сторону уменьшения либо увеличения;

8) если такая возможность существует, вычисляются многомерные оценки полезности $u_O^{(\text{н})}(x_i)$ и $u_O^{(\text{н})}(x_k)$ с новым значением параметра нелинейности $M_l^{(1)}$;

9) если по l-му признаку удовлетворяется условие (8), то пара (x_i, x_k) считается пригодной для обмена местами, если оно не удовлетворяется, то осуществляется переход к $l + 1$-му признаку.

Поскольку изложенный алгоритм выполняет анализ возможности изменения мест по

всем признакам, а вариация параметров ФП относится ко всем объектам, он позволяет обнаружить все возможные изменения исходного рейтинга объектов в пределах его устойчивости, задаваемых отношением доминирования $R_{П}$.

Пример

Изложенный алгоритм проиллюстрируем на примере семи электронных книг, оцененных ЛПР по пяти существенным для выбора признакам, приведенным в табл. 1.

Для получения линейного порядка на множестве выбранных книг применим метод оптимизации, основанный на многоатрибутной теории полезности. С этой целью установим:

- границы шкал признаков;
- тип ФП для каждого признака;
- важность признаков.

Очевидно, что на изменение мест могут оказывать влияние только те признаки, значения которых находятся на нелинейных участках ФП. Это условие не выполняется прежде всего для тех признаков, которые имеют только два различных значения, поскольку они совпадают с границами выборочной шкалы. В примере к таким признакам относится признак y_1 «Разрешение дисплея по горизонтали, пиксель». Приведем границы $[y_{j,\min}; y_{j,\max}]$ выборочных и теоретических шкал признаков y_j, $j=\overline{1,5}$, определенные по состоянию рынка электронных книг на 2015 г.:

1) y_1: по выборке [600; 758], теоретически [480; 1080];

2) y_2: по выборке [2; 13], теоретически [1; 20];

3) y_3: по выборке [1331; 4096], теоретически [1000; 5000];

4) y_4: по выборке [164; 218], теоретически [100; 300];

5) y_5: по выборке [3840; 6990], теоретически [2700; 7000].

ФП $u(y_j(x))$, $j=\overline{1,5}$, заданные для каждого признака на основе предпочтений ЛПР по умолчанию, показаны на рис. 2.

ТАБЛИЦА 1. Характеристика электронных книг

№ пп.	Электронные книги	Признаки				
		y_1	y_2	y_3	y_4	y_5
		Разрешение дисплея по горизонтали, пиксель	Поддерживаемые форматы, шт.	Встроенная память, Мб	Вес, г	Средняя стоимость, руб.
1	Sony PRS-T3	758	4	2048	200	5990
2	PocketBook Touch 624	600	13	4096	191	5490
3	PocketBook Aqua 640	600	12	4096	170	6990
4	Amazon Kindle 6	600	6	4096	191	4890
5	Sony PRS-T2	600	4	1331	164	5000
6	Barnes & Noble Book	600	2	2048	212	4190
7	Digma T645	758	9	4096	218	3840

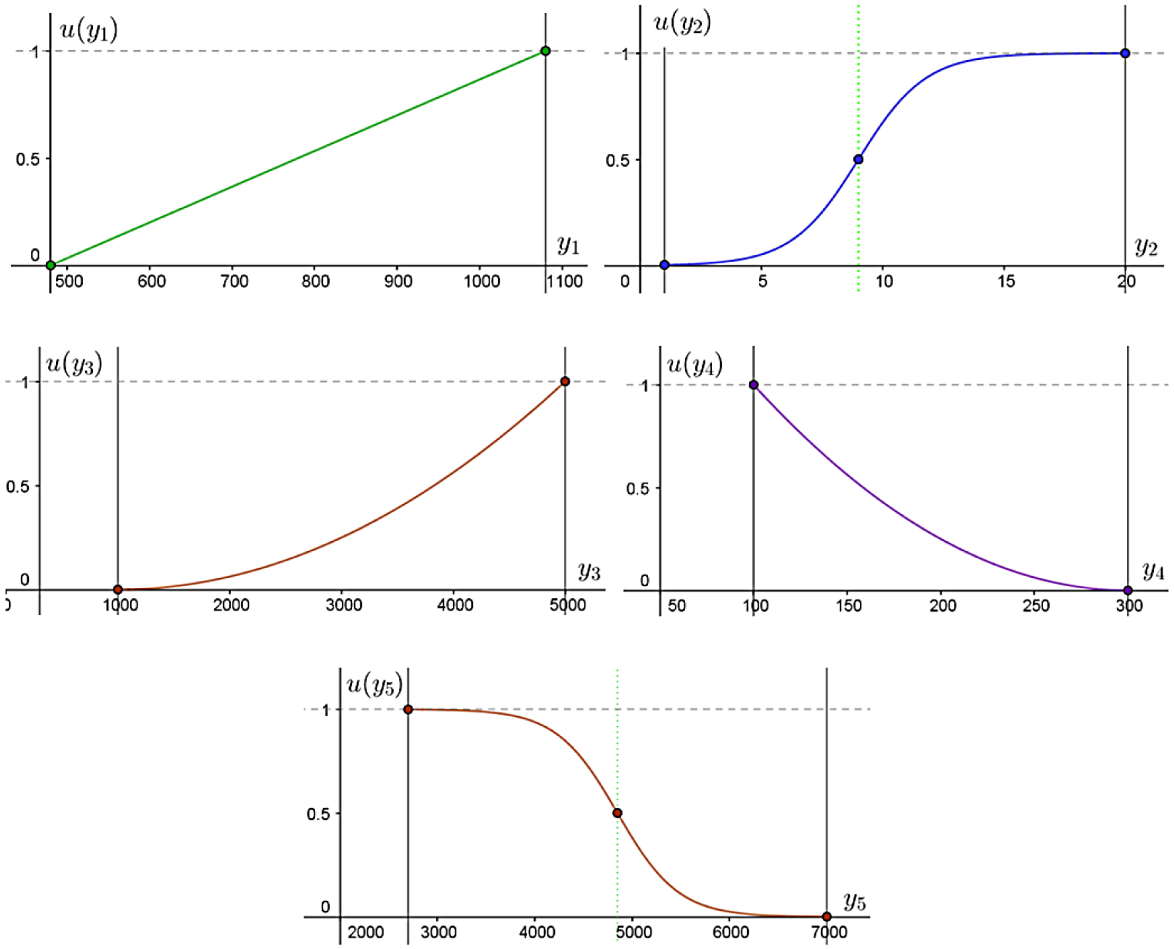


Рис. 2. Принятые формы одномерных ФП электронных книг

Обоснуем выбор типовых ФП для каждого из признаков*.

1. Признак y_1 «Разрешение дисплея по горизонтали». Предпочтение отдадим большему разрешению. Учитывая отсутствие промежуточных значений признака, это предпочтение выражается возрастающей линейной ФП (1) при $\alpha = 1$, следовательно, $u(y_1) = u_P^{\max}(y_1; 1)$.

2. Признак y_2 «Количество поддерживаемых форматов». За приемлемую цель примем количество форматов не менее 9. До этого значения полезность признака должна расти *медленно*, отражая склонность ЛПР к риску, а свыше его – расти *быстро*, отражая несклонность ЛПР к риску. Этим условиям соответствует возрастающая логистическая ФП (3) с точкой перегиба $c = 9$, следовательно, $u(y_2) = u_L^{\max}(y_2; 9, 1/3)$.

3. Признак y_3 «Объем встроенной памяти». Поскольку значение нижней границы шкалы объема внутренней памяти в 1000 Мб *не является приемлемым*, выберем выпуклую возрастающую степенную ФП (1), характеризующую склонность ЛПР к риску при $\alpha > 1$, следовательно, $u(y_3) = u_P^{\max}(y_3; 2)$.

4. Признак y_4 «Вес». Поскольку значение верхней границы шкалы веса в 300 г *не является приемлемым*, выберем выпуклую убывающую степенную ФП (2), характеризующую склонность ЛПР к риску при $\alpha > 1$, следовательно, $u(y_4) = u_P^{\min}(y_4; 2)$.

5. Признак y_5 «Средняя стоимость». За приемлемую цель принята средняя стои-

* Пример и ФП электронных книг подготовлены А. И. Зверевой.

мость не более 4850 руб. До этого значения полезность признака должна *убывать медленно*, отражая несклонность ЛПР к риску, а свыше его – *убывать быстро*, отражая склонность ЛПР к риску. Этим условиям соответствует убывающая логистическая ФП (4) с точкой перегиба $c = 4850$, следовательно, $u(y_5) = u_L^{\min}(y_5; 4850, 1/3)$.

Линейное упорядочение объектов по многомерным оценкам полезности выполним с помощью АОФ (5). Для ее вычисления определим вектор важности признаков $\mathbf{w} = (0{,}1; 0{,}2; 0{,}3; 0{,}3; 0{,}1)$. Значения ФП признаков, многомерные оценки полезности и ранги объектов приведены в табл. 2.

Определив при заданных условиях отношение доминирования Парето на множестве векторных оценок книг, установим, что они принадлежат одному и тому же (первому) уровню этого отношения и, следовательно, могут занять любое место в рейтинге. Поэтому в качестве кандидатов на изменение мест можно рассматривать любую пару книг.

Условию (11) (шаг 7 алгоритма анализа изменения мест) отвечает пара книг Sony PRS-T2 и Barnes & Noble Book, занявших места 5 и 6 в рейтинге. Их общие оценки u_O различаются на наименьшую величину 0,015. Определение возможности обмена местами у этих книг начнем с анализа табл. 2.

По признаку y_1 значение ФП для этих книг одинаковое, по y_2 различие значений ФП достигает 0,007 (в пользу Sony PRS-T2), по y_3 величина ФП для Barnes & Noble Book в 10 раз больше, чем у Sony PRS-T2, по y_4 разница значений полезности достигает 0,27 в пользу Sony PRS-T2, а по y_5 – 0,51 в пользу Barnes & Noble Book. Поэтому, чтобы обменять их местами, необходимо увеличить значение полезности u_O для Barnes & Noble Book, уменьшив его для Sony PRS-T2, таким образом, чтобы было выполнено условие (8).

Проще всего этого добиться, изменив параметр нелинейности ФП, заданной по признаку y_5: так как значения этого призна-

ТАБЛИЦА 2. Оценки многоатрибутной полезности и ранги объектов

Электронные книги	Значения функций полезности признаков					Оценка полезности $u_O(x)$	Ранг $\rho(x)$
	$u(y_1)$	$u(y_2)$	$u(y_3)$	$u(y_4)$	$u(y_5)$		
	Разрешение дисплея по горизонтали, пиксель	Поддерживаемые форматы, шт.	Встроенная память, Мб	Вес, г	Средняя стоимость, руб.		
PocketBook Aqua 640	0,200	0,747	0,600	0,423	0,001	0,50	1
PocketBook Touch 624	0,200	0,858	0,600	0,297	0,117	0,50	2
Digma T645	0,463	0,253	0,600	0,168	0,961	0,45	3
Amazon Kindle 6	0,200	0,038	0,600	0,297	0,469	0,37	4
Sony PRS-T2	0,200	0,009	0,007	0,463	0,383	0,23	5
Barnes & Noble Book	0,200	0,002	0,069	0,194	0,890	0,21	6
Sony PRS-T3	0,463	0,009	0,069	0,250	0,026	0,17	7

ка для указанной пары книг расположены по разные стороны от целевого значения 4850, уменьшив параметр m для логистической ФП, настроенной по этому показателю, легко добиться, чтобы падение величины полезности по нему для книги Sony PRS-T2 будет не меньше, чем возрастание полезности для книги Barnes & Noble Book.

Изменив параметр M_5 от начального значения $M_5^{(0)} = 1/3$ до $M_5^{(1)} = 0{,}2$, добиваемся изменения мест у этих объектов в рейтинге за счет того, что полезность книги Sony PRS-T2 уменьшается на 0,072, а полезность книги Barnes & Noble Book возрастает на 0,079. Произведенное изменение ФП по показателю y_5 не затронула места остальных книг в рейтинге за счет малого веса этого показателя.

Рассмотренный пример подтверждает приведенные теоретические положения о возможности изменения многомерных оценок и в итоге рангов объектов путем изменения нелинейности выбранных типовых ФП и демонстрируют результативность алгоритма, реализующего эту задачу.

Заключение

Нелинейность монотонной непрерывной ФП можно трактовать как непрерывное изменение величины предпочтения на всех участках шкалы показателя. Это позволяет использовать параметры нелинейности функции для изменения соотношения величин предпочтений сопоставляемых показателей. В работе сформулированы и обоснованы условия обмена объектами мест в рейтинге объектов за счет изменения параметров нелинейности функции.

Трудоемкая процедура построения одномерной ФП показателя упрощается за счет задания его целевого значения и последующим выбором типовой ФП, удовлетворяющей склонность (или несклонность) ЛПР к риску в зависимости от его желания отдалить (или сблизить) оценки объектов на разных участках шкалы показателя. Параметры нелинейности типовых ФП уточняются на заключительном этапе процедуры в процессе установления ожидаемого порядка многомерных оценок, что можно трактовать как обучение модели.

Предложенный подход позволяет значительно сократить трудоемкость начального этапа построения модели многомерной полезности с переносом уточнения промежуточных точек полезности на этап отладки модели.

Библиографический список

1. Микони С. В. Оценивание альтернатив по полезности как завершающий этап их многокритериальной оптимизации / С. В. Микони // Труды СПИИРАН. – 2013. – Вып. 31. – С. 6–19.

2. Бураков Д. П. Использование функций полезности при многокритериальном оценивании объектов / Д. П. Бураков // Сб. науч. трудов IV Междунар. конференции «Информационные технологии в науке, управлении, социальной сфере и медицине» : в 2 ч. – Томск : Томск. политех. ун-т, 2017. – Ч. 1. – С. 12–15.

3. Нейман Дж. фон. Теория игр и экономическое поведение / Дж. фон Нейман, О. Моргенштерн ; пер. с англ., под ред. Н. Н. Воробьева. – М. : Наука, 1970. – 707 с.

4. Кини Р. Л. Принятие решений при многих критериях : предпочтения и замещения / Р. Л. Кини, Х. Райфа ; пер. с англ. В. В. Подиновского и др., под ред. И. Ф. Шахнова. – М. : Радио и связь, 1981. – 560 с.

5. Микони С. В. Итеративное проектирование функций полезности / С. В. Микони, Д. П. Бураков // Сб. науч. трудов Междунар. науч. конференции ISDMCI'2011 : в 2 т. – Херсон : ХНТУ, 2011. – Т. 1. – С. 188–192.

6. Karakaya G. Interactive algorithms for a broad underlying family of preference functions / G. Karakaya, M. Köksalan, S. D. Ahipaşaoğlu // European Journal of Operational Research. – 2018. – Vol. 265, iss. 1. – P. 248–262.

7. Данько Е. В. Функция субъективной неопределенности инвестиционных решений в усло-

виях информационной неопределенности и метод оценки ее параметров / Е. В. Данько // Вестн. Новосибирск. гос. ун-та. Сер. Информационные технологии. – 2015. – Т. 13, № 4. – С. 24–32.

8. Tsionas M. G. Smooth approximations to monotone concave functions in production analysis : An alternative to nonparametric concave least squares / M. G. Tsionas, M. Izzeldin // European Journal of Operational Research. – 2018. – Vol. 271, iss. 3. – P. 797–807.

9. Gu M. Nonparametric estimation of utility functions / M. Gu, D. Bhattacharjya, D. Subramanian // URL : https://arxiv.org/abs/1807.10840v1 (дата обращения : 05.09.2018).

10. Семенов С. С. Оценка качества и технического уровня сложных систем. Практика применения экспертных оценок / С. С. Семенов. – М. : Ленанд, 2015. – 350 с.

11. Микони С. В. Функции частичного достижения цели / С. В. Микони, Д. П. Бураков // Труды Конгресса IS&IT'13. Дивноморское. 2–9.09. 2013. – М. : Физматлит, 2013. – Т. 1. – С. 30–38.

12. Бураков Д. П. Исследование структуры предпочтений ЛПР с использованием типовых обобщающих функций / Д. П. Бураков, М. И. Гарина // Вестн. Томск. гос. ун-та. Управление, вычислительная техника и информатика. – 2017. – № 38. – С. 11–16.

13. Dyer J. S. MAUT – Multiattribute Utility Theory / J. S. Dyer // International Series in Operations Research and Management Science. – 2005. – Vol. 78. – P. 265–295.

14. Микони С. В. Теория принятия управленческих решений / С. В. Микони. – СПб. : Изд-во «Лань», 2015. – 448 с.

Дата поступления: 22.03.2019
Решение о публикации: 15.04.2019

Контактная информация:
МИКОНИ Станислав Витальевич – доктор техн. наук, профессор, вед. науч. сотрудник, smikoni@mail.ru
БУРАКОВ Дмитрий Петрович – канд. техн. наук, burakovdmitry8@gmail.com

Setting up the typical one-dimensional utility functions in a multi-dimensional utility model*

S. V. Mikoni [1], D. P. Burakov [2]
[1] Saint Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences (SPIIRAS), 39, 14th line, Saint Petersburg, 199178, Russian Federation
[2] Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Mikoni S. V., Burakov D. P. Setting up the typical one-dimensional utility functions in a multi-dimensional utility model. *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2019, vol. 16, iss. 2, pp. 301–314. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2019-2-301-314

Summary

Objective: Solving the problem of creating one-dimensional utility (value) functions of attribute that adequately present the preferences of a decision maker (DM) is the most knowledge-intensive and time-consuming stage in the development of a multidimensional utility model of an object. **Methods:** With limited labor and time resources, the usual practice is to resort to simplified construction of one-dimensional utility functions, in particular, basing on parameterization of typical functions with subsequent refinement of parameter values based on the known order of objects (it is understood as a training sample). The meth-

* This subject matter has been studied with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research (RFBR, Grants N 17-01-00139 and 19-08-00989) as part of subsidized subject N 0073-2019-0004.

ods of the theory of multidimensional utility, based on the identification of the propensity (inclination) of a DM to risk, are used. Parameterization of functions is carried out by determining the conditions for changing ranks in the rating, which characterizes the order of objects. **Results:** The proposed approach can significantly reduce the time to create one-dimensional utility functions of the estimated attributes that are adequate to the preferences of a DM, even taking into account the increase in time to debug the multidimensional utility model. **Practical importance:** The described approach focuses on evaluating the quality and technical level of complex objects in the presence of restrictions on labor and time resources devoted to the development of estimation models. It can also be applied in the practice of evaluating the quality of wide-use products by DMs who are not highly qualified in the field of decision theory.

Keywords: Criterion, preferences, risk inclination, utility function, logistic function, multidimensional utility, rating.

References

1. Mikoni S. V. Otsenivaniye al'ternativ po poleznosti kak zavershayushchiy etap ikh mnogokriterial'noy optimizatsii [Evaluation of alternatives by utility as the final stage of their multi-criteria optimization]. *SPIIRAS Proceedings*, 2013, iss. 31, pp. 6–19. (In Russian).

2. Burakov D. P. Ispol'zovaniye funktsiy poleznosti pri mnogokriterial'nom otsenivanii ob"yektov [Usage of utility functions for multicriteria objects estimation]. *Sb. nauch. trudov IV Mezhdunar. konferentsii "Informatsionnyye tekhnologii v nauke, upravlenii, sotsial'noy sfere i meditsine"* [*Proceedings of the 4th International conference "Information technology in science, management, social sphere and medicine"*]. In 2 pt. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ., 2017, pt 1, pp. 12–15. (In Russian).

3. Von Neumann J. & Morgenstern O. *Theory of games and economic behavior*. 3rd ed. Princeton, Princeton University Press, 1953, 641 p. (Russ. ed.: Von Neumann J., Morgenstern O. *Teoriya igr i ekonomicheskoye povedeniye*. Moscow, Nauka Publ., 1970, 707 p.)

4. Keeney R. L. & Raiffa H. *Decisions with multiple objectives: preferences and value tradeoffs*. New York et al., Wiley Publ., 1979, 545 p. (Russ. ed.: Keeney R. L. & Raiffa H. *Prinyatiye resheniy pri mnogikh kriteriyakh: predpochteniya i zameshcheniya*. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1981. 560 p.).

5. Mikoni S. V. & Burakov D. P. Iterativnoye proyektirovaniye funktsiy poleznosti [Iterative design of utility functions]. *Sb. nauch. trudov Mezhdunar. nauch. konferentsii ISDMCI'2011* [*Proceedings of International conference ISDMCI'2011*]. In 2 vol. Kherson, Kherson National Technical University Publ., 2011, vol. 1, pp. 188–192. (In Russian)

6. Karakaya G., Köksalan M. & Ahipaşaoğlu S. D. Interactive algorithms for a broad underlying family of preference functions. *European Journal of Operational Research*, 2018, vol. 265, iss. 1, pp. 248–262.

7. Dan'ko E. V. Funktsiya sub'yektivnoy neopredelennosti investitsionnykh resheniy v usloviyakh informatsionnyy neopredelennosti i metod otsenki eye parametrov [The function of subjective uncertainty of investment decisions in the conditions of information uncertainty and the method of evaluating its parameters]. *Vestnik Novosibirskogo gos. universiteta, seriya "Informatsionnyye tekhnologii"* [*Novosibirsk State University Journal of Information Technologies, series "Information technologyes"*], 2015, vol. 13, no. 4, pp. 24–32. (In Russian)

8. Tsionas M. G. & Izzeldin M. Smooth approximations to monotone concave functions in production analysis: An alternative to nonparametric concave least squares. *European Journal of Operational Research*, 2018, vol. 271, iss. 3, pp. 797–807.

9. Gu M., Bhattacharjya D. & Subramanian D. Nonparametric estimation of utility functions. Available at: https://arxiv.org/abs/1807.10840v1 (accessed: 05.09.2018).

10. Semenov S. S. *Otsenka kachestva i tekhnicheskogo urovnya slozhnykh sistem. Praktika primeneniya ekspertnykh otsenok* [*Evaluation of the quality and technical level of complex systems. The practice of applying expert estimations*]. Moscow, Lenand Publ., 2015, 350 p. (In Russian).

11. Mikoni S. V. & Burakov D. P. Funktsii chastichnogo dostizheniya tseli [Functions of partial achievement]. *Trudy kongressa IS&IT'13* [*Proceedings of IS&IT'13 congress*]. Divnomorskoye. 2–9.09.2013. Moscow, Fizmatlit Publ., 2013, vol. 1, pp. 30–38. (In Russian).

12. Burakov D. P. & Garina M. I. Issledovaniye struktury predpochteniy LPR s ispol'zovaniyem tipovykh obobshchayushchikh funktsiy [Analysis of decision maker's preferences structure with standard aggregative functions]. *Vestnik Tomskogo gos. universiteta. Upravleniye, vychislitel'naya tekhnika i informatika* [*Tomsk State University Journal of Control and Computer Science*], 2017, no. 38, pp. 11–16. (In Russian)

13. Dyer J. S. MAUT – Multiattribute Utility Theory. *International Series in Operations Research and Management Science*, 2005, vol. 78, pp. 265–295.

14. Mikoni S. V. *Teoriya prinyatiya upravlencheskikh resheniy* [*Management Decision Theory*]. Saint Petersburg, Lan' Publ., 2015, 448 p. (In Russian)

Received: March 22, 2019
Accepted: April 15, 2019

Author's information:
Stanislav V. MIKONI – D. Sci. in Engineering, Professor, Leading Researcher, smikoni@mail.ru
Dmitry P. BURAKOV – PhD in Engineering, burakovdmitry8@gmail.com

УДК 621.313.39

Математическая модель для анализа электромагнитных процессов в реактивных индукторных машинах с сильным взаимным влиянием фаз*

Н. В. Гребенников

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

Для цитирования: *Гребенников Н. В.* Математическая модель для анализа электромагнитных процессов в реактивных индукторных машинах с сильным взаимным влиянием фаз // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2019. – Т. 16, вып. 2. – С. 315–321. DOI: 10.20295/1815-588X-2019-2-315-321

Аннотация

Цель: Совершенствование реактивных индукторных машин с сильным взаимным электромагнитным влиянием фаз с помощью развития математического моделирования происходящих в них процессов. **Методы:** При разработке математической модели реактивной индукторной машины использовались методы теории электрических цепей и теории электромагнетизма. **Результаты:** Произведено математическое описание электромагнитных процессов в реактивных индукторных машинах с учетом взаимного влияния фаз. В созданной модели принято допущение, при котором учитывается влияние только соседних фаз. Расчет зависимости потокосцепления фазы предложено осуществлять в функции четырех переменных (фазного тока, фазных токов соседних фаз и углового положения ротора), что позволяет сократить объем подготовки исходных данных для моделирования. Проведено аналитическое описание электромагнитного момента для такого типа машин с учетом эффекта взаимного влияния фаз. **Практическая значимость:** Предлагаемый подход позволяет найти компромисс между точностью и быстродействием подготовки модели для моделирования динамических режимов работы электропривода с реактивными индукторными машинами данного класса.

Ключевые слова: Реактивная индукторная машина, взаимная индуктивность, математическая модель, электропривод.

Введение

Реактивные индукторные машины (РИМ) представляют собой высокоэффективный тип электромеханического преобразователя энергии и находят применение в промышленности и на транспорте. Их преимуществами являются простота конструкции, низкая себестоимость, высокая надежность и значительная эффективность преобразования энергии в широком диапазоне скоростей и мощностей [1, 2]. В настоящее время РИМ используются в тяговом приводе электромобилей, в авиационной промышленности и на железнодорожном транспорте [3–6]. К известным недостаткам РИМ относятся повышенные пульсации электромагнитного момента, вызывающие вибрацию и акустический шум. Снижение пульсаций момента – одна из главных тем исследователей в области РИМ, предлагаются различные под-

* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 18-79-00130).

ходы, которые включают оптимизацию формы зубцовой зоны магнитной системы и разработку новых алгоритмов управления. Простым и общепринятым способом снижения пульсаций момента является повышение числа фаз машины, что стало возможным вследствие развития силовой электроники. Увеличение фаз РИМ обеспечивает большее перекрытие в работе фаз машины, что ведет к значительному взаимодействию между фазами. Многие исследователи отмечают, что одновременная работа фаз (работа с перекрытием фаз) РИМ оказывает положительный эффект [7–11], в результате чего мощность машины вырастает на 5–15 %. Это связано с тем, что энергия, запасенная в магнитном поле отключаемой фазы, передается следующей фазе двигателя и используется для форсированного нарастания тока.

Чем больше число фаз, тем лучше условия для замыкания магнитного потока через соседние фазы [12]. Для питания шестифазной РИМ возможно применять трехфазный инвертор с полным мостом, что позволит снизить пульсации электромагнитного момента, без увеличения стоимости силового преобразователя [12]. Для шестифазной РИМ были изучены альтернативные типы соединения обмоток и предложена симметричная схема обмоток, в соответствии с которой обмотки фазы нетрадиционно связаны противоположными полярностями, что приводит к значительному фазовому взаимодействию [13].

В настоящей статье описана шестифазная конфигурация РИМ, число зубцов на статоре – 12, а на роторе – 10, с сильным магнитным влиянием между фазами. Катушки одной фазы РИМ соединены встречно в магнитном отношении, в этом случае магнитный поток полностью замыкается через соседние фазы (рисунок). Данный класс машин представляет собой электрические машины, как правило, с четным числом фаз. В работе [14] приведено описание магнитной системы подобного типа РИМ, а также рассмотрена схема замещения магнитной системы.

Для построения алгоритмов управления и исследования электромагнитных процессов в реактивных индукторных машинах с сильным взаимным электромагнитным влиянием фаз удобно использовать методы математического и компьютерного моделирования. Наиболее распространенным пакетом программ для проведения моделирования электрических цепей и систем управления является MATLAB/Simulink [15].

В данной статье разработана математическая модель для реактивных индукторных машин с сильным взаимным электромагнитным влиянием фаз.

Математическая модель

Наилучшую точность моделирования электромагнитных процессов, происходящих в РИМ, будет иметь подход, при котором учитываются токи во всех фазах. Тогда уравнение электрической цепи для одной фазы РИМ будет иметь вид

$$u = R \cdot i + \frac{d\psi(i_A, i_B, i_C, i_D, i_E, i_F, \theta)}{dt}, \quad (1)$$

где u – напряжение, приложенное к фазе; R – сопротивление фазы; i – ток фазы; $\psi(i_A, i_B, i_C, i_D, i_E, i_F, \theta)$ – потокосцепление фазы (функция семи переменных).

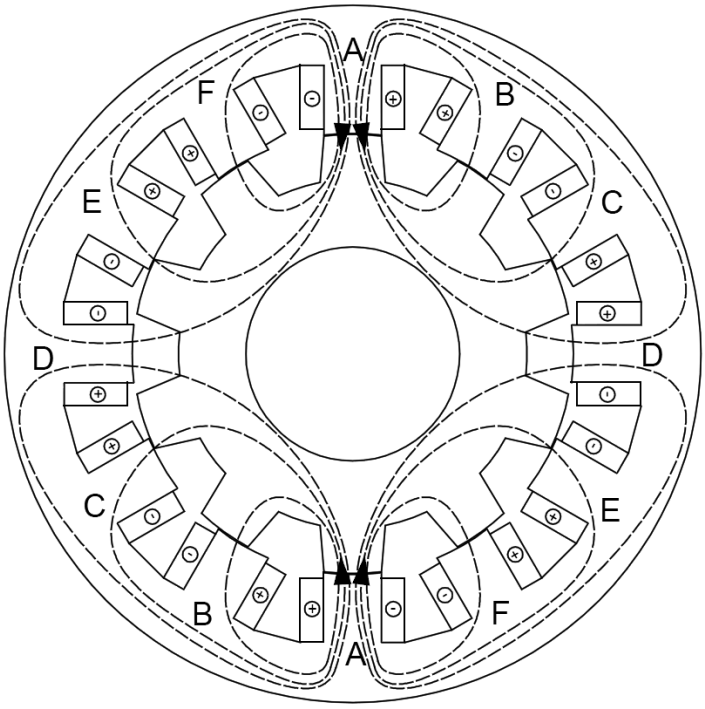
Вращательное движение ротора РИМ описывают уравнения движения

$$J\frac{d\omega}{dt} = \\ = T_e(i_A, i_B, i_C, i_D, i_E, i_F, \theta) - T_L - \text{B}\cdot\omega, \quad (2)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega \cdot N_R \cdot 180/\pi. \quad (3)$$

В (2) и (3) ω – частота вращения ротора, T_e – электромагнитный момент РИМ, T_L – внешний момент сопротивления, B – коэффициент трения, J – приведенный момент инерции ротора, θ – угловое положение ротора относительно статора, эл. град., N_R – число зубцов ротора.

Для решения уравнения (1) необходимо получить методом конечных элементов (например, с использованием пакета FEMM



Магнитная система шестифазной РИМ (число зубцов на статоре – 12, на роторе – 10)

[16]) зависимость потокосцепления фазы в функции семи переменных $\psi(i_A, i_B, i_C, i_D, i_E, i_F, \theta)$. Если принять, что для каждой переменной достаточно произвести расчет по 10 ее значениям, то для формирования 7D-массива (10 × 10 × 10 × 10 × 10 × 10 × 10) потребуется произвести 10 000 000 расчетов. При оптимизации модели для электромагнитного анализа в пакете FEMM и осуществления расчетов с помощью скрипта для автоматизации процесса и сохранения данных можно добиться, чтобы время одного расчета было равно примерно 1 с. Тогда общее время электромагнитного расчета для подготовки начальных данных для моделирования составит 2778 ч = 115 сут., что, по нашему мнению, не удовлетворительно. Таким образом, подход с учетом всех фазных токов практически не осуществим и требует разработки других подходов для моделирования электромагнитных процессов в описываемом типе РИМ с учетом взаимного влияния фаз.

Проведенный электромагнитный анализ показал, что в рассматриваемой РИМ имеется существенное взаимное влияние между соседними фазами. Область двигательного или генераторного режима составляет 180 эл. град., а значит, одновременно в номинальном режиме будут работать не более трех фаз машины.

Таким образом, можно принять допущение, что учитывается влияние только от соседних фаз, а влиянием других фаз можно пренебречь. С учетом этого уравнение электрической цепи для одной фазы РИМ примет вид

$$u_n = R \cdot i_n + \frac{d\psi_n(i_{n-1}, i_n, i_{n+1}, \theta)}{dt}, \qquad (4)$$

здесь u_n, n – напряжение и номер этой фазы соответственно; R – сопротивление фазы; i_n – ток данной фазы; $\psi_n(i_{n-1}, i_n, i_{n+1}, \theta)$ – потокосцепление фазы с учетом токов, протекающих в соседних фазах (функция четырех переменных).

Полное потокосцепление фазы может быть определено как сумма собственного потокосцепления и взаимных потокосцеплений от соседних фаз:

$$\psi_n = \psi_{(n-1)n} + \psi_{nn} + \psi_{(n+1)n},$$

что также можно выразить через индуктивности:

$$\psi_n = M_{(n-1)n} \cdot i_{n-1} + L_n \cdot i_n + M_{(n+1)n} \cdot i_{n+1},$$

где M – взаимная индуктивность между фазами; L – индуктивность фазы.

Так как все фазы РИМ состоят из одинаковых катушек, то можно считать, что активное сопротивление у всех фаз будет одинаковым.

Таким образом, для решения уравнения (4) данной машины необходимо получить методом конечных элементов зависимость потокосцепления фазы в функции четырех переменных $\psi_n = f(i_{n-1}, i_n, i_{n+1}, \theta)$. Для формирования 4D-массива (10 × 10 × 10 × 10) потребуется произвести 10 000 расчетов. Общее время электромагнитного расчета для подготовки начальных данных для моделирования составит 2,8 ч, что является вполне достижимым. Предлагаемый подход позволяет сократить время подготовки исходных данных для моделирования в 1000 раз.

Электромагнитный момент в зависимости от фазных токов и положения ротора может быть выражен через коэнергию. В изучаемом случае дифференциал коэнергии dW_c равен

$$dW_c(i_{n-1}, i_n, i_{n+1}, \theta) = \\ = \psi_{n-1} di_{n-1} + \psi_n di_n + \psi_{n+1} di_{n+1} + T_e d\theta. \quad (5)$$

Коэнергия для предлагаемой машины может быть найдена путем интегрирования (5) по контуру. Путь интегрирования выбираем следующим образом:

1) интегрируем по углу поворота θ при нулевых значениях тока во всех фазах ($i_{n-1} = 0$, $i_n = 0$, $i_{n+1} = 0$);

2) интегрируем по i_{n+1}, поддерживая равным нулю токи в двух других фазах ($i_{n-1} = 0$, $i_n = 0$), а угол поворота θ постоянным;

3) интегрируем по i_n, поддерживая равным нулю ток в фазе $n - 1$ ($i_{n-1} = 0$), угол поворота θ и i_{n+1} постоянны;

4) интегрируем по i_{n-1}, угол поворота θ, i_n и i_{n+1} постоянны.

На первом этапе интегрирования интеграл момента равен нулю; так как при нулевых токах фазы ($i_{n-1} = 0$, $i_n = 0$, $i_{n+1} = 0$) электромагнитный момент не создается, то на последующих этапах тоже, ибо угол поворота θ постоянен.

После интегрирования получаем выражение коэнергии рассматриваемой машины, когда одновременно работают три фазы:

$$W_c(i_{n-1}, i_n, i_{n+1}, \theta) = \\ = \int_0^{\theta} T_e(0,0,0,\xi) d\xi + \int_0^{i_{n+1}} \psi_{n+1}(0,0,\xi,\theta) d\xi + \\ + \int_0^{i_n} \psi_n(0,\xi,i_{n+1},\theta) d\xi + \\ + \int_0^{i_{n-1}} \psi_{n-1}(\xi,i_n,i_{n+1},\theta) d\xi = \\ = 0 + \int_0^{i_{n+1}} L_{n+1}\xi d\xi + \int_0^{i_n} (L_n\xi + M_{(n+1)n} i_{n+1}) d\xi + \\ + \int_0^{i_{n-1}} (L_{n-1}\xi + M_{(n-1)n} i_n) d\xi = \\ = \frac{1}{2} L_{n-1} i_{n-1}^2 + \frac{1}{2} L_n i_n^2 + \frac{1}{2} L_{n+1} i_{n+1}^2 + \\ + M_{(n+1)n} i_n i_{n+1} + M_{(n-1)n} i_{n-1} i_n, \quad (6)$$

здесь ξ – переменная интегрирования. В (6) она принимает следующие значения θ, i_{n+1}, i_n, i_{n-1} по порядку для интегралов.

Тогда для вычисления момента выводим окончательное выражение

$$T_e = \left. \frac{\partial W_c(i_{n-1}, i_n, i_{n+1}, \theta)}{\partial \theta} \right|_{i_{n-1}, i_n, i_{n+1}} = \\ = \frac{1}{2} \frac{\partial L_{n-1}}{\partial \theta} i_{n-1}^2 + \frac{1}{2} \frac{\partial L_n}{\partial \theta} i_n^2 + \frac{1}{2} \frac{\partial L_{n+1}}{\partial \theta} i_{n+1}^2 + \\ + \frac{\partial M_{(n+1)\mathrm{n}}}{\partial \theta} i_n i_{n+1} + \frac{\partial M_{(n-1)n}}{\partial \theta} i_{n-1} i_n. \quad (7)$$

Таким образом, момент РИМ с учетом взаимного электромагнитного влияния фаз

можно выразить через фазные токи и угол поворота ротора. Эффект взаимного влияния выражается в наличии двух последних слагаемых в (7).

Другим подходом является определение электромагнитного момента на этапе расчета потокосцепления фазы в функции четырех переменных.

Данный метод фактически не несет в себе дополнительных затрат времени, так как при расчете потокосцепления фазы методом конечных элементов возможно вычислить вращающий момент совместно с расчетом потокосцепления фазы. В результате можно сформировать зависимость электромагнитного момента фазы в функции четырех переменных: $T_e = f(i_{n-1}, i_n, i_{n+1}, \theta)$.

Заключение

В настоящей статье рассмотрена математическая модель РИМ с учетом взаимного электромагнитного влияния фаз. Выражение для определения электромагнитного момента наглядно показывает положительный эффект от наличия сильной взаимной индуктивности между фазами РИМ. Эта особенность требует исследования и новых подходов к выбору параметров управления и их оптимизации. Разрабатываемые алгоритмы должны учитывать фазные токи соседних фаз. Предлагаемая математическая модель позволяет найти компромисс между точностью и быстродействием подготовки модели для моделирования динамических режимов работы электропривода с реактивными индукторными машинами.

Библиографический список

1. Кузнецов В. А. Вентильно-индукторные двигатели / В. А. Кузнецов, В. А. Кузьмичев. – М. : Изд-во МЭИ, 2003. – 68 с.

2. Miller T. G. E. Switched reluctance motors and their control / T. G. E. Miller. – Oxford : Magna Physics Publishing and Clarendon Press, 1993. – 512 p.

3. Киреев А. В. Электромеханическая трансмиссия с реактивными индукторными электрическими машинами / А. В. Киреев, Н. В. Гребенников // Актуальные проблемы технических наук в России и за рубежом : сб. статей Междунар. науч.-практич. конференции. – Уфа : АЭТЕРНА, 2016. – С. 33–37.

4. Киреев А. В. Испытания макета электромеханической трансмиссии с реактивными индукторными электрическими машинами / А. В. Киреев, Н. В. Гребенников // Новые задачи технических наук и пути их решения : сб. статей Междунар. науч.-практич. конференции. – Уфа : АЭТЕРНА, 2016. – С. 77–80.

5. Индукторный электропривод для электроподвижного состава // Электровозостроение / под ред. В. Г. Наймушина. – Новочеркасск : ОАО «ВЭлНИИ», 2002. – № 44. – 336 с.

6. Ворон О. А. Подвагонный вентильно-индукторный генератор / О. А. Ворон, Н. В. Гребенников, А. А. Зарифьян, А. Д. Петрушин // Вестн. Всерос. науч.-исслед. и проект.-конструкт. ин-та электровозостроения. – 2009. – № 1. – С. 132–143.

7. Fleury A. Experimental measurement and analysis of the self and mutual inductances in two different switched reluctance machines / A. Fleury, A. W. F. V. Silveira, M. F. Rissatti, V. B. V. Nadler, L. S. Borges, A. R. Pedroza, R. Rocha, J. I. Oliveira // International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'10), Granada (Spain). – 2010. – P. 1202–1207.

8. Feyzi R. M. Direct torque control of 5-phase 10/8 switched reluctance motor by using fuzzy method / R. M. Feyzi, Y. Ebrahimi, M. Zeinali // International Journal of Engineering and Technology. – 2009. – N 3 (1). – P. 205–214.

9. Alrifai M. Nonlinear speed control of switched reluctance motor drives taking into account mutual inductance / M. Alrifai, M. Zribi, R. Krishnan, M. Rayan // Hindawi Publishing Corporation Journal of Control Science and Engineering Volume. – 2008. – P. 1–11.

10. Bae Han-Kyung. Control of switched reluctance motors considering mutual inductance : Dis. for the degree of Doctor of Philosophy / Han-Kyung

Bae. – Blacksburg, Virginia : Virginia Polytechnic Institute, 2000. – 140 p.

11. Liu Y. Improved torque performance of switched reluctance machines by reducing the mutual saturation effect / Y. Liu // IEEE Transactions on Energy Conversion. – 2004. – N 2 (19). – P. 251–257.

12. Гребенников Н. В. Влияние изменения числа фаз подвагонного вентильно-индукторного генератора на его эксплуатационные характеристики при неизменной конфигурации статора / Н. В. Гребенников // Изв. высш. учеб. заведений. Электромеханика (ЮРГТУ (НПИ)). – 2011. – № 2. – С. 17–21.

13. Widmer J. D. Winding configurations for a six phase switched reluctance machine / J. D. Widmer, R. Martin, C. M. Spargo, B. C. Mecrow, T. Celik // XXth International Conference on Electrical Machines (ICEM). – 2012. – P. 532–538.

14. Grebennikov N. Equivalent magnetic circuit for Switched Reluctance Motor with Strong Mutual Coupling between phases / N. Grebennikov, T. Talakhadze, A. Kashuba // 2019 26th International Workshop on Electric Drives : Improvement in Efficiency of Electric Drives (IWED). – Moscow, Russia. – 2019. – P. 1–5.

15. Mathworks // URL : www.mathworks.com (дата обращения : 21.04.2019).

16. Finite Element Method Magnetics // URL : www.femm.info (дата обращения : 21.04.2019).

Дата поступления: 22.04.2019
Решение о публикации: 26.04.2019

Контактная информация:
ГРЕБЕННИКОВ Николай Вячеславович – канд. техн. наук, доцент, grebennikovnv@mail.ru

Mathematical model for the analysis of electromagnetic processes in switched reluctance machines with strong mutual influence of phases*

N. V. Grebennikov

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

For citation: Grebennikov N. V. Mathematical model for the analysis of electromagnetic processes in switched reluctance machines with strong mutual influence of phases. *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2019, vol. 16, iss. 2, pp. 315–321 (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2019-2-315-321

Summary

Objective: To improve switched reluctance machines with strong mutual electromagnetic influence of phases through the development of mathematical modeling of the processes occurring in them. **Methods:** The methods of electric circuit theory and electromagnetic theory were used while developing a mathematical model of a switched reluctance machine. **Results:** A mathematical description of electromagnetic processes in switched reluctance machines was produced, taking into account mutual influence of phases. In the developed model, an assumption was made on the influence of neighboring phases only. It was proposed to calculate the dependence of the flux linkage of the phase as a function of four variables (phase current, phase currents of adjacent phases and the angular position of the rotor). An analytical description of the electromagnetic moment for this type of machines was made, taking into account the effect of mutual influence of the phases. **Practical importance:** The proposed approach makes it possible to find a compromise between accuracy and speed of model preparation for modeling dynamic operating modes of an electric drive with switched reluctance machines of the given class.

Keywords: Switched reluctance machine, mutual inductance, analytical model, electric drive.

* The study was conducted under the sponsorship from the Russian Science Found (grant N 18-79-00130).

References

1. Kuznetsov V.A. & Kuzmichev V.A. *Ventilno-induktorniye dvigately* [*Switched reluctance motor*]. Moscow, MEI Publ., 2003, 68 p. (In Russian)

2. Miller T.G.E. *Switched reluctance motors and their control*. Oxford, Magna Physics Publishing and Clarendon Press, 1993, 512 p.

3. Kireev A.V. & Grebennikov N.V. Elektromekhanicheskaya transmissiya s reaktivnymy induktornymy elektricheskimy mashinamy [Electromechanical transmission with switched reluctance electric machines]. *Aktualniye problem tekhnicheskikh nauk v Rossii i za rubezhom.* Sb. statey Mezhdunar. nauch.-praktich. konferentsii [*Topical issues of technical sciences in Russia and abroad*. Collection of articles of the International scientific and practical conference]. Ufa, AETERNA Publ., 2016, pp. 33–37. (In Russian)

4. Kireev A.V. & Grebennikov N.V. Ispytaniya maketa elektromekhanicheskoy transmissii s reaktivnymy induktornymy elektricheskimy mashinamy [Tests of the model of electromechanical transmission with switched reluctance electric machines]. *Noviye zadachy tekhnicheskykh nauk i puty ikh resheniya*. Sb. statey Mezhdunar. nauch.-praktich. konferentsii [*New problems of the technical sciences and ways to solve them*. Collection of articles of International scientific and practical conference]. Ufa, AETERNA Publ., 2016, pp. 77–80. (In Russian)

5. Induktorniy elektroprivod dlya elektropodvizhnogo sostava [Switched reluctance electric drive for electric rolling stock]. *Elektrovozostroeniye* [*Electric Locomotive Industry*]. Pod red. V. G. Naimyshina. Novocherkassk, OAO "VElNII" Publ., 2002, no. 44, 336 p. (In Russian)

6. Voron O.A., Grebennikov N.V., Zarifyan A.A. & Petrushin A.D. Podvagonniy ventilno-induktorniy generator [Undercar switched reluctance generator]. *Vestnik Vseros. nauch.-issled. i proekt.-konstrukt. instituta elektrovozostroeniya* [*Bulletin of All-Russian Scientific Research and Design Institute of Electric Locomotive Building*], 2009, no. 1, pp. 132–143. (In Russian)

7. Fleury A., Silveira A.W.F. V., Rissatti M. F., Nadler V.B. V., Borges L.S., Pedroza A.R., Rocha R. & Oliveira J.I. Experimental measurement and analysis of the self and mutual inductances in two different switched reluctance machines. *International conference on Renewable Energies and Power Quality* (*ICREPQ'10*), Granada (Spain), 2010, pp. 1202–1207.

8. Feyzi R.M., Ebrahimi Y. & Zeinali M. Direct torque control of 5-phase 10/8 switched reluctance motor by using fuzzy method. *International Journal of Engineering and Technology*, 2009, no. 3 (1), pp. 205–214.

9. Alrifai M., Zribi M., Krishnan R. & Rayan M. Nonlinear speed control of switched reluctance motor drives taking into account mutual inductance. *Hindawi Publishing Corporation Journal of Control Science and Engineering Volume,* 2008, pp. 1–11.

10. Han-Kyung Bae. *Control of switched reluctance motors considering mutual inductance*. Dis. for the degree of Doctor of Philosophy. Blacksburg, Virginia, Virginia Polytechnic Institute Publ., 2000, 140 p.

11. Liu Y. Improved torque performance of switched reluctance machines by reducing the mutual saturation effect. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2004, no. 2 (19), pp. 251–257.

12. Grebennikov N.V. Vliyaniye izmeneniya chisla faz podvagonnogo ventilno-induktornogo generator na ego ekspluatatsionniye kharakteristiky pry neizmennoy konfiguratsii statora [Influence of the change in the number of phases of under-carriage switched reluctance generator on its performance characteristics with the stator configuration unchanged]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika* [*Proceedings of higher educational institutions. Electromechanics*]. YuRGTU (NPI) [Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI)], 2011, no. 2, pp. 17–21. (In Russian)

13. Widmer J.D., Martin R., Spargo C.M., Mecrow B.C. & Celik T. Winding configurations for a six phase switched reluctance machine. *XXth International conference on Electrical Machines* (*ICEM*), 2012, pp. 532–538.

14. Grebennikov N., Talakhadze T. & Kashuba A. Equivalent magnetic circuit for Switched Reluctance Motor with Strong Mutual Coupling between phases. *2019 The 26th International Workshop on Electric Drives: Improvement in Efficiency of Electric Drives* (*IWED*). Moscow, Russia, 2019, pp. 1–5.

15. *Mathworks*. Available at: www.mathworks.com (accessed: 21.04.2019).

16. *Finite Element Method Magnetics*. Available at: www.femm.info (accessed: 21.04.2019).

Received: April 22, 2019
Accepted: April 26, 2019

Author's information:
Nikolay V. GREBENNIKOV – PhD in Engineering, Associate Professor, grebennikovnv@mail.ru