

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

ИЗВЕСТИЯ ПЕТЕРБУРГСКОГО УНИВЕРСИТЕТА ПУТЕЙ
СООБЩЕНИЯ, том 16, выпуск 4, 2019

ISSN (Print) 1815-588X

ISSN (Online) 2658-6851

Учредитель и издатель

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Петербургский государственный университет путей
связи 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, А. Н. Крышня

Верстка

А. А. Стуканова

Редактор

В. Е. Филиппова

МЕЖДУНАРОДНЫЙ РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

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

Шнайдер Экхард, профессор, Фраунгоферовский ин-
ститут неразрушающего контроля, Саарбрюкен,
Германия

Ситаж Марек, профессор, Силезский технический
университет, Польша

Христов Христо, профессор, Технический универси-
тет, София, Болгария

РЕДКОЛЛЕГИЯ

Сапожников Валерий Владимирович, д-р техн. наук, профес-
сор, 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

Бороненко Юрий Павлович, д-р техн. наук, профессор, ПГУПС,
Санкт-Петербург, Россия

Брынь Михаил Ярославич, д-р техн. наук, профессор, ПГУПС,
Санкт-Петербург, Россия

Губачева Лариса Александровна, д-р техн. наук, профессор,
Восточно-Украинский национальный университет им. В. Даля,
Луганск, Украина

Егоров Владимир Викторович, д-р техн. наук, доцент, ПГУПС,
Санкт-Петербург, Россия

Канаев Андрей Константинович, д-р техн. наук, 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

Покровская Оксана Дмитриевна, д-р техн. наук, доцент, 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 Тамара 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 20.12.2019.

Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная. Печать МФУ.

Усл. печ. л. 20,5. Установочный тираж 300 экз.

Заказ 177. 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 4, 2019

ISSN (Print) 1815-588X

ISSN (Online) 2658-6851

Founder and publisher

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Emperor Alexander I 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

П И Н Ф С 2 - 7 4 9 9 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 distributed by direct subscription via Editorial office and Rospechat catalogue (item 18509)

JOURNAL STAFF

Editor-in-chief

A. Yu. Panychev, PhD of Economics, Associate Professor

Deputy chief editor

V. Sapozhnikov, D. Eng. Sci., Professor

Science editor

A. Kanayev, D. Eng. Sci., Associate Professor

Executive editor

E. Gorelik

English translation

Yu. Fattakhova, D. Ivanov, A. Kryshnia

Layout

A. Stukanova

Editor

V. Philippova

INTERNATIONAL EDITORIAL BOARD

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

Ekhhard Shneider, Professor, Fraunhofer Institute for Non-Destructive Testing, Saarbrücken, 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

Liudmila Blazhko, D. Eng. Sci., Professor, Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Yuriy Boronenko, D. Eng. Sci., Professor, Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Mikhail Bryn', D. Eng. Sci., Professor, Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Larisa Gubachyeva, D. Eng. Sci., Professor, Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, Luhansk, Ukraine

Vladimir Egorov, D. Eng. Sci., Associate Professor, Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Andrey Kanayev, D. Eng. Sci., 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

Oksana Pokrovskaya, D. Eng. Sci., Associate Professor, Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Vladimir Smirnov, D. Eng. Sci., Professor, Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Valentina Solovyova, D. Eng. Sci., Professor, Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Klara Talantova, D. Eng. Sci., Associate Professor, Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Tamila Titova, D. Eng. Sci., Professor, Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Yury Frolov, D. Eng. Sci., Professor, Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Nina Shangina, D. Eng. Sci., Professor, Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Valeriy Shtikov, 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

П. А. Плеханов

- Риск-ориентированный подход к обеспечению транспортной безопасности как части комплексной безопасности железнодорожного транспорта 539

→ СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ – ТРАНСПОРТУ

В. А. Болотин, М. Кравченко, Н. Г. Янковская

- К вопросу применения съемных кузовов вагонов для доставки сезонных насыпных грузов 552

И. В. Федоров, А. А. Воробьев, И. К. Самаркина, О. А. Конограй, Т. Г. Бунькова

- Исследование напряженного состояния в контакте «колесо–рельс» при наличии выщербины 562

К. К. Ким, С. Н. Иванов, М. И. Хисматулин

- Преимущества применения устройств транспортирования и нагрева жидких рабочих сред в различных отраслях промышленности 573

К. К. Ким, И. Р. Крон

- Исследование устойчивости капсулы пассажирского трубопроводного транспорта в установившемся режиме при возмущениях продольной координаты 584

А. Я. Якушев, Т. М. Назирхонов, И. П. Викулов, К. В. Марков

- Определение основных параметров асинхронного тягового электродвигателя 592

А. В. Сугоровский

- Развитие железнодорожной инфраструктуры станций в связи с реализацией инвестиционного проекта создания Северного широтного хода 602

Ф. И. Сухов, В. Г. Попов, Ю. К. Боландова, Е. Г. Асманкин

- Управление безопасностью и культура безопасности на транспорте 611

О. Р. Хамидов

- Разработка нейросетевой модели для диагностики состояния локомотивного асинхронного электродвигателя 620

Ж. О. Кувондииков, А. Е. Цаплин

- Методика анализа и математическая модель функции готовности локомотивного парка с учетом холодного резерва 631

А. Ф. Колос, П. А. Чистяков, Е. Г. Шаврин

- Изменение прочностных свойств щебня в процессе абразивного износа 642

М. А. Шрайбер

Анализ напряженно-деформированного состояния подшипника асинхронного электродвигателя 650

Е. С. Юдникова

Методические аспекты выбора местоположения транспортно-логистического кластера с учетом факторов, определяющих потенциал городов 658

→ ОБЩЕТЕХНИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ**Ю. В. Лобанова, М. Я. Брынь, Д. А. Афонин**

Определение коэффициента рефракции на коротких расстояниях 670

Р. Н. Ермаков, А. О. Кравцов, А. А. Привалов, Н. П. Заугольный, Е. В. Скуднева

Определение протокола информационного обмена прикладного уровня на основе классификации сетевых пакетов с применением нейронных сетей и алгоритмов нечеткой логики в системах анализа трафика 677

CONTENTS

→ PROBLEMATIC OF TRANSPORT SYSTEM

P. A. Plekhanov

- Risk-based approach to transport safety as part of the integrated safety of the railway transport 539

→ HIGH TECHNOLOGIES FOR TRANSPORT

V. A. Bolotin, M. Kravchenko, N. G. Yankovskaya

- Application of demountable car bodies for delivery of seasonal bulky loads 552

I. V. Fedorov, A. A. Vorobyev, I. K. Samarkina, O. A. Konogray, T. G. Bunkova

- The study of stress condition in "wheel-rail" contact in case of jaggling 562

K. K. Kim, S. N. Ivanov, M. I. Khismatulin

- Advantages of application of devices for transportation and heating of working liquids in various industries 573

K. K. Kim, I. R. Kron

- Stability analysis of passenger pipeline transport capsule in steady state in case of disturbances of longitudinal coordinate 584

A. Ya. Yakushev, T. M. Nazirkhonov, I. P. Vikulov, K. V. Markov

- Determination of the main parameters of an asynchronous traction electric motor 592

V. A. Sugorovsky

- The development of railway infrastructure of stations related to implementation of the investment design project for Northern Latitudinal Railway 602

F. I. Sukhov, V. G. Popov, Yu. K. Bolandova, E. G. Asmankin

- Safety management and safety culture in transport 611

O. R. Khamidov

- Design of neural diagnosis model for locomotive induction motor 620

J. O. Kuvondikov, A. E. Tsaplin

- Method of analysis and simulation model of locomotive fleet availability function accounting for cold standby reserve 631

A. F. Kolos, P. A. Chistyakov, E. G. Shavrin

- Change in the strength properties of crushed stone due to abrasive wear 642

M. A. Shreiber

Stress-strain behavior analysis of the roller bearing for asynchronous induction motor 650

E. S. Iudnikova

Methodological aspects of selection of a logistics cluster location accounting for factors determining city potential 658

→ GENERAL TECHNICAL PROBLEMS AND SOLUTION APPROACH**Yu. V. Lobanova, M. Ya. Bryn', D. A. Afonin**

Determining the refractive index at short distances 670

R. N. Ermakov, A. O. Kravtsov, A. A. Privalov, N. P. Zaigol'nyi, E. V. Skudneva

Attribution of application-level data communications protocol on the basis of classification of network packets using neural networks and fuzzy-logic algorithms in traffic analysis systems 677



УДК 625.1:656.2

Риск-ориентированный подход к обеспечению транспортной безопасности как части комплексной безопасности железнодорожного транспорта

П. А. Плеханов

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

Для цитирования: Плеханов П. А. Риск-ориентированный подход к обеспечению транспортной безопасности как части комплексной безопасности железнодорожного транспорта // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2019. – Т. 16, вып. 4. – С. 539–551. DOI: 10.20295/1815-588X-2019-4-539-551

Аннотация

Цель: Описание перспективного риск-ориентированного подхода к обоснованию мероприятий по обеспечению транспортной безопасности как части комплексной безопасности железнодорожного транспорта. **Методы:** Применены методы оценки рисков на железнодорожном транспорте в соответствии с современными международными стандартами по управлению комплексом взаимосвязанных показателей надежности, готовности, ремонтпригодности, безопасности (Reliability, Availability, Maintainability, Safety – RAMS) и стоимости (Life Cycle Cost – LCC) на всех этапах жизненного цикла систем и технических средств железнодорожного транспорта. **Результаты:** На основе современной практики управления рисками нарушений безопасности на железнодорожном транспорте с использованием инструментария уровней полноты (гарантированности) безопасности предложен механизм обоснования мероприятий по обеспечению транспортной безопасности, исходя из необходимости нормативного определения уровня допустимого риска, связанного с угрозами возникновения актов незаконного вмешательства, и построения моделей нарушителей. Рассмотрены семь вариантов уровней полноты (гарантированности) транспортной безопасности в зависимости от возможной тяжести последствий (ущерба), времени реагирования, возможности предотвращения (подконтрольности), а также вероятности возникновения угрозы акта незаконного вмешательства. Каждому из уровней поставлена в соответствие необходимость проведения дополнительных мероприятий по обеспечению транспортной безопасности, при этом мероприятия предлагается распределить по трем контурам реагирования на угрозы совершения актов незаконного вмешательства – упреждающему, своевременному и чрезвычайному. **Практическая значимость:** Предлагаемый риск-ориентированный подход к обоснованию мероприятий по обеспечению транспортной безопасности как части комплексной безопасности железнодорожного транспорта в перспективе может быть использован для оценки уязвимости объектов железнодорожного транспорта, а также при разработке для них планов обеспечения транспортной безопасности.

Ключевые слова: Комплексная безопасность железнодорожного транспорта, транспортная безопасность, управление рисками, уровень допустимого риска, уровень полноты (гарантированности) безопасности.

Применительно к железнодорожному транспорту транспортная безопасность, т. е. состояние защищенности от актов незаконного вмешательства (в том числе террористических актов и несанкционированного доступа), является частью комплексной безопасности [1–3], обеспечение которой, в свою очередь, означает отсутствие недопустимого риска возникновения нарушений, связанных с нанесением ущерба жизни или здоровью людей, окружающей среде, материальным ценностям, и определяется соответствующей нормативной

базой [4], включающей нормативные правовые и нормативные технические документы (рис. 1).

Как известно, обеспечение транспортной безопасности в России регламентируется федеральным законом [5] и связанными с ним подзаконными актами, которые предусматривают принятие организационных и технических мер, требующих существенных затрат на свою реализацию, а именно:

– комплектование и поддержание штата аттестованных сил обеспечения транспортной

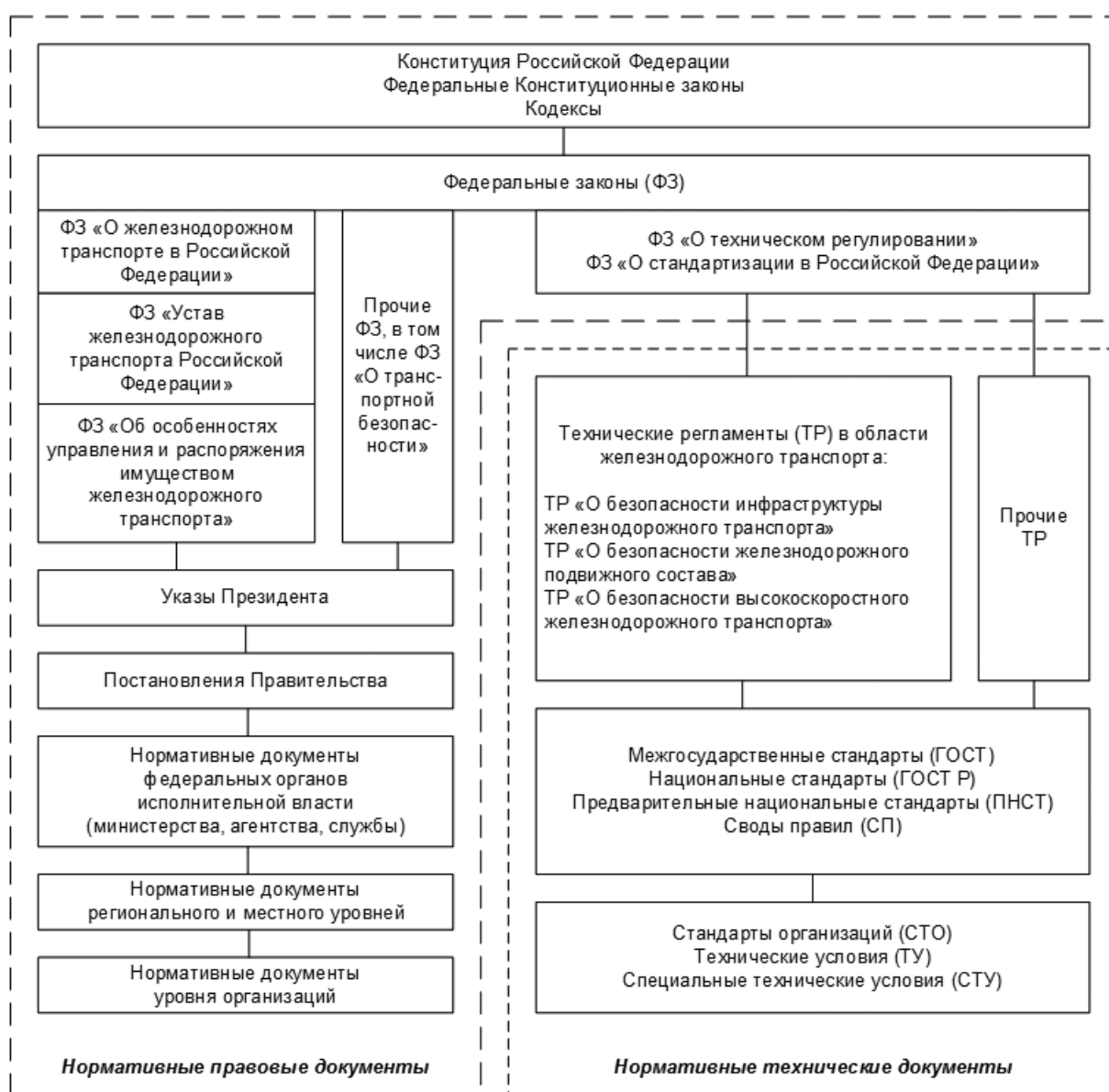


Рис. 1. Российская нормативная база комплексной безопасности железнодорожного транспорта

безопасности, призванных реагировать на попытки совершения актов незаконного вмешательства;

- проектирование и строительство инженерных сооружений, к которым относятся системы периметрального ограждения, автомобильные и пешеходные дороги (проходы) для сил обеспечения транспортной безопасности, специальные здания и сооружения, а также дополнительная защита дверных и оконных конструкций и технологических (вентиляционных, канализационных и т. п.) каналов;

- оснащение объектов транспортной инфраструктуры и транспортных средств сертифицированными техническими средствами обеспечения транспортной безопасности, включающими технические системы и средства сигнализации, контроля доступа, досмотра, видеонаблюдения (в том числе интеллектуального видеонаблюдения), видео- и аудиозаписи, связи, приема и передачи информации, оповещения, сбора и обработки информации;

- проведение оценки уязвимости и разработка планов обеспечения транспортной безопасности объектов транспортной инфраструктуры и транспортных средств с утверждением их результатов.

Снижение затрат возможно при условии внесения изменений в нормативную базу обе-

спечения транспортной безопасности, например в части пересмотра требований к техническим средствам (для уменьшения их общего количества), организации досмотра (исключение избыточных процедур), порядка разработки планов обеспечения транспортной безопасности и т. д. При этом мероприятия по обеспечению транспортной безопасности как части комплексной безопасности железнодорожного транспорта должны обеспечивать отсутствие недопустимого риска, связанного с актами незаконного вмешательства. Проблема состоит в том, что в нормативной базе как комплексной безопасности железнодорожного транспорта вообще, так и транспортной безопасности в частности отсутствует критерий допустимости риска [6–8].

В мировой практике управления комплексной безопасностью железнодорожного транспорта на основе управления комплексом взаимовязанных показателей надежности, готовности, ремонтпригодности, безопасности (Reliability, Availability, Maintainability, Safety – RAMS) [9–12] и стоимости (Life Cycle Cost – LCC) [13] на всех этапах жизненного цикла риск нарушения безопасности рассматривается как комбинация вероятности возникновения нарушения и тяжести его последствий (табл. 1, рис. 2).

ТАБЛИЦА 1. Матрица рисков нарушений комплексной безопасности железнодорожного транспорта

Частота возникновения нарушения	Последствия нарушения			
	незначительные	ограниченные	критические	катастрофические
	Уровень риска			
Частое	Нежелательный	Недопустимый	Недопустимый	Недопустимый
Вероятное	Допустимый	Нежелательный	Недопустимый	Недопустимый
Случайное	Допустимый	Нежелательный	Нежелательный	Недопустимый
Маловероятное	Пренебрежимый	Допустимый	Нежелательный	Нежелательный
Практически невероятное	Пренебрежимый	Пренебрежимый	Допустимый	Допустимый
Невозможное	Пренебрежимый	Пренебрежимый	Пренебрежимый	Пренебрежимый

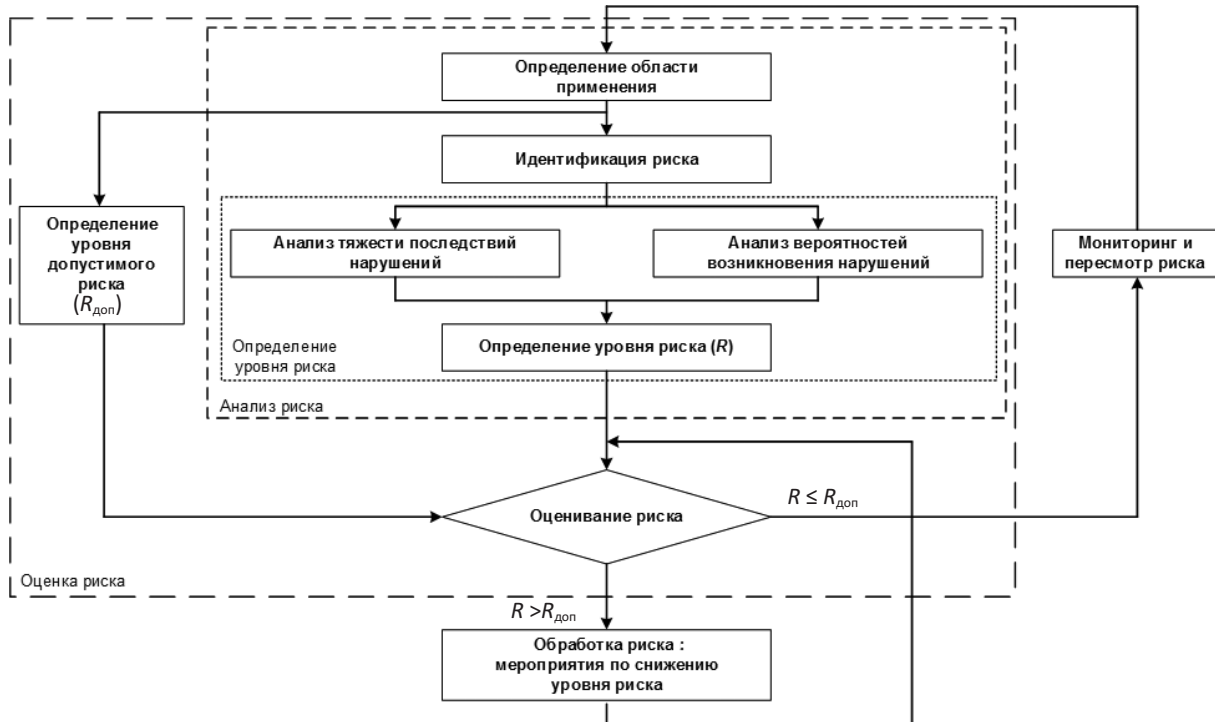


Рис. 2. Процесс управления рисками нарушений комплексной безопасности железнодорожного транспорта

При этом можно выделить три основных подхода к определению уровня допустимого риска:

– ALARP (As Low As Reasonably Practicable) – риск нарушения должен быть настолько низким, насколько это достижимо на практике;

– MEM (Minimum Endogenous Mortality) – риск нарушения не должен превышать риск минимальной эндогенной смертности, т. е. смертности индивидуума в силу внутренних причин в самом жизнеспособном возрасте (это случаи смерти вследствие врожденных пороков, наследственных заболеваний и т. п., при этом к экзогенной смертности относятся случаи смерти от всех внешних по отношению к организму причин);

– GAMAB (с фр. «Globalement Au Moins Aussi Bon») – риск нарушения для новой системы должен быть, по крайней мере, таким же, как для равнозначной существующей системы.

Таким образом, первым шагом на пути оптимизации затрат на обеспечение транспорт-

ной безопасности железнодорожного транспорта должно стать нормативное определение уровня допустимого риска, связанного с угрозами возникновения актов незаконного вмешательства. В настоящее время законодательно определены шесть типов таких угроз [14]:

- угроза захвата;
- угроза взрыва (обстрела);
- угроза размещения или попытки размещения взрывных устройств (взрывчатых веществ);
- угроза поражения опасными веществами (химическими, радиоактивными или биологическими агентами);
- угроза блокирования;
- угроза хищения.

В отличие от безопасности движения [15] (которая, как и транспортная, является частью комплексной безопасности железнодорожного транспорта и регламентируется федеральным законом [16]), где все причины нарушений можно условно распределить по четырем факторам – технический, человеческий, орга-

низационный, природный, – к области транспортной безопасности относятся только противоправные действия людей. При этом всех потенциальных нарушителей можно опять-таки условно разделить на следующие основные типы:

- случайные – не знают, что объект охраняется, и не имеют специальной цели проникновения на объект;
- неподготовленные – проникают на объект со специальной целью и предполагают возможность охраны объекта, но не обладают информацией о структуре и принципах действия системы охраны;
- подготовленные – имеют информацию о возможных методах обхода системы охраны объекта и прошли общую подготовку;
- специально подготовленные – прошли определенную подготовку и обладают специальными средствами обхода системы охраны объекта;
- работники объекта, в том числе сотрудники службы охраны.

Построение системы обеспечения транспортной безопасности конкретного объекта железнодорожного транспорта должно начинаться с формирования модели потенциального нарушителя, под которой понимается его описательная характеристика, отражающая моральный облик, намерения, степень подготовленности и оснащенности.

Зная уровень допустимого риска, связанного с угрозами возникновения актов незаконного вмешательства, и обладая моделью потенциального нарушителя, можно переходить к определению необходимых мероприятий по обеспечению транспортной безопасности.

Сегодня перечень мероприятий по обеспечению транспортной безопасности нормативно определен [17, 18] и зависит от присвоенной конкретному объекту железнодорожного транспорта категории [19] и объявленного уровня безопасности [20]. Соответствующими нормативными документами предусмотрены три подхода к установлению одной из четырех возможных категорий объектов железнодорожного транспорта (в зависимости от коли-

чественных показателей о числе совершенных и предотвращенных актов незаконного вмешательства, возможных погибших или получивших вред здоровью людей, потенциальном материальном ущербе и ущербе окружающей природной среде) и три возможных уровня безопасности (при наличии потенциальных, непосредственных и прямых угроз).

Предлагаемый риск-ориентированный подход к обоснованию мероприятий по обеспечению транспортной безопасности как части комплексной безопасности железнодорожного транспорта предполагает применение инструментария уровней полноты (гарантированности) безопасности (Safety Integrity Levels – SILs) [21, 22] – способности системы к выполнению функций безопасности при всех заданных условиях в течение конкретного промежутка времени (рис. 3).

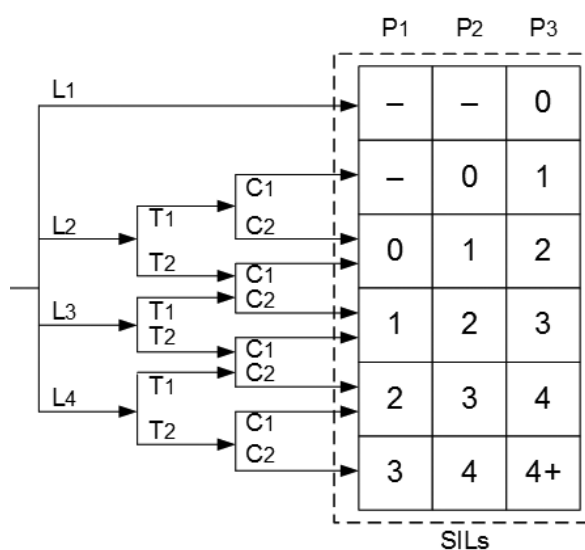


Рис. 3. Использование инструментария уровней полноты (гарантированности) безопасности для определения уровней полноты (гарантированности) транспортной безопасности (см. объяснение в тексте)

На рис. 3 приведены следующие обозначения:

- L – возможная тяжесть последствий (ущерб) акта незаконного вмешательства (табл. 1);
- L1 – возможен незначительный ущерб, L2 –

возможен ограниченный ущерб, L3 – возможен критический ущерб, L4 – возможен катастрофический ущерб;

– T – время реагирования на акт незаконного вмешательства, зависящее от применяемых на объекте инженерных сооружений и технических средств, а также сил обеспечения транспортной безопасности: T1 – требуется незначительное время реагирования, T2 – требуется значительное время реагирования;

– C – возможность предотвращения (подконтрольность) акта незаконного вмешательства (локализация нарушителя), также зависящая от находящихся на объекте инженерных сооружений, технических средств и сил обеспечения транспортной безопасности: C1 – предотвращение возможно (акт незаконного вмешательства подконтролен), C2 – предотвращение невозможно (акт незаконного вмешательства неподконтролен);

ТАБЛИЦА 2. Характеристика контуров реагирования на угрозы совершения актов незаконного вмешательства в деятельность железнодорожного транспорта

Контур реагирования	Примеры предметов сбора информации	Примеры мероприятий
Упреждающее реагирование (профилактические мероприятия): предотвращение акта незаконного вмешательства, ущерб от действий нарушителя отсутствует	Лица и автомобили, находящиеся в розыске; нарушения режима доступа к объектам железнодорожного транспорта; автомобили, появление которых повторяется на разных участках приближения к объектам железнодорожного транспорта; синхронизация появления подозрительных лиц на разных участках приближения к объектам железнодорожного транспорта; появление подозрительных лиц в поездах; движение специальных грузов и др.	Анализ оперативных признаков; проверка документов и досмотр подозрительных лиц и автомобилей; оперативная готовность патрульно-постовых групп и др.
Своевременное реагирование: обнаружение и блокирование действий нарушителя, пытающегося осуществить акт незаконного вмешательства (ущерб от действий нарушителя минимален)	Проникновение на объекты железнодорожного транспорта; нештатное поведение персонала на объектах железнодорожного транспорта; синхронное движение на разных участках режимных зон лиц, имеющих допуски в соответствующие зоны и др.	При необходимости преследование и задержание подозрительных лиц; дополнительное развертывание патрульно-постовых групп; предупреждение дежурных смен подразделений управления движением поездов и др.
Чрезвычайное реагирование: максимально быстрое блокирование действий нарушителя, сумевшего осуществить акт незаконного вмешательства (ущерб от действий нарушителя может быть весьма значительным)	Автомобили, остановившиеся на переездах, и др.	При необходимости остановка движения поездов и др.

– Р – вероятность возникновения угрозы акта незаконного вмешательства (табл. 1); P1 – низкая (практически невероятный или невозможный акт незаконного вмешательства); P2 – средняя (случайный или маловероятный акт незаконного вмешательства); P3 – высокая (частый или вероятный акт незаконного вмешательства);

– SILs – уровни полноты (гарантированности) транспортной безопасности (в данном случае слово «safety» по смыслу необходимо заменить на слово «security» – «Security Integrity Levels»):

SIL «-» – уровень пренебрежимого риска (табл. 1), дополнительные меры по транспортной безопасности не требуются;

SIL «0» – уровень допустимого риска (табл. 1), могут быть приняты дополнительные меры по транспортной безопасности на усмотрение субъекта транспортной инфраструктуры;

SIL «1», SIL «2» – уровень нежелательного риска (табл. 1), должны быть приняты дополнительные меры по транспортной безопасности в соответствии с действующими нормативными документами;

SIL «3», SIL «4» – уровень недопустимого риска (табл. 1), необходим тщательный анализ причинно-следственных связей возникновения и развития акта незаконного вмешательства и принятие усиленных дополнительных мер по транспортной безопасности, направленных на снижение значений параметров L, T, C;

SIL «4+» – уровень недопустимого риска (см. табл. 1), необходим тщательный анализ причинно-следственных связей возникновения и развития акта незаконного вмешательства с обязательным привлечением соответствующих экспертных организаций и силовых ведомств и принятие специальных мер по транспортной безопасности.

Таким образом, дополнительные мероприятия по обеспечению транспортной безопасности могут определяться соответствующим уровнем полноты (гарантированности) транспортной безопасности, который, в свою оче-

редь, должен зависеть от уровня допустимого риска, связанного с угрозами возникновения актов незаконного вмешательства, и моделей потенциальных нарушителей. При этом мероприятия предлагается распределить по трем контурам реагирования на угрозы совершения актов незаконного вмешательства (табл. 2).

Предлагаемый риск-ориентированный подход к обоснованию мероприятий по обеспечению транспортной безопасности как части комплексной безопасности железнодорожного транспорта в перспективе может быть использован при проведении оценки уязвимости объектов железнодорожного транспорта [23, 24], а также при разработке для них планов обеспечения транспортной безопасности [25]. Данный подход может оказаться полезен при рассмотрении вопросов обеспечения информационной и кибербезопасности на железнодорожном транспорте [26–29], а также безопасности и надежности перевозочного процесса в целом [30].

Библиографический список

1. Шматченко В. В. Управление безопасностью субъектов предпринимательства / В. В. Шматченко, П. А. Плеханов, В. Г. Иванов, В. В. Конюшков // Экономическое возрождение России. – 2009. – № 4. – С. 25–28.
2. Красковский А. Е. Комплексная оценка рисков для безопасности движения / А. Е. Красковский, Д. И. Рогоза, П. А. Плеханов // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. – СПб. : ПГУПС, 2011. – Вып. 1. – С. 54–65.
3. Плеханов П. А. Проблема формирования требований к качеству и безопасности перевозочных услуг железнодорожного транспорта / П. А. Плеханов // Экономика железных дорог. – 2015. – № 10. – С. 20–27.
4. Плеханов П. А. Формирование нормативной базы обеспечения безопасности движения в условиях реформирования российских железных дорог / П. А. Плеханов, В. Г. Иванов // Вестн. транспорта Поволжья. – 2011. – № 4. – С. 6–13.

5. Федеральный закон от 9 февраля 2007 г. № 16-ФЗ «О транспортной безопасности» // Справочная правовая система «КонсультантПлюс». – URL : http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_66069 (дата обращения : 22.09.2019 г.).

6. Технический регламент Таможенного союза «ТР ТС 003/2011. Технический регламент ТС. О безопасности инфраструктуры железнодорожного транспорта». – Утв. Решением Комиссии Таможенного союза от 15.07.2011 г. № 710 // Справочная правовая система «КонсультантПлюс». – URL : http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_118006 (дата обращения : 22.09.2019 г.).

7. Технический регламент Таможенного союза «ТР ТС 001/2011. Технический регламент ТС. О безопасности железнодорожного подвижного состава». – Утв. Решением Комиссии Таможенного союза от 15.07.2011 г. № 710 // Справочная правовая система «КонсультантПлюс». – URL : http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_118006 (дата обращения : 22.09.2019 г.).

8. Технический регламент Таможенного союза «ТР ТС 002/2011. Технический регламент ТС. О безопасности высокоскоростного железнодорожного транспорта». – Утв. Решением Комиссии Таможенного союза от 15.07.2011 г. № 710 // Справочная правовая система «КонсультантПлюс». – URL : http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_118006 (дата обращения : 22.09.2019 г.).

9. IEC 62278 (2002). Railway applications – Specification and demonstration of Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS)¹. – М. : Стандартинформ, 2002. – 162 с.

10. IEC 62279 (2015). Railway applications – Communications, signalling and processing systems – Software for railway control and protection systems². – М. : Стандартинформ, 2015. – 276 с.

11. IEC 62425 (2007). Railway applications – Communication, signalling and processing systems – Safety

¹ Железнодорожные приложения – Обоснование и подтверждение выполнения требований по надежности, готовности, ремонтпригодности и безопасности.

² Железнодорожные приложения – Системы связи, сигнализации и обработки данных – Программное обеспечение для систем железнодорожного управления и блокировки.

related electronic systems for signalling³. – М. : Стандартинформ, 2007. – 198 с.

12. Шматченко В.В. Стандарты комитета СЕ-NELEC как составная часть международного стандарта железнодорожной промышленности IRIS / В.В. Шматченко, П.А. Плеханов // Актуальные вопросы развития систем железнодорожной автоматики и телемеханики : сб. науч. трудов / под ред. Вл.В. Сапожникова. – СПб. : ПГУПС, 2013. – С. 75–79.

13. IEC 60300-3-3 (2017). Dependability management – Pt 3-3 : Application guide – Life cycle costing⁴. – М. : Стандартинформ, 2017. – 130 с.

14. Приказ Минтранса РФ № 52, ФСБ РФ № 112, МВД РФ № 134 от 5 марта 2010 г. «Об утверждении Перечня потенциальных угроз совершения актов незаконного вмешательства в деятельность объектов транспортной инфраструктуры и транспортных средств» // Справочная правовая система «КонсультантПлюс». – URL : http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_99168 (дата обращения : 22.09.2019 г.).

15. Красковский А.Е. Развитие системы управления безопасностью движения на железнодорожном транспорте в международном сообществе / А.Е. Красковский, В.Г. Рейнгардт, П.А. Плеханов // Транспорт Российской Федерации. – 2010. – № 6. – С. 40–43.

16. Федеральный закон от 10 января 2003 г. № 17-ФЗ «О железнодорожном транспорте в Российской Федерации» // Справочная правовая система «КонсультантПлюс». – URL : http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_40443 (дата обращения : 22.09.2019 г.).

17. Постановление Правительства РФ от 26 апреля 2017 г. № 495 «Об утверждении требований по обеспечению транспортной безопасности, в том числе требований к антитеррористической защищенности объектов (территорий), учитывающих уровни безопасности для различных категорий объектов транспортной инфраструктуры и транспортных

³ Железнодорожные приложения – Системы связи, сигнализации и обработки данных – Безопасные электронные системы сигнализации.

⁴ Менеджмент гарантоспособности – Ч. 3-3 : Руководство по применению – Стоимость жизненного цикла.

средств железнодорожного транспорта» // Справочная правовая система «КонсультантПлюс». – URL : http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_216086 (дата обращения : 22.09.2019 г.).

18. Постановление Правительства РФ от 23 января 2016 г. № 29 «Об утверждении требований по обеспечению транспортной безопасности объектов транспортной инфраструктуры по видам транспорта на этапе их проектирования и строительства и требований по обеспечению транспортной безопасности объектов (зданий, строений, сооружений), не являющихся объектами транспортной инфраструктуры и расположенных на земельных участках, прилегающих к объектам транспортной инфраструктуры и отнесенных в соответствии с земельным законодательством Российской Федерации к охраняемым зонам земель транспорта, и о внесении изменений в Положение о составе разделов проектной документации и требованиях к их содержанию» // Справочная правовая система «КонсультантПлюс». – URL : http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_192872 (дата обращения : 22.09.2019 г.).

19. Приказ Минтранса РФ от 21 февраля 2011 г. № 62 «О порядке установления количества категорий и критериев категорирования объектов транспортной инфраструктуры и транспортных средств компетентными органами в области обеспечения транспортной безопасности» // Справочная правовая система «КонсультантПлюс». – URL : http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_111992 (дата обращения : 22.09.2019 г.).

20. Постановление Правительства РФ от 10 декабря 2008 г. № 940 «Об уровнях безопасности объектов транспортной инфраструктуры и транспортных средств и о порядке их объявления (установления)» // Справочная правовая система «КонсультантПлюс». – URL : http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_82521 (дата обращения : 22.09.2019 г.).

21. Шматченко В. В. Безопасность технологических процессов / В. В. Шматченко, П. А. Плеханов, В. Г. Иванов. – СПб. : ПГУПС, 2016. – 29 с.

22. Шматченко В. В. Управление безопасностью высокоскоростного железнодорожного транспорта / В. В. Шматченко, П. А. Плеханов // Бюл. результатов науч. исследований. – 2017. – Вып. 3. – С. 105–118.

23. Приказ Минтранса РФ от 12 апреля 2010 г. № 87 «О порядке проведения оценки уязвимости объектов транспортной инфраструктуры и транспортных средств» // Справочная правовая система «КонсультантПлюс». – URL : http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_100834 (дата обращения : 22.09.2019 г.).

24. ГОСТ Р 57119–2016. Методика проведения оценки уязвимости объектов транспортной инфраструктуры и транспортных средств. Общие требования // Электронный фонд нормативно-технической и нормативно-правовой информации «Техэксперт». – URL : <http://docs.cntd.ru/document/1200140230> (дата обращения : 22.09.2019 г.).

25. Приказ Минтранса РФ от 11 февраля 2010 г. № 34 «Об утверждении порядка разработки планов обеспечения транспортной безопасности объектов транспортной инфраструктуры и транспортных средств» // Справочная правовая система «КонсультантПлюс». – URL : http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_98778 (дата обращения : 22.09.2019 г.).

26. Корниенко А. А. Концептуальная модель интеллектуальной системы риск-ориентированного упреждающего управления информационной безопасностью железнодорожного транспорта / А. А. Корниенко, А. П. Глухов, С. В. Диасамидзе, М. Л. Глухарев, Д. Н. Бирюков // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. – СПб. : ПГУПС, 2018. – Т. 15, вып. 1. – С. 152–160.

27. Корниенко А. А. Модели и методы риск-ориентированного проактивного управления информационной безопасностью железнодорожной транспортной системы / А. А. Корниенко, А. П. Глухов // Бюл. Объед. учен. совета ОАО «РЖД». – 2018. – № 3. – С. 42–54.

28. Сидак А. А. Категорирование и оценка значимости объектов критической информационной инфраструктуры железнодорожного транспорта / А. А. Сидак, А. А. Корниенко, А. П. Глухов, С. В. Диасамидзе // Двойные технологии. – 2019. – № 1. – С. 88–93.

29. Журавлева Н. А. Проблемы экономической безопасности транспортных систем в условиях глобальных киберугроз / Н. А. Журавлева, А. Б. Никитин // Экономические науки. – 2018. – № 168. – С. 20–25.

30. Котенко А. Г. Методология риск-ориентированного планирования качественных показателей эксплуатационной работы железных дорог : автореф. дис. ... д-ра техн. наук, специальность : 05.22.08 / А. Г. Котенко. – СПб. : ПГУПС, 2014. – 32 с.

Дата поступления: 15.11.2019
Решение о публикации: 21.11.2019

Контактная информация:

ПЛЕХАНОВ Павел Андреевич – канд. техн. наук, доцент; pavelplekhanov@gmail.com

Risk-based approach to transport safety as part of the integrated safety of the railway transport

P. A. Plekhanov

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

For citation: Plekhanov P.A. Risk-based approach to transport safety as part of the integrated safety of the railway transport. *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2019, vol. 16, iss. 4, pp. 539–551. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2019-4-539-551

Summary

Objective: To describe the prospective risk-based approach to substantiation of transport safety measures as part of the integrated safety of the railway transport. **Methods:** The methods of risk assessment in the railway transport were applied in accordance with current international standards for managing a set of interrelated indicators of Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS) and Life Cycle Cost (LCC) throughout the life cycle of the railway transport systems and technical means. **Results:** Based on the current practice of managing the risks of safety violations in the railway transport using the tools of safety integrity (guaranteed) levels, a mechanism has been proposed to substantiate measures to ensure the transport safety, based on the need to regulate the level of acceptable risk associated with threats of acts of unlawful interference and to build models of violators. Seven options for the transport safety integrity (guaranteed) levels have been considered, depending on the possible severity of the consequences (damage), response time, the possibility of prevention (control), and the likelihood of an act of unlawful interference. Additional measures to ensure the transport safety are suggested for each level, while it is proposed to distribute the measures along three response paths to threats of acts of unlawful interference: proactive, timely, and emergency paths. **Practical importance:** The proposed risk-based approach to substantiation of transport safety measures as part of the integrated safety of the railway transport can be used in the future to assess the vulnerability of railroad facilities, as well as to develop transport safety plans for them.

Keywords: Integrated safety of the railway transport, transport safety, risk management, acceptable risk level, safety integrity (guaranteed) level.

References

1. Shmatchenko V.V., Plekhanov P.A., Ivanov V.G. & Konyushkov V.V. Upravleniye bezopasnost'yu sub'yektov predprinimatel'stva [Safety management of business entities]. *The Economic Revival of Russia*, 2009, no. 4, pp. 25–28. (In Russian)
2. Kraskovskiy A. E., Rogoza D. I. & Plekhanov P.A. Kompleksnaya otsenka riskov dlya bezopasnosti dvizheniya [Comprehensive risk assessment

for traffic safety]. *Proceedings of Petersburg Transport University*. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2011, iss. 1, pp. 54–65. (In Russian)

3. Plekhanov P.A. Problema formirovaniya trebovaniy k kachestvu i bezopasnosti perevozhnykh uslug zheleznodorozhnogo transporta [The problem of determining requirements for the quality and safety of railway transportation services]. *Ekonomika zheleznikh dorog [Railway Economy]*, 2015, no. 10, pp. 20–27. (In Russian)

4. Plekhanov P.A. & Ivanov V.G. Formirovaniye normativnoy bazy obespecheniya bezopasnosti dvizheniya v usloviyakh reformirovaniya rossiyskikh zheleznikh dorog [Establishing the normative base to provide traffic safety under railway reforms in Russia]. *Vestnik transporta Povolzh'ya [Transport Bulletin of the Volga region]*, 2011, no. 4, pp. 6–13. (In Russian)

5. Federal law N 16-FZ as of February 9, 2007. On Transport Safety. *ConsultantPlus legal reference information system*. Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_66069/ (accessed: 22.09.2019). (In Russian)

6. Technical Regulations of the Customs Union TR CU 003/2011. Technical Regulations of the CU. On Safety of Railway Transport Infrastructure. Approved by Resolution of the Customs Union Commission as of July 15, 2011, N 710. *ConsultantPlus legal reference information system*. Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_118006/ (accessed: 22.09.2019). (In Russian)

7. Technical Regulations of the Customs Union TR CU 001/2011. Technical Regulations of the CU. On the Safety of Railway Rolling Stock. Approved by Resolution of the Customs Union Commission as of July 15, 2011, N 710. *ConsultantPlus legal reference information system*. Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_118006/ (accessed: 22.09.2019). (In Russian)

8. Technical Regulations of the Customs Union TR CU 002/2011. Technical Regulations of the CU. On Safety of High-Speed Railway Transport. Approved by Resolution of the Customs Union Commission as of July 15, 2011, N 710. *ConsultantPlus legal reference information system*. Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_118006/ (accessed: 22.09.2019). (In Russian)

9. IEC 62278 (2002). *Railway applications – Specification and demonstration of Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS)*. Moscow, Standartinform Publ., 2002, 162 p.

10. IEC 62279 (2015). *Railway applications – Communications, signalling and processing systems – Software for railway control and protection systems*. Moscow, Standartinform Publ., 2015, 276 p.

11. IEC 62425 (2007). *Railway applications – Communication, signalling and processing systems – Safety related electronic systems for signalling*. Moscow, Standartinform Publ., 2007, 198 p.

12. Shmatchenko V.V. & Plekhanov P.A. Standarty komiteta CENELEC kak sostavnaya chast' mezhdunarodnogo standarta zheleznodorozhnoy promyshlennosti IRIS [Standards of the CENELEC Committee as an integral part of the international railway industry standard IRIS]. *Aktual'nyye voprosy razvitiya sistem zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki*. Sb. nauch. trudov [Actual problems of railway automation and remote control systems development. Scientific proceedings]. Ed. by V.I. Sapozhnikov. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2013, pp. 75–79. (In Russian)

13. IEC 60300-3-3 (2017). *Dependability management. Pt 3-3. Application guide – Life cycle costing*. Moscow, Standartinform Publ., 2017, 130 p.

14. Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation N 52. Federal Security Service of the Russian Federation N 112, Ministry of Internal Affairs of the Russian Federation N 134 dated March 5, 2010. On approval of the List of potential threats of acts of unlawful interference with the activities of the transport infrastructure and vehicles. *ConsultantPlus legal reference information system*. Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_99168/ (accessed: 22.09.2019). (In Russian)

15. Kraskovskiy A. E., Reyngardt V. G. & Plekhanov P.A. Razvitiye sistemy upravleniya bezopasnost'yu dvizheniya na zheleznodorozhnom transporte v mezhdunarodnom soobshchenii [Development of the railway traffic safety management system in international traffic]. *Transport Rossiyskoy Federatsii [Transport of the Russian Federation]*, 2010, no. 6, pp. 40–43. (In Russian)

16. Federal Law N 17-FZ dated January 10, 2003. On Railway Transport in the Russian Federation. *Con-*

sultantPlus legal reference information system. Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_40443/(accessed: 22.09.2019). (In Russian)

17. Decree of the Government of the Russian Federation N 495 dated April 26, 2017. On approval of requirements for ensuring the transport safety, including requirements for anti-terrorist protection of facilities (territories), taking into account the safety levels for various categories of transport infrastructure objects and railway vehicles. *ConsultantPlus legal reference information system*. Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_216086/(accessed: 22.09.2019). (In Russian)

18. Decree of the Government of the Russian Federation N 29, dated January 23, 2016. On approval of requirements for ensuring the transport safety of the transport infrastructure facilities depending on the type of transport at the stage of their designing and construction, and requirements for ensuring the transport safety of facilities (buildings, structures, edifices) that are not the transport infrastructure facilities and are located on land plots adjacent to the transport infrastructure facilities and classified as protected areas of transport lands, in accordance with the land legislation of the Russian Federation, and on amendments to the Regulations on the Scope of the Design Documentation Sections and Requirements to Their Contents. *ConsultantPlus reference information system*. Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_192872/(accessed: 22.09.2019). (In Russian)

19. Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation N 62, dated February 21, 2011. On the procedure for establishing the number of categories and categorization criteria for the transport infrastructure facilities and vehicles by competent authorities related to ensuring the transport safety. *ConsultantPlus legal reference information system*. Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_111992/(accessed: 22.09.2019). (In Russian)

20. Decree of the Government of the Russian Federation N 940, dated December 10, 2008. On safety levels of the transport infrastructure facilities and vehicles and on the procedure for their announcement (establishment). *ConsultantPlus legal reference information system*. Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_82521/(accessed: 22.09.2019). (In Russian)

21. Shmatchenko V. V., Plekhanov P. A. & Ivanov V. G. *Bezopasnost' tekhnologicheskikh protsessov [Process Safety]*. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2016, 29 p. (In Russian)

22. Shmatchenko V. V. & Plekhanov P. A. Upravleniye bezopasnost'yu vysokoskorostnogo zheleznodorozhnogo transporta [Managing the safety of high-speed railway transport]. *Bulletin of scientific research results*, 2017, iss. 3, pp. 105–118. (In Russian)

23. Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation N 87, dated April 12, 2010. On the procedure for assessing the vulnerability of transport infrastructure facilities and vehicles. *ConsultantPlus legal reference information system*. Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_100834/(accessed: 22.09.2019). (In Russian)

24. GOST R 57119–2016. Technique of carrying out assessment of vulnerability objects of transport infrastructure and vehicles. General requirements. *Electronic repository of regulatory, technical, and legal information "Tekhekspert"*. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/1200140230> (accessed: 22.09.2019). (In Russian)

25. Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation N 34, dated February 11, 2010. On approval of the procedure for the development of plans for ensuring transport safety of transport infrastructure facilities and vehicles. *ConsultantPlus legal reference information system*. Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_98778/(accessed: 22.09.2019). (In Russian)

26. Korniyenko A. A., Glukhov A. P., Diasamidze S. V., Glukharev M. L. & Biryukov D. N. Kontseptual'naya model' intellektual'noy sistemy risk-oriyentirovannogo uprezhdayushchego upravleniya informatsionnoy bezopasnost'yu zheleznodorozhnogo transporta [A conceptual model of an intelligent system of risk-based proactive management of information safety of the railway transport]. *Proceedings of Petersburg Transport University*. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2018, vol. 15, iss. 1, pp. 152–160. (In Russian)

27. Korniyenko A. A. & Glukhov A. P. Modeli i metody risk-oriyentirovannogo proaktivnogo upravleniya informatsionnoy bezopasnost'yu zheleznodorozhnoy transportnoy sistemy [Models and methods of risk-

based proactive management of information safety of the railway transport]. *Bulletin of the Joint Scientific Council of Russian Railways*, 2018, no. 3, pp. 42–54. (In Russian)

28. Sidak A. A., Korniyenko A. A., Glukhov A. P. & Diasamidze S. V. Kategorirovaniye i otsenka znachimosti ob'yektov kriticheskoy informatsionnoy infrastruktury zheleznodorozhnogo transporta [Categorizing and assessing the significance of objects of critical information infrastructure of the railway transport]. *Dvoynnyye tekhnologii [Dual Technologies]*, 2019, no. 1, pp. 88–93. (In Russian)

29. Zhuravleva N. A. & Nikitin A. B. Problemy ekonomicheskoy bezopasnosti transportnykh sistem v usloviyakh global'nykh kiberugroz [Problems of economic safety of the transport systems in the context of global cyber threats]. *Economic sciences*, 2018, no. 168, pp. 20–25. (In Russian)

30. Kotenko A. G. *Metodologiya risk-oriyentirovannogo planirovaniya kachestvennykh pokazateley ekspluatatsionnoy raboty zheleznykh dorog [Methodology for risk-based planning of the railways operational performance quality indicators]*. Avtoref. dis. na soiskaniye uchen. stepeni d-ra tekhn. nauk, spetsial'nost': 05.22.08 [Abstract of the dis. for scientist. degree of D.Sc. (Tech.), specialty: 05.22.08]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2014, 32 p. (In Russian)

Received: November 15, 2019

Accepted: November 21, 2019

Author's information:

Pavel A. PLEKHANOV – PhD in Engineering, Associate Professor, pavelplekhanov@gmail.com



УДК 656

К вопросу применения съемных кузовов вагонов для доставки сезонных насыпных грузов

В. А. Болотин¹, М. Кравченко², Н. Г. Янковская¹

¹ Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

² Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Российская Федерация, 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49

Для цитирования: Болотин В. А., Кравченко М., Янковская Н. Г. К вопросу применения съемных кузовов вагонов для доставки сезонных насыпных грузов // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2019. – Т. 16, вып. 4. – С. 552–561.

DOI: 10.20295/1815-588X-2019-4-552-561

Аннотация

Цель: Обоснование возможности применения съемных кузовов вагонов для перевозки зерна и минеральных удобрений с учетом сезонных колебаний объемов погрузки. **Методы:** Сравнительный анализ статистических данных по перевозкам зерна и минеральных удобрений ЗАО «Евро-сиб СПб-ТС» и логистических издержек доставки этих грузов на полигоне Северо-Кавказской железной дороги. **Результаты:** Выполнена оценка эффективности применения съемных кузовов по сравнению с вагонами-хопперами. Сформулированы мероприятия технологического, нормативно-правового и экономического характера, которые необходимы для организации перевозок грузов в съемных кузовах. **Практическая значимость:** Предложенные подходы к построению логистических цепей доставки насыпных грузов в съемных кузовах с учетом сезонных колебаний объемов погрузки помогут грузоотправителям и операторам подвижного состава обоснованно принимать решения при выборе технологии перевозки.

Ключевые слова: Вагон-хоппер, съемный кузов, логистика перевозки, эффективность применения

В настоящее время перевозка различных грузов (зерновых, минеральных удобрений, вяжущих строительных материалов, лесоматериалов и др.) осуществляется специализированными вагонами, обеспечивающими максимальное использование их грузоподъемности и вместимости, механизацию погрузки и выгрузки, сокращение времени простоя на грузовых фронтах. Однако эксплуатация

этих типов вагонов связана с дополнительными транспортными издержками, обусловленными узкой сферой их применения, вынужденными порожними пробегами, а также различной востребованностью парка вагонов при сезонных колебаниях объемов перевозки конкретных грузов. Так, по данным ОАО «РЖД» за 2013–2016 гг. для таких грузов как зерновые и минеральные удобрения перелом-

ными точками являются март-апрель, когда идет резкий спад объемов перевозки зерновых грузов, и август-сентябрь, когда наблюдается спад в перевозках минеральных удобрений (рис. 1 [1]).

Объективные сезонные колебания объемов перевозок грузов вызывают вынужденный простой части специализированного вагонного парка. Невостребованный парк занимает железнодорожные пути как станций, так и мест необщего пользования, что приводит к большим экономическим потерям для операторов подвижного состава и к проблемам в пропускной способности для владельцев инфраструктуры.

Решением проблемы эффективности использования специализированного подвижного состава, особенно в межсезонные периоды снижения объемов перевозок грузов, может стать технология применения съемных кузовов. Она появилась еще в 1980-х годах на автомобильном транспорте. Съемные кузова являются интермодальными транспортными единицами, которые размещаются на транспортной платформе автомобиля или специализированной железнодорожной платформе и, как показывает опыт, довольно широко внедрены за рубежом [2, 3]. Для российских железных дорог такая технология инновационная и требует всестороннего анализа с целью

обоснования ее применения для перевозки различных грузов, с учетом сезонной динамики изменения объемов перевозок, региональной ориентированности и ряда других факторов. Концепция применения съемных кузовов тесно связана с глобальным трендом контейнеризации перевозок [4].

В настоящее время в России разработкой конструкций съемных кузовов интенсивно занимаются НПК «Объединенная Вагонная Компания» и НВЦ «Вагоны».

НПК «Объединенная Вагонная Компания» предлагает использовать технологию перевозок насыпных грузов (зерно и минеральные удобрения) в съемных кузовах на платформах сочлененного типа [5, 6] (рис. 2), созданных для перевозки крупнотоннажных контейнеров, что положительно может отразиться на минимизации порожнего пробега подвижного состава. Съемный кузов разгружается после снятия с платформы, а экипажная часть – платформа – подается под погрузку других съемных кузовов или контейнеров, что сокращает общее время простоя под грузовыми операциями. В период спада объемов перевозок грузов в съемных кузовах такие платформы будут использоваться для перевозки крупнотоннажных контейнеров.

Съемные кузова оборудованы фитингами, что позволяет осуществлять погрузочно-

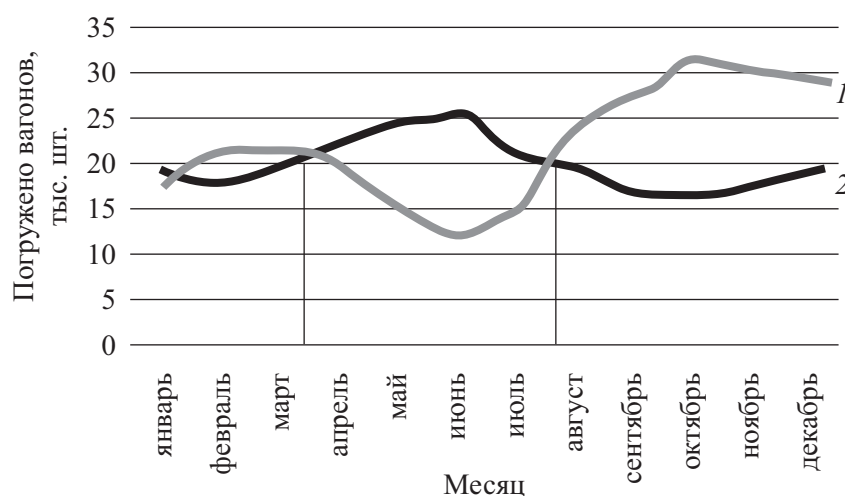


Рис. 1. Средние объемы перевозок грузов за 2013–2016 гг. на сети ОАО «РЖД»: 1 – зерно; 2 – минеральные удобрения

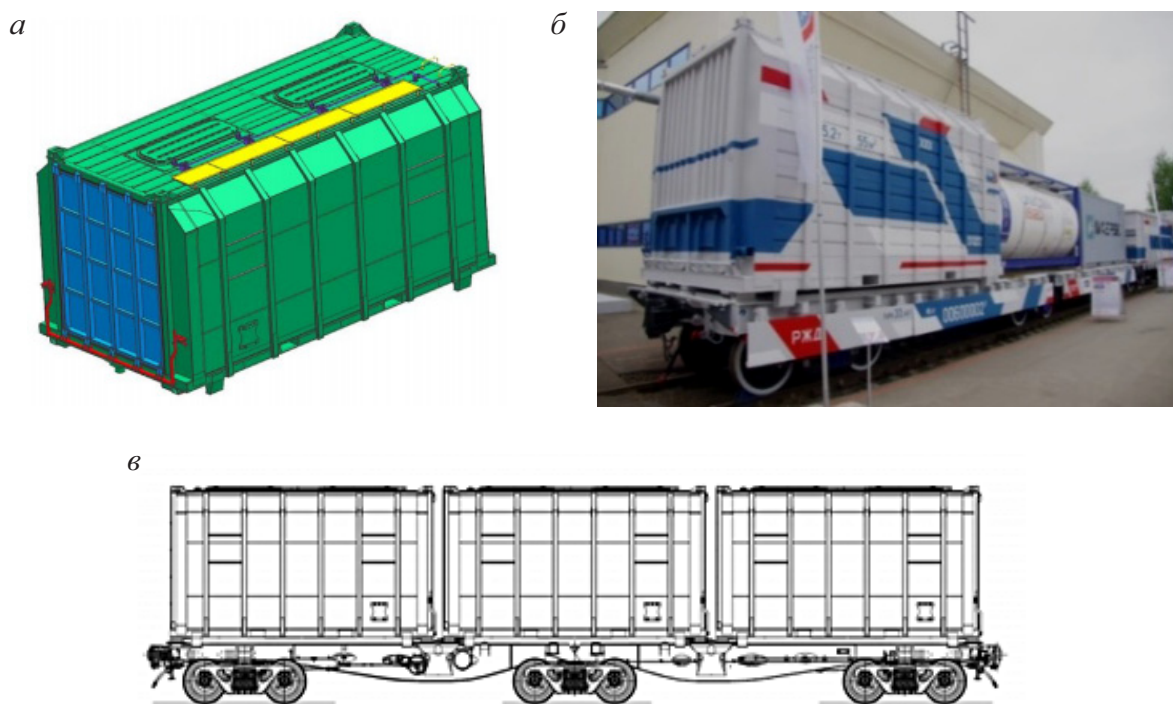


Рис. 2. Съемные кузова для перевозки зерна и минеральных удобрений грузоподъемностью 35,5 т (разработка НПК «Объединенная Вагонная Компания»): а – съемный кузов; б – съемный кузов на платформе; в – платформа сочлененного типа (вид сбоку)

разгрузочные работы теми же средствами механизации, что и крупнотоннажные контейнеры. Особенностью предлагаемых конструкций съемных кузовов является то, что технология их разгрузки отличается от традиционной для насыпных грузов, применяемой для вагонов-хопперов. Выгрузка производится через торцевую дверь путем наклона съемного кузова. Это потребует специального оборудования на фронтах разгрузки.

НВЦ «Вагоны» предлагает удлиненный съемный кузов (рис. 3), имеющий грузоподъемность 73 т. Предусмотрена разгрузка насыпного груза через нижние разгрузочные люки по типу вагонов-хопперов, что позволяет не снимать кузов с платформы и использовать приемные устройства на фронтах разгрузки вагонов-хопперов.

Перевозка съемных кузовов рассмотренного типа осуществляется на специализированных платформах, сконструированных для установки на них съемных кузовов разных

типов. Такая платформа оборудована двойными фитингами для закрепления съемного кузова от продольных смещений (рис. 3) [7].

В данной статье рассмотрена задача возможности применения съемных кузовов для перевозок зерновых грузов и минеральных удобрений в периоды увеличения сезонных объемов на Северо-Кавказской железной дороге, которые осуществляет компания-оператор ЗАО «Евросиб СПб-ТС». Для исследования выбраны станции с максимальной погрузкой. Наиболее интенсивно зерно перевозится между станциями Ипатово и Новороссийск, а минеральные удобрения – между станциями Белореченская и Туапсе-Сортировочная.

На рис. 4 представлены графики, отражающие динамику объемов перевозки зерна и минеральных удобрений за 2015–2018 гг. Их анализ показывает, что в периоды июль–сентябрь резко возрастают объемы перевозок зерновых грузов и сокращаются объемы перевозок минеральных удобрений. В результате сезонной

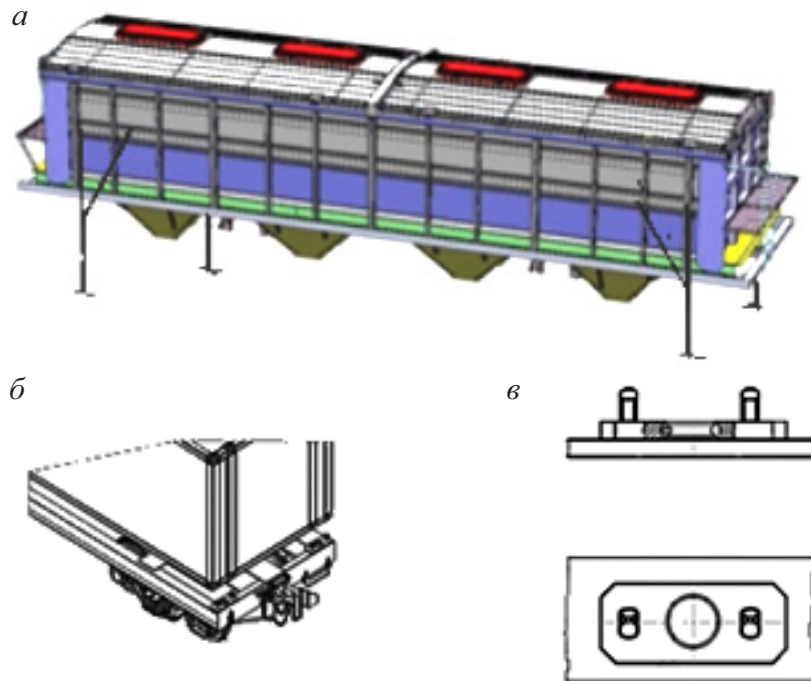


Рис. 3. Съемный кузов типа хоппер (конструкция НВЦ «Вагоны»):
a – общий вид съемного кузова; *б* – место установки сдвоенных фитингов на платформе; *в* – сдвоенные фитинги (вид сбоку и сверху)

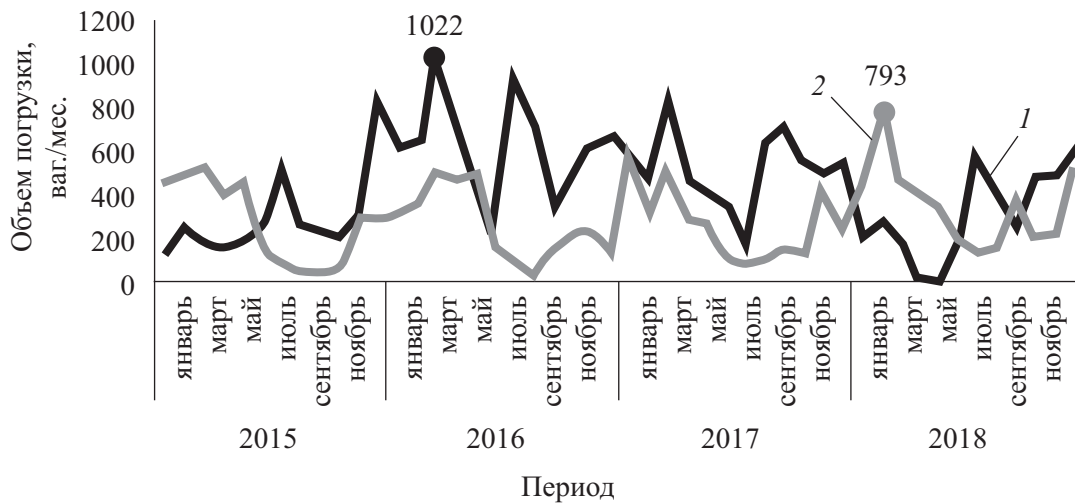


Рис. 4. Динамика объемов перевозки зерна (1) и минеральных удобрений (2) на Северо-Кавказской железной дороге в 2015–2018 гг.

неравномерности в эти периоды возникает дефицит вагонов-хопперов, а в период спада они вынужденно простаивают, что негативно сказывается на доходах логистического оператора.

Для оценки эффективности применения новой технологии перевозки зерна и минеральных удобрений в съемных кузовах необходимо рассмотреть и сравнить существующую логистику перевозки в вагонах-хопперах и ло-

гистику доставки в съемных кузовах, а также структуру и уровень логистических затрат. Для сравнения принимается съемный кузов конструкции НВЦ «Вагоны» (см. рис. 3).

Вагон-хopper для зерна и минеральных удобрений имеют одинаковую конструкцию кузова, поэтому могут быть использованы для перевозки и зерна, и минеральных удобрений. Однако для загрузки зерна после перевозки минеральных удобрений необходимо провести тщательную многоступенчатую очистку и промывку вагонов. Очистка вагонов производится на специальных промывочных станциях, которые могут находиться на значительном расстоянии от мест погрузки/выгрузки. Это приводит к возникновению дополнительных порожних пробегов вагонов от/до станции промывки.

Применительно к рассматриваемой задаче логистика доставки зерна и минеральных удобрений в вагонах-хopperах на выбранных направлениях приведена на рис. 5.

После окончания сезона перевозки удобрений между станциями Белореченская и Туапсе-Сортировочная вагоны-хopperы проходят

обработку на дезинфекционно-промывочной станции (ДПС) Георгиевск, после чего могут быть поданы на станцию Ипатово под погрузку зерновых грузов. Таким образом, дополнительный порожний пробег каждого вагона составит более 700 км. Часть невостребованного имеющегося в наличии вагонного парка должна находиться в отстое на одной из станций или на путях необщего пользования.

При технологии доставки в съемных кузовах по окончании сезона перевозки происходит смена кузовов для зерна на кузова для минеральных удобрений. Невостребованные кузова должны размещаться для временного межсезонного хранения на специальных площадках, которые могут располагаться на разных станциях. Обе площадки для хранения съемных кузовов могут находиться и на одной станции. Возможен вариант хранения обоих типов съемных кузовов на одной площадке большей вместимости.

Логистика доставки зерна и минеральных удобрений в съемных кузовах на выбранных направлениях приведена на рис. 6.

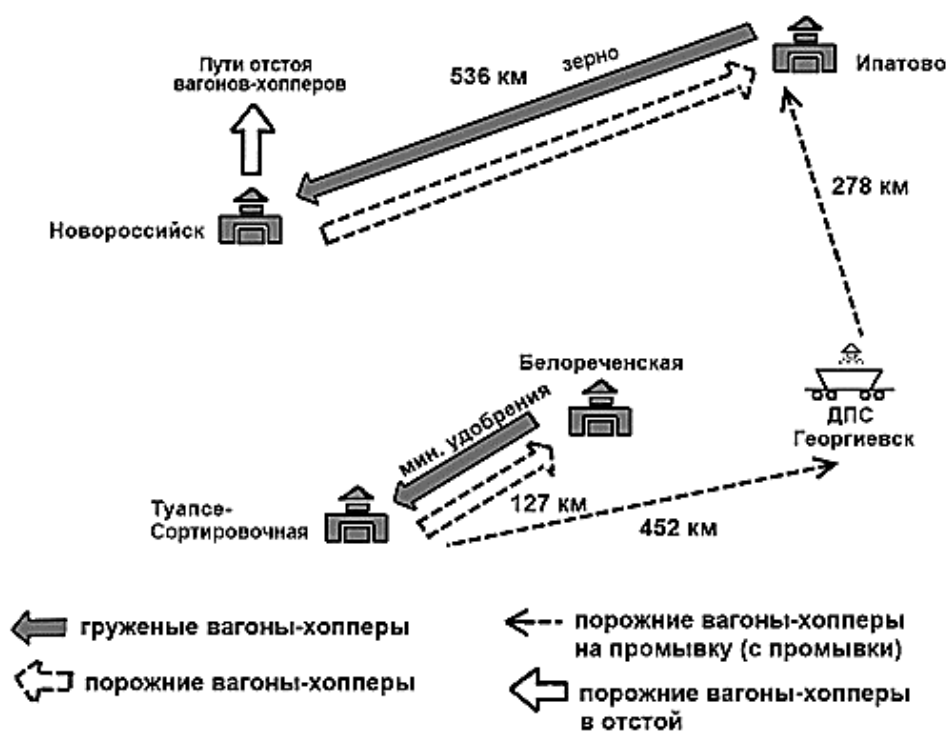


Рис. 5. Логистика доставки зерна и минеральных удобрений в вагонах-хopperах

Для хранения съёмных кузовов в данном случае предусмотрены две приспособленные для этого площадки. Условно принято, что площадка для хранения съёмных кузовов для зерна организована на станции Новороссийск, а для минеральных удобрений – на станции Туапсе-Сортировочная (принято исходя из минимального расстояния порожнего пробега платформ). Расстояние между Новороссийском и Белореченской составляет 445 км, что значительно больше, чем между Новороссийском и Туапсе).

Кроме организации места хранения, необходима погрузочно-разгрузочная техника, обеспечивающая снятие и установку съёмных кузовов на платформы, а также выполнение внутрискладских работ на площадках хранения. Для этой цели, например, может быть использован фронтальный погрузчик грузоподъемностью не менее 10 т (масса съёмного кузова в порожнем состоянии – 9,25 т). В связи с сезонностью выполнения работ целесообразно погрузчик арендовать.

После окончания сезона перевозки зерна порожние платформы, с которых сняты съём-

ные кузова для зерна, со станции Новороссийск следуют на станцию Туапсе-Сортировочная, где хранятся съёмные кузова для перевозки минеральных удобрений. После установки этих съёмных кузовов на платформы они следуют под погрузку минеральных удобрений на станцию Белореченская.

Количество платформ, необходимых для перевозки кузовов для зерна и минеральных удобрений, может значительно отличаться в связи с тем, что объемы перевозки зерна превосходят объемы перевозки минеральных удобрений (см. рис. 4). Следовательно, возникает необходимость отстоя невостребованных порожних платформ. Снижению логистических издержек данного процесса может способствовать организация использования порожних платформ для перевозки съёмных кузовов другого типа (для леса, наливных грузов) или крупнотоннажных контейнеров. Однако такое использование невостребованных порожних платформ должно строго контролироваться, так как может возникнуть проблема их своевременного возврата для обеспечения

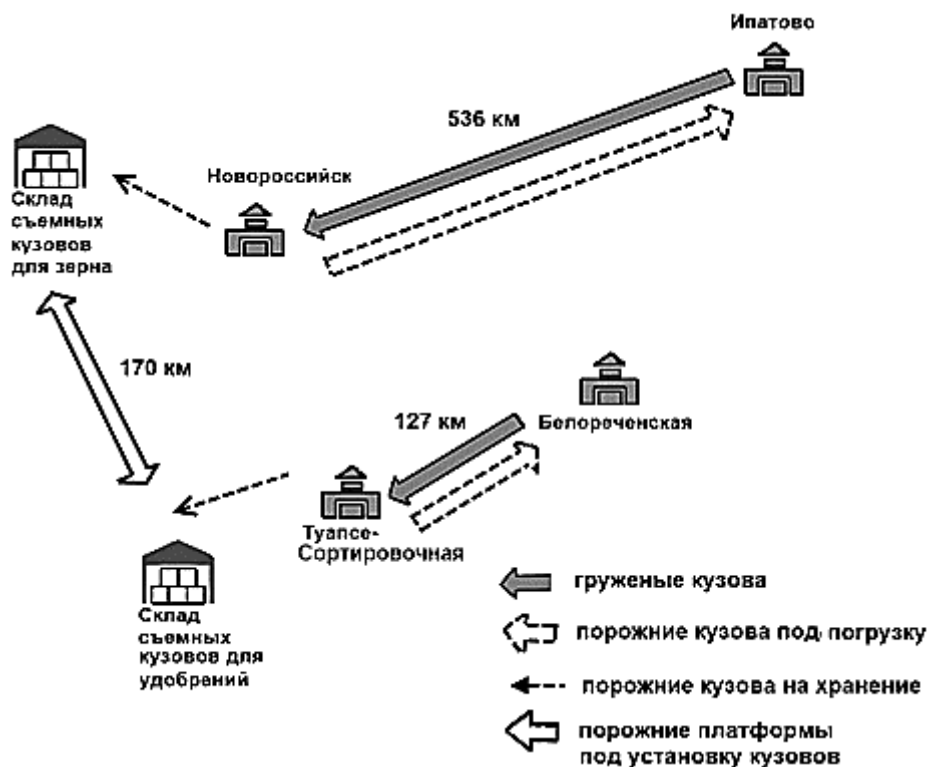


Рис. 6. Логистика доставки зерна и минеральных удобрений в съёмных кузовах

увеличенного объема перевозки зерна и минеральных удобрений.

В статье рассматривается возможность перевозки избыточного сезонного объема грузов зерна и минеральных удобрений дополнительным парком вагонов-хопперов или съемными кузовами на платформах. Актуальность этой проблемы обусловлена также дефицитом подвижного состава, связанного со списанием хопперов-зерновозов в связи с истечением срока службы. Сегодня таких вагонов в России насчитывается 40,8 тыс. ед. По информации РЖД дефицит вагонов-зерновозов в 2019 г. составит уже 1,2 тыс. штук, а в 2020 г. – 6,2 тыс. штук [8].

При осуществлении перехода на такую технологию возникают существенные материальные затраты на приобретение как самих кузовов, так и подвижного состава для их перевозки. Затраты на приобретение парка кузовов или вагонов-хопперов можно определить, исходя из того, что съемные кузова по сути являются кузовной частью вагона. По различным данным их стоимость составляет от 10 до 30%, т. е. исходя из того, что целиком вагон-хоппер стоит 3,5 млн руб., съемный кузов будет стоить около 1 млн руб., экипажная часть – платформа – примерно 2,5 млн руб.

Для установления эффективности совместного использования двух описанных технологий необходимо произвести расчет транспортных издержек в соответствии со структурой логистических затрат по каждой технологии. Структура таких затрат приведена в таблице.

Величина затрат может колебаться в значительных пределах. Так, дополнительные порожние пробеги как вагонов-хопперов, так и платформ обуславливаются удаленностью объектов друг относительно друга. Ставки арендной платы за использование погрузочно-разгрузочной техники и площадей для хранения порожних съемных кузовов могут быть неодинаковыми в различных регионах.

По рассмотренным способам доставки зерна и минеральных удобрений были произведены расчеты. Они показали, что ключевым фактором является тариф на перевозку в съемных кузовах. Ввиду отсутствия в настоящее время такого тарифа, в расчетах за основу принят существующий тариф на перевозку грузов в 45-футовых контейнерах. При этих условиях выявлено преимущество перевозки в съемных кузовах по сравнению с вагонами-хопперами.

Анализ расчетов показал, что капитальные затраты на приобретение вагонов-хопперов и

Структура логистических затрат для осуществления перевозки зерна и минеральных удобрений на Северо-Кавказской железной дороге

Наименование статьи затрат	Вагоны-хопперы	Съемные кузова
Промывка вагонов-хопперов после перевозки минеральных удобрений	+	–
Отстой вагонов-хопперов, не используемых при перевозке минеральных удобрений хопперов	+	–
Порожний пробег до/от станции промывки	+	–
Аренда средств механизации для перегрузки кузовов на/с зоны складирования (с учетом доставки до места работы)	–	+
Аренда места хранения съемных кузовов-зерновозов	–	+
Аренда места хранения съемных кузовов-минераловозов	–	+
Отстой не востребуемых платформ (экипажной части)	–	+
Тариф за перевозку груза, приведенный к тонне груза	+	+
Тариф за порожний пробег платформ (экипажной части)	–	+

платформ со съемными кузовами сопоставимы по величине.

На эффективность изучаемых способов доставки зерна и минеральных удобрений в вагонах-хопперах и съемных кузовах могут оказывать существенное влияние затраты на промывку вагонов-хопперов, аренда средств механизации и площадей для хранения временно неиспользуемых съемных кузовов.

Таким образом, невозможно однозначно определить, какая из рассматриваемых технологий доставки зерна и минеральных удобрений более эффективна на данном полигоне.

Решение такой задачи должно базироваться на разрабатываемой экономико-математической модели, отражающей особенности конкретного полигона доставки грузов с учетом объемов и дальности перевозки. В качестве критерия принятия решения по сравниваемым технологиям следует принять приведенные затраты на доставку 1 т груза (зерна, минеральных удобрений).

Дефицит подвижного состава (вагонов-хопперов) в периоды возрастания объемов перевозки грузов может быть частично восполнен за счет приобретения вагонов-хопперов, частично за счет перехода на технологию «съемный кузов». Таким образом, задача обеспечения перевозки дополнительного объема груза в пиковый сезон может быть многовариантной.

Для внедрения технологии «съемные кузова» потребуется:

- разработать правила перевозки грузов в съемных кузовах;
- разработать нормативную базу перевозки в съемных кузовах, включая технические условия размещения и крепления съемных кузовов на платформах, технологию перегрузки и хранения порожних съемных кузовов;
- создать инфраструктуру для хранения съемных кузовов с наличием соответствующего оборудования для производства погрузочно-разгрузочных работ и невысокой стоимостью платы за пользование ею [9, 10];
- разработать тариф на перевозку грузов в съемных кузовах и тариф за порожний пробег экипажной части (спецплатформ);

– рассмотреть возможность доработки конструкции платформы для перевозки съемных кузовов, сделав ее пригодной для перевозки крупнотоннажных контейнеров.

Как любая новая технология, применение съемных кузовов может привести к определенным рискам для операторских компаний, которые будут ее использовать. Одним из таких рисков является вывод на рынок большого числа вагонов-хопперов компаниями-конкурентами, что может снизить интерес к перевозке в съемных кузовах. Другим риском может быть спад производства груза, для перевозки которого приобретаются съемные кузова.

Таким образом, операторам подвижного состава для использования новой технологии необходимо детально проработать логистику доставки, определить востребованность в том или ином виде съемных кузовов, внимательно проанализировать и просчитать вероятность возникновения рисков.

Библиографический список

1. Бороненко Ю. П. Перспективы внедрения вагонов со съемными кузовами увеличенной грузоподъемности / Ю. П. Бороненко, А. С. Даукша // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. – СПб. : ПГУПС, 2017. – Т. 14, вып. 3. – С. 437–451.
2. Даукша А. С. Совершенствование вагонов на основе использования съемных кузовов : автореф. дис. ... канд. техн. наук, специальность : 05.22.07 / А. С. Даукша. – СПб. : ПГУПС, 2018. – 16 с.
3. Бороненко Ю. П. Преимущества и перспективы внедрения съемных кузовов вагонов / Ю. П. Бороненко, А. С. Даукша // Подвижной состав XXI века : идеи, требования, проекты : материалы XI Международ. науч.-технич. конференции. – СПб. : ПГУПС, 2016. – С. 12–14.
4. Бережной Н. А. Проблемы развития российского рынка железнодорожных контейнерных перевозок / Н. А. Бережной, Е. М. Волкова // Транспорт : проблемы, идеи, перспективы : сб. трудов LXXXVI Всерос. науч.-технич. конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – СПб. : ПГУПС, 2016. – С. 43–47.

5. Универсальное решение для спецсостава. – URL : <http://мояколея1520.рф/new/3091> (дата обращения : 08.07.2019 г.).
6. Бороненко Ю.П. Выбор конструктивных решений устройств крепления контейнеров и съемных кузовов на железнодорожных платформах / Ю.П. Бороненко, А.С. Даукша // Транспорт Российской Федерации. – 2017. – № 3 (70). – С. 29–32.
7. Бороненко Ю.П. Заявка на патент на вагон-платформу со съемными кузовами № 2016144496 от 14.11.2016 г. / Ю.П. Бороненко, А.С. Даукша. – URL : <http://www1.fips.ru> (дата обращения : 14.05.2019 г.).
8. Скорлыгина Н. Зерну не везет / Н. Скорлыгина // Газета «Коммерсант». – 2018. – № 54. – С. 1.
9. Коровяковский Е.К. Комплексный подход к организации взаимодействия в транспортных системах / Е.К. Коровяковский, И.В. Лобко, А.М. Си-
мушков // Железнодорожный транспорт. – 2012. – № 8. – С. 63–65.
10. Коровяковский Е.К. Логистика терминалов : перспективное направление логистики / Е.К. Коровяковский, О.Д. Покровская // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. – СПб. : ПГУПС, 2015. – Вып. № 3 (44). – С. 155–164.
- Дата поступления: 18.11.2019
Решение о публикации: 25.11.2019
- Контактная информация:**
БОЛОТИН Валерий Алексеевич – канд. техн. наук, профессор; spb-vab@yandex.ru
КРАВЧЕНКО Мария – магистрант; ma_97@bk.ru
ЯНКОВСКАЯ Наталья Григорьевна – канд. техн. наук, доцент; spbng@rambler.ru

Application of demountable car bodies for delivery of seasonal bulky loads

V. A. Bolotin¹, M. Kravchenko², N. G. Yankovskaya¹

¹ Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

² St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Kronverkskiy pr., 49, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

For citation: Bolotin V.A., Kravchenko M., Yankovskaya N.G. Application of demountable car bodies for delivery of seasonal bulky loads. *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2019, vol. 16, iss. 4, pp. 552–561. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2019-4-552-561

Summary

Objective: To justify application of demountable car bodies for delivery of grain crops and mineral fertilizers adjusted for seasonal variations of loading volume. **Methods:** Comparative analysis of statistical data on transportation of grain crops and mineral fertilizers by ZAO “Evrosib SPb-TS” as well as logistical costs for the delivery of freight at the North Caucasus Railway polygon was conducted. **Results:** Efficiency evaluation of using demountable car bodies in comparison with hoppers was carried out. Activities of process-related, regulatory and economic character necessary for organization of freight transportation in demountable car bodies were stated. **Practical importance:** The proposed approaches to building logistical chains for the delivery of bulky loads in demountable bodies adjusted for seasonal variations of loading volume will help consignors of goods and rolling stock operators in taking reasonable decisions when choosing transportation technology.

Keywords: Hopper, demountable body, freight logistics, application efficiency.

References

1. Boronenko Y.P. & Dauksha A. S. Perspektivy vnedreniya vagonov so syemnymi kuzovamy uvelichennoy gruzopodyemnosti [Prospects of introducing demountable car bodies with increased weight-bearing capacity]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg State Transport University]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2017, vol. 14, iss. 3, pp. 437–451. (In Russian)
2. Dauksha A. S. *Sovershenstvovaniye vagonov na osnove ispolzovaniya syemnykh kuzovov* [Car improvement based on the use of demountable bodies]. Extended abstract of Cand. Sci. (Eng.) dissertation, speciality: 05.22.07. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2018, 16 p. (In Russian)
3. Boronenko Y.P. & Dauksha A. S. Preimushchestva i perspektivy vnedreniya syemnykh kuzovov vagonov [Advantages and implementation prospects of demountable car bodies implementing]. *Podvizhnoy sostav XXI veka: idei, trebovaniya, proekty*. Materialy XI Mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii [The 21st century rolling stock: ideas, requirements, projects. Proceedings of the 11th International research and training conference]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2016, pp. 12–14. (In Russian)
4. Berezhnoy N.A. & Volkova E. M. Problemy razvitiya rossiyskogo rynka zheleznodorozhnykh konteynernykh perevozok [The Russian market of railway container service: development problems]. *Transport: problem, idei, perspektivy*. Sbornik trudov LXXVI Vserossiyskoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchennykh [Transport: problems, ideas, prospects. Collection of research studies of the 76th All-Russian research and training conference of students, postgraduates and young scholars]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2016, pp. 43–47. (In Russian)
5. *Universalnoye resheniye dlya spetsostava* [Universal solution for special-purpose rolling stock]. Available at: <http://moyakoleya1520.rf/new/3091> (accessed: 08.07.2019). (In Russian)
6. Boronenko Y.P. & Dauksha A. S. Vyborkonstruktivnykh resheniy ustroystv krepleniya konteynerov i syemnykh kuzovov na zheleznodorozhnykh platformakh [Structural choice of lading anchors and demountable bodies at railway platforms]. *Transport Rossiyskoy Federatsii* [Transport of the Russian Federation], 2017, no. 3, pp. 29–32. (In Russian)
7. Boronenko Y.P. & Dauksha A. S. *Zayavka na patent na vagon-platformu so syemnymi kuzovamy no. 2016144496 ot 14.11.2016 g.* [Patent application for flat car with demountable bodies N 2016144496 dated November 14th, 2016]. Available at: <http://www.fips.ru> (accessed: 14.05.2019). (In Russian)
8. Skorlygina N. Zernu ne vezet [Grain is short of luck]. *Gazeta “Kommersant”* [“Kommersant” newspaper], 2018, no. 54, p. 1. (In Russian)
9. Korovyakovskiy E. K., Lobko I. V. & Simushkov A. M. Kompleksniy podkhod k organizatsii vzaimodeystviya v transportnykh sistemakh [Integrated approach to cooperation arrangements in transport systems]. *Zheleznodorozhniy transport* [Railway transport], 2012, no. 8, pp. 63–65. (In Russian)
10. Korovyakovskiy E. K. & Pokrovskaya O. D. Logistika terminalov: perspektivnoye napravleniye logistiki [Logistics of terminals: promising direction of logistics]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg State Transport University]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2015, iss. 3, pp. 155–164. (In Russian)

Received: November 18, 2019

Accepted: November 25, 2019

Author's information:

Valeriy A. BOLOTIN – PhD in Engineering, Professor; spb-vab@yandex.ru

Maria KRAVCHENKO – Master; ma_97@bk.ru

Natalia G. YANKOVSKAYA – PhD in Engineering, Associate Professor; spbng@rambler.ru

Исследование напряженного состояния в контакте «колесо–рельс» при наличии выщербины

И. В. Федоров¹, А. А. Воробьев¹, И. К. Самаркина¹,
О. А. Конограй¹, Т. Г. Бунькова²

¹ Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

² Омский государственный университет путей сообщения, Российская Федерация, 644046, Омск, пр. Маркса, 35

Для цитирования: Федоров И. В., Воробьев А. А., Самаркина И. К., Конограй О. А., Бунькова Т. Г. Исследование напряженного состояния в контакте «колесо–рельс» при наличии выщербины // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2019. – Т. 16, вып. 4. – С. 562–572. DOI: 10.20295/1815-588X-2019-4-562-572

Аннотация

Цель: Исследование напряженного состояния в контакте «колесо–рельс» при отсутствии и наличии выщербины для определения ее влияния на напряженное состояние колеса при разной толщине обода. **Методы:** Применяются метод теории упругости, методы численного решения дифференциальных уравнений в частных производных (метод конечных элементов). **Результаты:** Определено напряженное состояние в контакте «колесо–рельс» при разной толщине обода с выщербиной и без нее. На основе проведенных исследований разработаны предложения по изменению норм браковки колес с тонким ободом при наличии на поверхности катания выщербины. **Практическая значимость:** Изменение норм браковки колес с тонким ободом при наличии на поверхности катания выщербины позволит увеличить ресурс колес и тем самым снизить потребность в новых колесах.

Ключевые слова: Колесо, колесная пара, поверхность катания, толщина обода, выщербина, контакт «колесо–рельс», контактное взаимодействие, метод конечных элементов, конечно-элементная модель.

Введение

На поверхности катания железнодорожных колес часто появляются такие дефекты как выщербины (рис. 1), которые являются дефектом контактно-усталостного происхождения [1, 2]. В отличие от износа колес вследствие истирания, происходящего на поверхности и сопровождающегося образованием мелких пылевидных частиц износа, выщербина возникает из-за развития усталостной трещины на глубине 4–6 мм под поверхностью катания, которая распространяется в направлении по-

верхности катания и способствует отколу значительной части металла [3, 4]. В этой точке действуют максимальные эквивалентные напряжения, отвечающие за накопление усталостных повреждений в структуре материала и приводящие к развитию усталостной трещины, которая вызывает откол части металла с поверхности катания колеса, что и образует выщербину. Максимальные давления реализуются на поверхности, но максимальные эквивалентные напряжения действуют под ней. Кроме выщербин усталостного происхождения могут возникать выщербины по светлым



Рис. 1. Выщербины на поверхности катания колеса

пятнам, ползунам и наварам и по термическим трещинам [5]. Выщербины усталостного характера можно отличить по крайне неровной (ступенчатой) поверхности.

При эксплуатации грузовых вагонов допускаются выщербины длиной до 50 мм и глубиной до 10 мм, а пассажирских вагонов – длиной до 25 мм и глубиной до 10 мм. Выщербины глубиной до 1 мм не бракуются при любой их длине [6].

Выщербина может стать причиной браковки колеса при тонком ободе. Допускаемая в эксплуатации толщина обода колеса составляет 22 мм. Ее измерение должно производиться на выщербине. Поэтому если в эксплуатации обнаруживается колесо с толщиной обода 26 мм и на нем наблюдается выщербина глубиной более 4 мм, то такое колесо не может далее эксплуатироваться, вагон отцепляется в текущий ремонт для замены колесной пары, которая направляется в капитальный ремонт для замены колеса.

Наличие выщербины приводит к изменению геометрических параметров контакта «колесо–рельс» вследствие появления на поверхности катания «П-образной» выработки. Поэтому актуальной становится задача изучения влияния выщербины на напряженное

состояние в системе «колесо–рельс» при различной толщине обода колеса.

Определение напряженного состояния в системе «колесо–рельс»

Для исследования напряженного состояния в системе «колесо–рельс» в отсутствие выщербины можно воспользоваться теорией Герца [7, 8], которая дает сравнительно несложные аналитические зависимости, при наличии выщербины это затруднительно и поэтому будем определять напряжения путем численного решения с помощью метода конечных элементов. В силу симметрии задачи будем рассматривать только $\frac{1}{4}$ часть колесной пары, что позволит упростить решение задачи за счет использования меньшего числа конечных элементов. Для расчета была создана объемная модель $\frac{1}{4}$ колесной пары и участка рельса (рис. 2).

Были созданы следующие модели колеса: 1) с номинальной толщиной обода без выщербины; 2) с номинальной толщиной обода с выщербинной; 3) с ободом толщиной обода 22 мм без выщербины; 4) с ободом толщиной 22 мм с выщербинной.

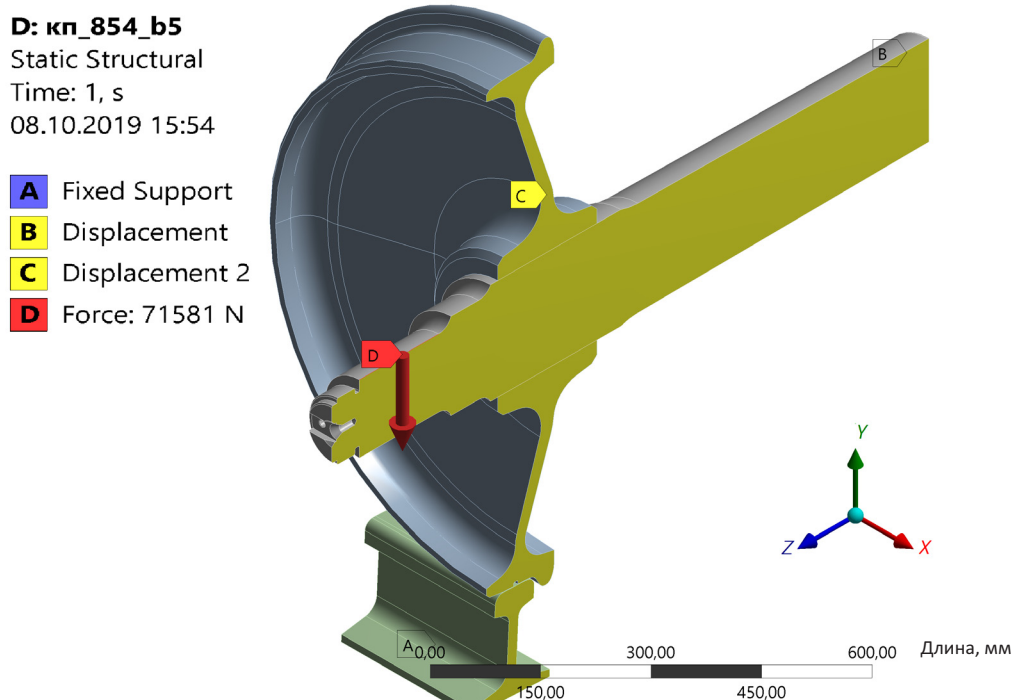


Рис. 2. Модель $\frac{1}{4}$ колесной пары и участка рельса

В модели использовалось колесо с плоским коническим диском. При создании модели размеры колеса принимались в соответствии с [9], рельса – с [10], глубина выщербины – 6 мм. Моделировался контакт колеса с рельсом Р65 (радиус головки рельса 500 мм).

Колесная пара нагружалась вертикальной силой, прикладываемой к центрам шеек. Величина нагрузки на одну шейку принималась, согласно [11], как $0,621P_0$ (P_0 – осевая нагрузка, принимаемая при расчете 23,5 тс). Так как рассматривается $\frac{1}{4}$ часть колесной пары, к модели прикладывалась половина от рассчитанной величины нагрузки. Рельс жестко закреплялся по подошве, в месте стыковки колесной пары с отсеченными частями задавались условия симметрии. Между поверхностью катания колеса и головкой рельса описывалось контактное взаимодействие, ось жестко соединялась со ступицей колеса.

При расчете применялась линейная изотропная модель материала. Модуль упругости принимался равным $2,1 \cdot 10^{11}$ Па, коэффициент Пуассона – 0,3.

Конечно-элементная модель создавалась с использованием элементов типа 10-узлового тетраэдра (сетка конечных элементов показана на рис. 3).

Форма данных изопараметрических конечных элементов квадратичная, что позволяет хорошо описывать высокоградиентное напряженное состояние [12], которое имеет место в зоне контакта «колесо–рельс». В ней в соответствии с рекомендациями [13] размер конечных элементов принимался равным 3 мм. Сетка конечных элементов в зоне контакта приведена на рис. 4. Расчет производился с использованием пакета прикладных программ ANSYSWORKBENCH версия 18.2. В результате были получены напряжения и контактные давления в системе «колесо–рельс» для четырех вышеописанных моделей колеса. Для оценки прочности, согласно рекомендациям [11], по теории Мизеса определялись эквивалентные напряжения.

Для колеса без выщербины с номинальной толщиной обода распределение эквивалентных напряжений показано на рис. 5, контакт-

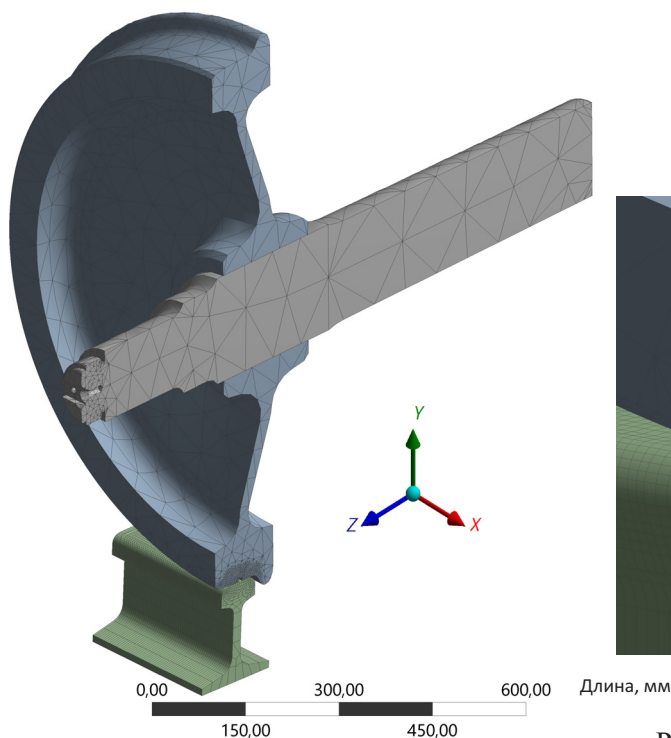


Рис. 3. Сетка конечных элементов

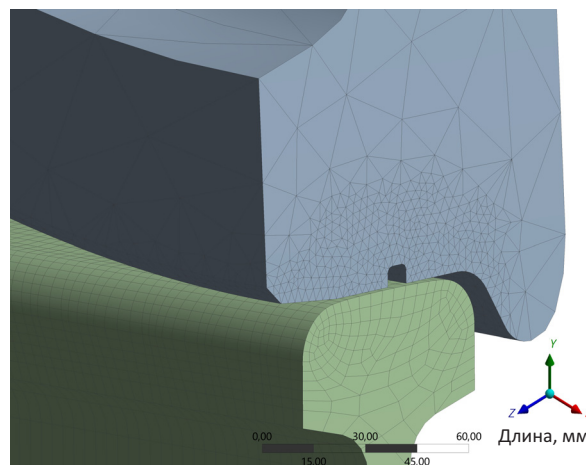


Рис. 4. Сетка конечных элементов в зоне контакта колеса и рельса

ных давлений – на рис. 6, для колеса с номинальной толщиной обода и выщербиной – на рис. 7, 8, для колеса с минимальной толщиной обода без выщербины – на рис. 9, 10, с выщербиной – на рис. 11, 12. Величины напряжений и давлений на рис. 5–12 приведены в мегапаскалях.

На рис. 5–12 видно, что у колес без выщербины наибольшие эквивалентные напряжения возникают на глубине 4–5 мм под поверхностью катания, при этом максимальное эквивалентное напряжение составляет 0,71 от максимального контактного давления, у колес с выщербиной в «П-образной» выемке, образованной выщербиной на глубине 4–5 мм от поверхности катания, максимальное эквивалентное напряжение составляет 1,71 от максимального контактного давления.

При уменьшении толщины обода у колеса с выщербиной максимальные контактные давления возрастают с 1346 до 1617 МПа, при том, что максимальные эквивалентные напряжения практически не увеличиваются (при номинальной толщине обода 1754 МПа, при толщине

обода 22 мм – 1762 МПа). Результаты расчетов приведены в таблице.

Таким образом, эквивалентные напряжения у колеса с выщербиной при номинальной и минимальной толщинах обода практически одинаковы, что говорит о необоснованной браковке колес с тонким ободом, имеющих выщербины на поверхности катания величиной до 6 мм.

Браковка таких колес приводит к существенному сокращению их ресурса. Так, если колесо имеет толщину обода 26 мм и толщину гребня 29 мм и на поверхности катания присутствует выщербина глубиной 5 мм, то по существующим требованиям такое колесо бракуется. Так как толщина обода, измеренная в месте выщербины, составит 21 мм, остаточный ресурс такого колеса по износу гребня, исходя из минимальной толщины гребня 24 мм (1 мм толщины гребня, 10–12 тыс. км пробега [1, 14]), достигает 50–60 тыс. км пробега. Исходя из общего ресурса колеса 400–500 тыс. км пробега [1], общий ресурс колеса сокращается на 10–12,5%.

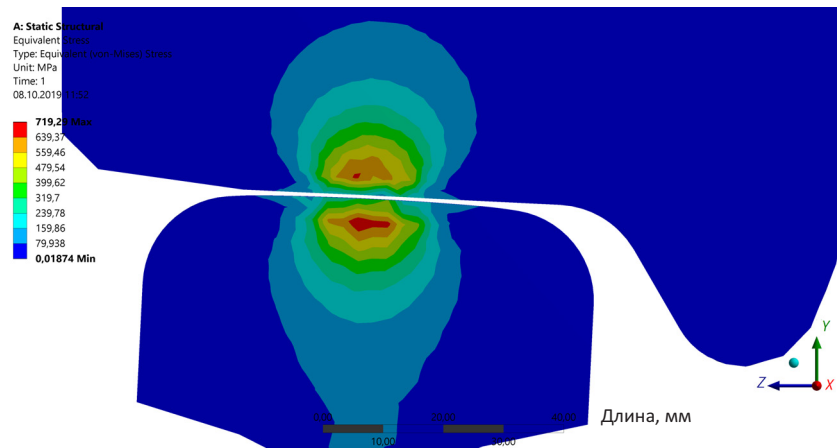


Рис. 5. Распределение эквивалентных напряжений в системе «колесо–рельс»
(номинальная толщина обода без выщербины)

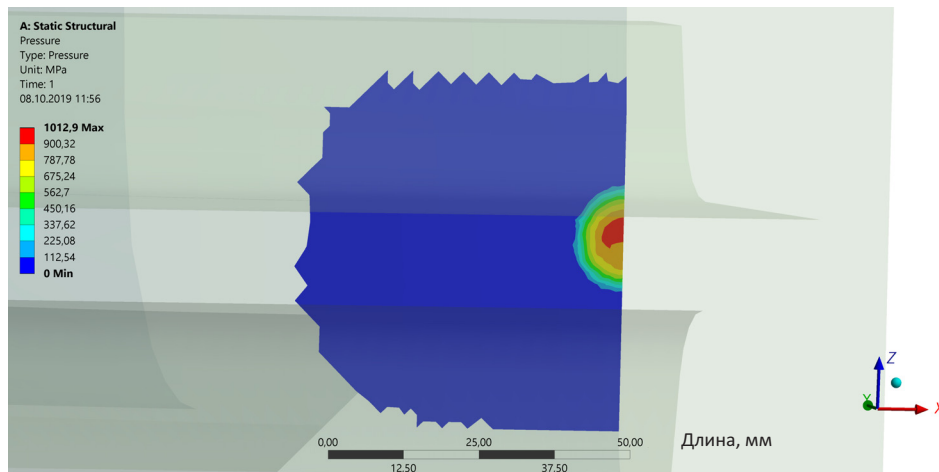


Рис. 6. Распределение контактных давлений в системе «колесо–рельс»
(номинальная толщина обода без выщербины)

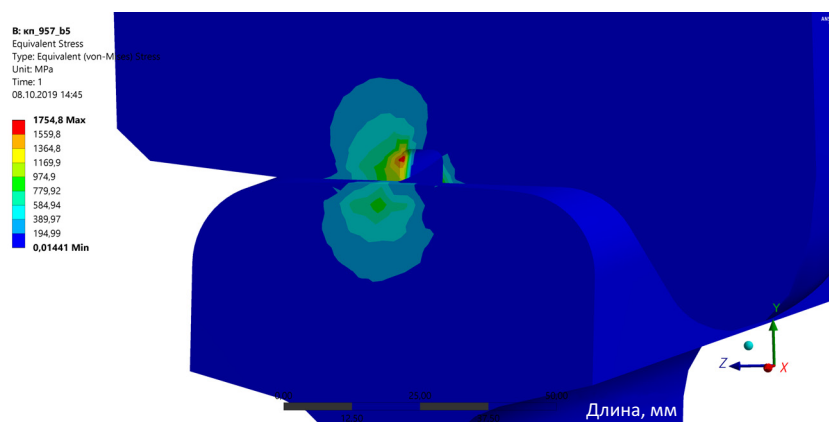


Рис. 7. Распределение эквивалентных напряжений в системе «колесо–рельс»
(номинальная толщина обода с выщербиной)

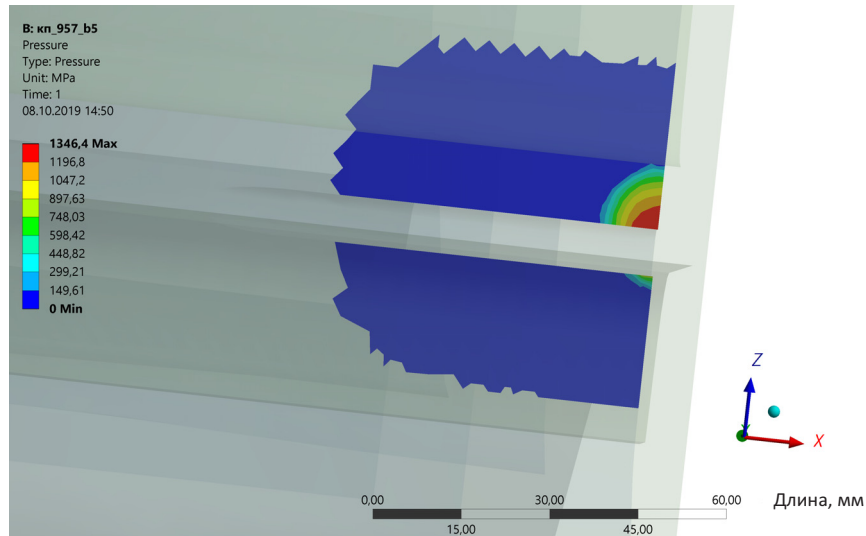


Рис. 8. Распределение контактных давлений в системе «колесо–рельс» (номинальная толщина обода с выщербиной)

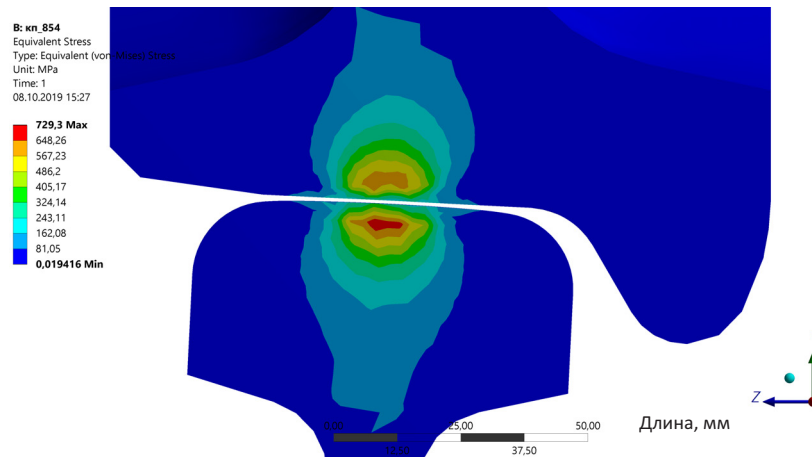


Рис. 9. Распределение эквивалентных напряжений в системе «колесо–рельс» (толщина обода 22 мм без выщербины)

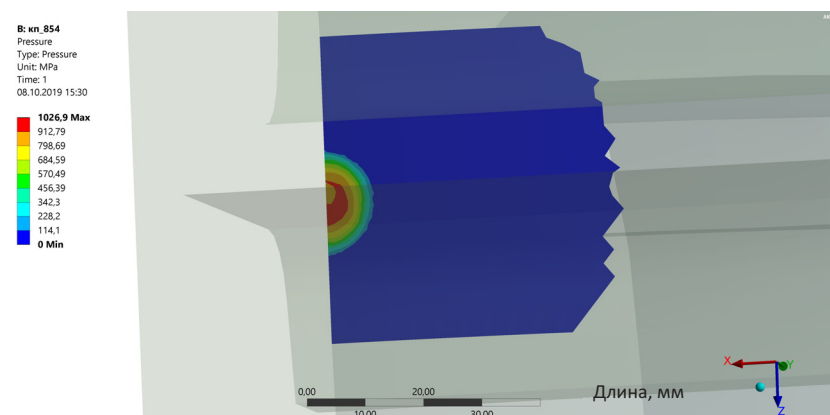


Рис. 10. Распределение контактных давлений в системе «колесо–рельс» (толщина обода 22 мм без выщербины)

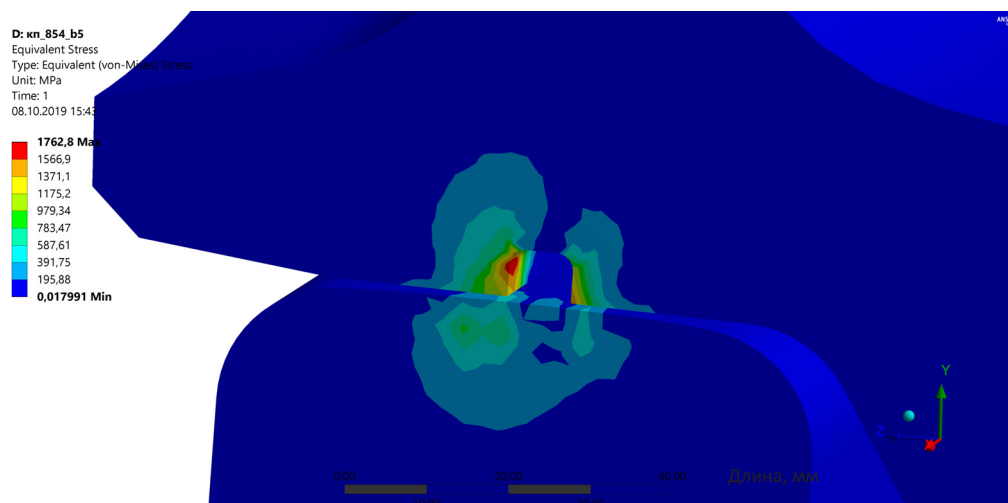


Рис. 11. Распределение эквивалентных напряжений в системе «колесо–рельс» (толщина обода 22 мм с выщербиной)

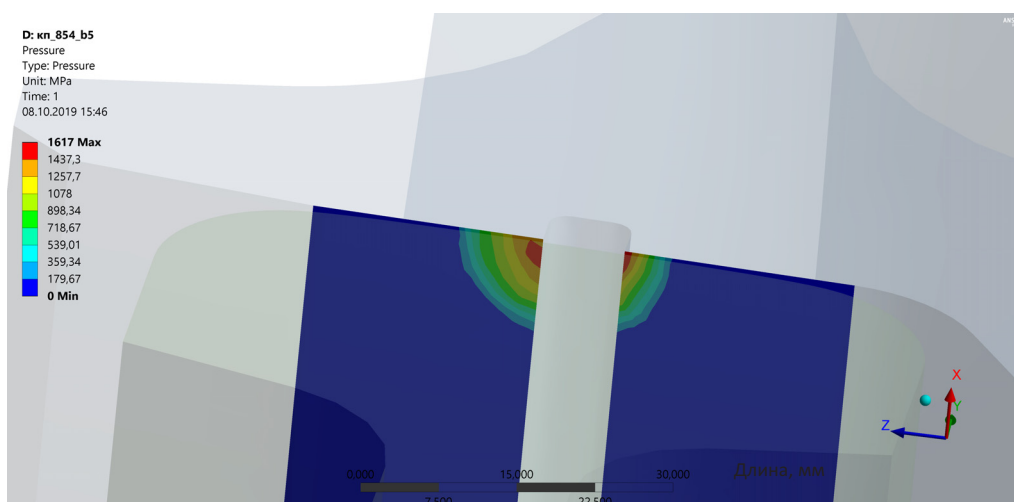


Рис. 12. Распределение контактных давлений в системе «колесо–рельс» (толщина обода 22 мм с выщербиной)

Максимальное эквивалентное напряжение и максимальное контактное давление

Параметр	Номинальная толщина обода, мм		Толщина обода 22 мм	
	без выщербины	с выщербиной	без выщербины	с выщербиной
Максимальное эквивалентное напряжение, МПа	719	1754	726	1762
Максимальное контактное давление, МПа	1012	1346	1026	1617

С учетом наблюдающегося в настоящее время дефицита колес целесообразно допускать на колесах с минимальной толщиной обода выщербины до 6 мм даже при снижении толщины обода в месте выщербины менее 22 мм. Эквивалентные напряжения в месте выщербины здесь будут практически такие же, как у нового колеса с выщербиной.

Заключение

В результате проведенного исследования:

1) были определены напряжения и контактные давления для колес с номинальной и минимальной толщиной обода при наличии и отсутствии выщербины;

2) установлено, что у колеса с выщербиной глубиной 6 мм с уменьшением толщины обода величина эквивалентных напряжений в месте выщербины практически не изменяется (1754 МПа при номинальной толщине обода и 1762 МПа при минимальной);

3) сформулировано предложение по повышению ресурса колес, которое заключается в том, что у колес с минимальной толщиной обода можно допускать выщербины на поверхности катания до 6 мм, при этом минимальная толщина обода в месте выщербины должна быть не менее 16 мм.

Библиографический список

1. Орлова А. М. Библиографические исследования вопросов интенсивности износа и механизмов образования усталостного выкрашивания рабочей поверхности обода в зависимости от типа подвижного состава, осевой нагрузки, рельефа и профиля пути (прямые, кривые, подъемы и уклоны), скоростей движения и пробега. Постановка задач для расчетных и экспериментальных исследований для профиля ГОСТ 10791 : отчет по теме 80, ч. 1 / А. М. Орлова, А. А. Воробьев. – СПб. : ПГУПС, 2014. – 165 с.

2. Воробьев А. А. Испытания колесных сталеи на износ и контактную усталость / А. А. Воробьев,

Д. Е. Керенцев, И. В. Федоров // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. – СПб. : ПГУПС, 2017. – Т. 14, вып. 4. – С. 628–630.

3. Воробьев А. А. Методика расчета размера контактно-усталостных повреждений железнодорожного колеса по результатам, полученным на модельных роликах / А. А. Воробьев, А. Н. Иванов, С. В. Урушев, О. А. Конограй, И. В. Федоров // Бюл. результатов науч. исследований. – 2018. – Вып. 1. – С. 18–24.

4. Руководящий документ по ремонту и техническому обслуживанию колесных пар с буксовыми узлами грузовых вагонов магистральных железных дорог колеи 1520 (1524) мм. РД ВНИИЖТ 27.05.01–2017. – М. : ВНИИЖТ, 2018. – 242 с.

5. Инструкция по техническому обслуживанию вагонов в эксплуатации. – Утв. Советом по железнодорожному транспорту государств-участников Содружества. Протокол от 21–22 мая 2009 г. № 50. – М. : Транспорт, 2010. – 92 с.

6. Биргер И. А. Расчет на прочность деталей машин : справочник. – Изд. 3-е, перераб. и доп. / И. А. Биргер, Б. Ф. Шорр, Г. Б. Иосилевич. – М. : Машиностроение, 1979. – 702 с.

7. Сакало В. И. Контактные задачи железнодорожного транспорта / В. И. Сакало, В. С. Коссов. – М. : Машиностроение, 2004. – 496 с.

8. ГОСТ 10791–2011. Колеса цельнокатанные. Технические условия. – М. : Стандартинформ, 2012. – 53 с.

9. ГОСТ Р 51685–2013. Рельсы железнодорожные. Общие технические условия. – М. : Стандартинформ, 2014. – 101 с.

10. Нормы расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных) с изменениями и дополнениями. – М. : ГосНИИВ–ВНИИЖТ, 1996. – 318 с.

11. Трушин С. И. Метод конечных элементов. Теория и задачи : учеб. пособие / С. И. Трушин. – М. : AGB, 2008. – 256 с.

12. ГОСТ 33783–2016. Колесные пары железнодорожного подвижного состава. Методы определения показателей прочности. – М. : Стандартинформ, 2016. – 68 с.

13. Орлова А. М. Определение методами математического моделирования движения грузового и пассажирского вагона : размера пятна контакта

колеса и рельса, давления в пятне контакта (напряжения под поверхностью колеса), сил крипа, мощностей сил крипа, с учетом осевой нагрузки, скорости движения, износа профиля колеса (для профиля ГОСТ 10791) в паре с рельсами Р65 : отчет по теме 80, ч. 3 / А. М. Орлова, А. А. Воробьев. – СПб. : ПГУПС, 2014. – 75 с.

14. Орлова А. М. Разработка расчетной методики оценки ресурса колес. Оценка ресурса колес ОАО «ВМЗ» с учетом результатов испытаний образцов в зависимости от свойств материала, конструкционной скорости, осевой нагрузки, варианта репрезентативного маршрута и параметров промежуточных технологических обточек с целью восстановления профиля колеса. Сравнение результатов расчета ресурса колес с фактическими данными в условиях

эксплуатации : отчет по теме 80, ч. 7 / А. М. Орлова, А. А. Воробьев. – СПб. : ПГУПС, 2017. – 23 с.

Дата поступления: 13.11.2019

Решение о публикации: 19.11.2019

Контактная информация:

ФЕДОРОВ Игорь Владимирович – преподаватель; Fedorov281973@yandex.ru

ВОРОБЬЕВ Александр Алфеевич – д-р техн. наук, доцент; 89219751198@yandex.ru

САМАРКИНА Ирина Константиновна – канд. техн. наук, доцент; irina_samarkina@inbox.ru

КОНОГРАЙ Ольга Анатольевна – преподаватель; konograispbp@mail.ru

БУНЬКОВА Тамара Геннадьевна – преподаватель; bunkovatg@mail.ru

The study of stress condition in “wheel-rail” contact in case of jaggging

I. V. Fedorov¹, A. A. Vorobyev¹, I. K. Samarkina¹,
O. A. Konogray¹, T. G. Bunkova²

¹ Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

² Omsk State Transport University, 35, Marks pr., Omsk, 644046, Russian Federation

For citation: Fedorov I. V., Vorobyev A. A., Samarkina I. K., Konogray O. A., Bunkova T. G. The study of stress condition in “wheel-rail” contact in case of jaggging. *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2019, vol. 16, iss. 4, pp. 562–572. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2019-4-562-572

Summary

Objective: To study stress condition in “wheel-rail” contact with or without jaggging in order to determine its influence on stress condition of the wheel in case of different thickness of the wheel tread. **Methods:** Elasticity theory methods, as well as computational methods for partial differential equations (finite element method) were applied in the study. **Results:** Stress condition in “wheel-rail” contact in case of different wheel tread thickness, with or without jaggging was determined. Proposals on alteration of rejection norms on wheels with thin tread, in case of shelled tread on the rolling surface were developed on the basis of research results. **Practical importance:** Alteration of rejection norms on wheels with thin tread, in case of shelled tread on the rolling surface, will make it possible to increase durability of wheels and thus reduce the demand for new wheels.

Keywords: Wheel, wheel pair, tread area, wheel tread thickness, shelled tread, “wheel-rail” contact, contact interaction, finite element method, finite-element model.

References

1. Orlova A.M. & Vorobyev A.A. *Bibliograficheskiye issledovaniya voprosov intensivnosti iznosa i mekhanizmov obrazovaniya ustalostnogo vykrashivaniya rabochey poverkhnosty oboda v zavisimosti ot tipa podvizhnogo sostava, oseyoy nagruzky, relief i profilya puty (pryamiye, kriviye, podyemy i uklony), skorostey vdizheniya i probega. Postanovka zadach dlya raschetnykh i eksperimentalnykh issledovaniy dlya profilya. GOST 10791 [Bibliographic research of wear rate and fatigue flaking mechanisms of the effective area of the wheel tread depending on the type of the rolling stock, axial load, track relief and profile (straight, curved, gradient), speed and run. Task setting for calculation and experimental studies. GOST 10791]. Topical report 80, pt 1. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2014, 165 p. (In Russian)*
2. Vorobyev A. A., Kerentsev D. E. & Fedorov I. V. Ispytaniya kolesnykh staley na iznos i kontaktnuyu ustalost [Wear and contact fatigue tests of wheel steel]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya [Proceedings of Petersburg State Transport University].* Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2017, vol. 14, iss. 4, pp. 628–630. (In Russian)
3. Vorobyev A. A., Ivanov A. N., Urushev S. V., Konograi O. A. & Fedorov I. V. Metodika rascheta razmera kontaktno-ustalostnykh povrezhdeniy zheleznodorozhnogo kolesa po rezultatam, poluchennym na modelnykh rolikakh [Calculation procedure for contact-fatigue damage of the rail wheel by the results obtained from model rollers]. *Byulleten rezultatov nauchnykh issledovaniy [Bulletin of research results]*, 2018, iss. 1, pp. 18–24. (In Russian)
4. *Rukovodyashchiy dokument po remontu i tekhnicheskomu obsluzhivaniyu kolesnykh par s buksovymy uzlamy gruzovykh vagonov magistralnykh zheleznnykh dorog kolei 1520 (1524) mm. RD VNIIZHT [Regulation document on repair and maintenance of wheel set with axle equipment of freight cars for 1520 (1524) mm gauge mainline railroad. Regulation Document of All-Russian Scientific Research Institute of Railway Transport 27.05.01–2017].* Moscow, VNIIZHT [All-Russian Scientific Research Institute of Railway Transport] Publ., 2018, 242 p. (In Russian)
5. *Instruktsiya po tekhnicheskomu obsluzhivaniyu vagonov v ekspluatatsii [Service instruction for cars in service].* Approved by the State-members of the Commonwealth Council on Railway Transport. Protocol dated May, 21st–22nd 2009, no. 50. Moscow, Transport Publ., 2010, 92 p. (In Russian)
6. Birger I. A., Shorr B. F. & Iosilevich G. B. *Raschet na prochnost detaley mashin [Stress analysis of machine elements].* Reference guide. 3rd edition, enlarged and revised. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1979, 702 p. (In Russian)
7. Sakalo V. I. & Kossov V. S. Kontaktnye zadachy zheleznodorozhnogo transporta [Contact problems of railway transport]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 2004, 496 p. (In Russian)
8. *GOST 10791–2011. Kolesa tselnokatniye. Tekhnicheskkiye usloviya [GOST 10791–2011. Solid-rolled wheels. Technical specifications].* Moscow, Standartinform Publ., 2012, 53 p. (In Russian)
9. *GOST R 51685–2013. Relsy zheleznodorozhniye. Obshchiye tekhnicheskkiye usloviya [GOST R 51685–2013. Rails. General technical specifications].* Moscow, Standartinform Publ., 2014, 101 p. (In Russian)
10. *Normy rascheta i proektirovaniya vagonov zheleznnykh dorog MPS kolei 1520 mm (nesamokhodnykh) s izmeneniyami i dopolneniyami [Calculation and design norms for (unpowered) cars of 1520 mm gauge railways of the Ministry of Railways with amendments].* Moscow, GosNIIV–VNIIZHT [State Research and Development Institute for Car Building – All-Russian Scientific Research Institute of Railway Transport] Publ., 1996, 318 p. (In Russian)
11. Trushin S. I. *Metod konechnykh elementov. Teoriya i zadachy [Finite element method. Theory and tasks].* Teaching aid. Moscow, AGB Publ., 2008, 256 p. (In Russian)
12. *GOST 33783–2016. Kolesniye pary zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava. Metody opredeleniya pokazateley prochnosti [GOST 33783–2016. Wheel set for the railway rolling stock. Test methods for stability factors].* Moscow, Standartinform Publ., 2016, 68 p. (In Russian)
13. Orlova A.M. & Vorobyev A.A. *Opredeleniye metodamy matematicheskogo modelirovaniya dvizheniya gruzovogo i passazhirskogo vagona: razmera pyatna kontakta kolesa i relsa, davleniya v pyatne kontakta (napryazheniya pod poverkhnostyu kolesa), sil kripa,*

moshchnostey sil kripa, s uchetom oseyoy nagruzky, skorosty dvizheniya, iznosa profilya koleasa (dlya profilya GOST 10791) v pare s relsamy R65 [Mathematical simulation of motion of freight and passenger cars: the wheel-rail contact area size, pressure inside contact area (pressure below wheel surface), creep forces, creep power with allowance for axle load, travel speed, wheel profile wear (for GOST 10791 profile) with R65 rails]. Topical report 80, pt 3. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2014, 75 p. (In Russian)

14. Orlova A. M. & Vorobyev A. A. *Razrabotka raschetnoy metodiky otsenky resursa koleasa OAO "VMZ" s uchetom rezultatov ispytaniy obraztsov v zavisimosti ot svoystv materiala, konstruktsionnoy skorosty, oseyoy nagruzky, varianta reprezentativnogo marshruta i parametrov promezhutochnykh tekhnologicheskikh obtochek s tselyu vosstanovleniya profilya koleasa. Sravneniye rezultatov rascheta resursa koleasa s fakticheskimi dannymi v usloviyakh ekspluatatsii [The development of computational evaluation method for durability of wheels. Durability estimation of OAO "VMZ" wheels with allowance for test results*

of samples depending on properties of materials, construction speed, axle load, representative route variant and parameters of temporary machining in order to restore the wheel profile. Comparison of calculation data on durability of wheels with actual test data under operating conditions]. Topical report 80, pt 7. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2017, 23 p. (In Russian)

Received: November 13, 2019

Accepted: November 19, 2019

Author's information:

Igor VI. FEDOROV – Lecturer; Fedorov281973@yandex.ru

Alexander A. VOROBYEV – D. Sci. in Engineering, Associate Professor; 89219751198@yandex.ru

Irina K. SAMARKINA – PhD in Engineering, Associate Professor; irina_samarkina@inbox.ru

Olga A. KONOGRAI – Senior Lecturer; konograi.spbp@mail.ru

Tamara G. BUNKOVA – Lecturer; bunkovatg@mail.ru

УДК 621.313.17

Преимущества применения устройств транспортирования и нагрева жидких рабочих сред в различных отраслях промышленности

К. К. Ким¹, С. Н. Иванов², М. И. Хисматулин¹

¹ Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

² Комсомольский-на-Амуре государственный университет, Российская Федерация, 681013, Дальневосточный федеральный округ, Хабаровский край, Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27

Для цитирования: Ким К. К., Иванов С. Н., Хисматулин М. И. Преимущества применения устройств транспортирования и нагрева жидких рабочих сред в различных отраслях промышленности // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2019. – Т. 16, вып. 4. – С. 573–583. DOI: 10.20295/1815-588X-2019-4-573-583

Аннотация

Цель: Доказать эффективность применения электротехнических перекачивающих устройств на основе теплогенерирующих электромеханических преобразователей энергии (ТЭМП) как альтернативных регулируемых источников тепловой мощности применительно к существующим системам транспортировки нефтепродуктов, электронагрева для отопления и горячего водоснабжения. **Методы:** В качестве основных математических средств применялись методы математического анализа, вычислительной математики, математического аппарата теории нечетких множеств, теории вейвлетов, дискретной математики, математического программирования. Использовались пакеты ELCUT, FEMLAB, Comsol Multiphysics, NASTRAN, Matlab и MathCAD, с целью автоматизации процесса проектирования аппаратного обеспечения пакет MAX+PLUS II 10.1 BASELINE, для измерений – пакет PowerGraph 2.1. **Результаты:** Доказано, что внедрение ТЭМП наиболее перспективно для перекачки нефтепродуктов, а также для электроотопления и горячего водоснабжения автономных объектов, удаленных от централизованных тепловых сетей. Показано, что замена ТЭМП вместо традиционного оборудования будет способствовать выполнению технико-экономических и экологических требований энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2030 г. **Практическая значимость:** Замена традиционного оборудования, используемого для нагрева и перекачки жидких сред, ТЭМП в разнообразных отраслях промышленности приводит к заметному уменьшению его количества, что позволяет снизить установленную мощность такого оборудования, а это, в свою очередь, улучшает технико-эксплуатационные показатели рассмотренных систем.

Ключевые слова: Теплогенерирующие электромеханические преобразователи энергии, насосные установки, давление, температура, циркуляция, технологический цикл переработки, теплопотребление.

Приоритетность направлений «Энергетическое сбережение и энергетически сберегающие технологии» и «Создание энергосберегающих систем передачи, равномерного распространения и расходования тепла и электроэнергии» диктует необходимость разработки

специального энергетического оборудования, ориентированного на производство и передачу тепловой энергии, обеспечивающего, помимо экономичности, безошибочного и бесперебойного поддержания установленных эксплуатационных показателей, требуемый уровень

электробезопасности, стабильность и эффективность работы.

Одной из основных целей модернизации и дальнейшего развития промышленных комплексных отраслей Российской Федерации в свете ресурсо- и энергосбережения является уменьшение издержек энергии на всех этапах изготовления различной продукции. Повышение эффективности работы производственных мощностей и снижение итоговой отпусковой

цены готовой продукции связано с внедрением новаторских технических устройств, к числу которых можно отнести электротехнические перекачивающие устройства на основе теплогенерирующих электромеханических преобразователей энергии (ТЭМП) [1–11].

Целесообразность эксплуатации ТЭМП обосновывается сопоставлением систем нагрева, структура которых показана на рис. 1, из которого видно, что ТЭМП обладают ком-



Рис. 1. Классификация преобразователей, генерирующих тепловую энергию

бинированием в одном устройстве функций приводящего, передающего и исполнительного механизмов, позволяя ощутимо улучшить его технические и экономические показатели. Кроме этого, электротехнические перекачивающие устройства на основе ТЭМП обладают возможностью самого точного регулирования мощности электронагрева непосредственно в месте потребления от нескольких ватт до сотен киловатт, экологической чистотой, безопасностью, относительно небольшими капитальными затратами, отсутствием необходимости в использовании протяженных тепломагистралей (а следовательно, незначительными теплопотерями), мобильностью и т. д.

ТЭМП, представляющие собой логическое развитие электронагревательных устройств трансформаторного типа [3], в плане рентабельности отличаются от последних увеличенными коэффициентом теплоотдачи и теплопроизводительностью. Рассмотрим их конструкцию и принцип действия (рис. 2).

Устройство состоит из наружного кожуха 1, который отделен от магнитопровода с укладываемой в нем сетевой обмоткой 2 зазором 3 и двух короткозамкнутых вторичных обмоток, выполненных из специального электропроводящего материала, неподвижной 4 и вращающейся 5 обмоток. Последняя имеет форму по-

лого цилиндра, во внутренней полости которого жестко закреплены напорные лопасти 6. Толщина зубцов b_z сетевой обмотки 2 определяется по формуле

$$b_z = \frac{t \cdot B_\delta}{k_c \cdot B_z},$$

где t – деление зубцов, согласно внутреннему диаметру статора, м; B_δ – величина магнитной индукции, приходящейся на воздушный зазор, Тл; B_z – величина магнитной индукции в расчетном сечении зубца (1,9–2,2 Тл); k_c – коэффициент заполнения сталью сердечника статора, принимаемый равным 0,95–0,97.

Конструкция статора предусматривает выполнение в нем осевых каналов произвольной формы 7 (показанные на рис. 2 каналы 7 в поперечном сечении представлены в форме окружности).

Нагреваемая рабочая среда подается через входной патрубок 8 и циркулирует внутри неподвижной обмотки 4 по осевым каналам 7 и в дальнейшем по зазору 3 отводится через выходной патрубок 9 за пределы ТЭМП.

Вторичная вращающаяся обмотка и магнитопровод разделены специальным элементом из самосмазывающегося неэлектропроводящего материала 10, выполняющего функцию

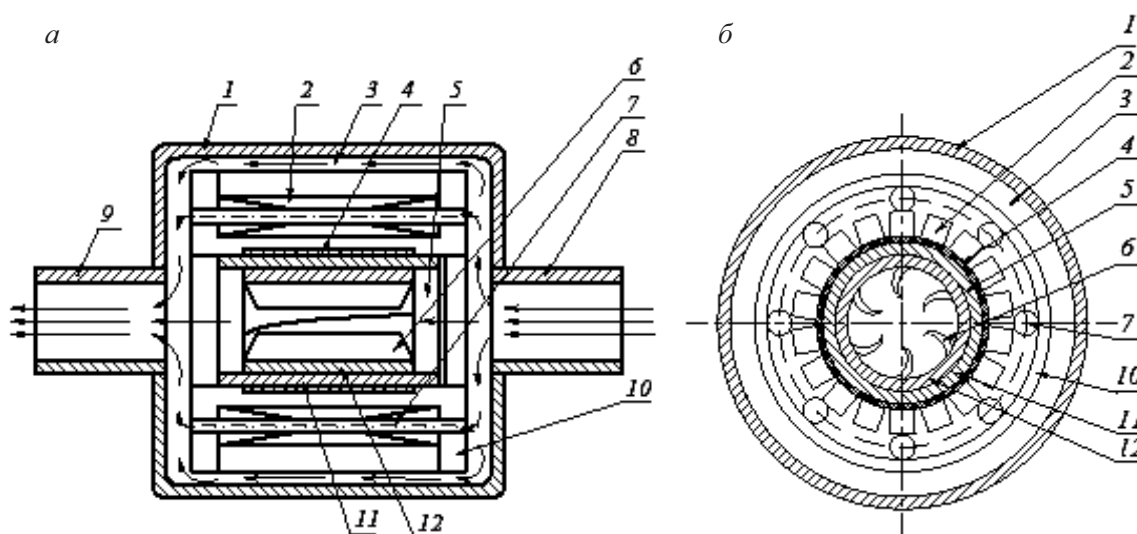


Рис. 2. Преобразователь электромеханический для нагрева и перемещения жидкой среды: а – в продольном сечении; б – в поперечном сечении

подшипника скольжения и предусматривающего беспрепятственно вращение подвижной обмотки 5 и препятствующего ее осевому перемещению относительно магнитопровода. Вращающаяся обмотка 5 сконструирована в виде двух коаксиальных цилиндров 11 и 12, которые неподвижны друг относительно друга, помимо этого внешний цилиндр 11 изготовлен из электропроводящего немагнитного материала, а внутренний 12 – из ферромагнитного. На внутренней поверхности цилиндра 12 закреплены лопасти 6. Толщина внутреннего ферромагнитного цилиндра 12 подбирается таким образом, чтобы она была равна расчетной ширине зубца статора b_z , длина же составляет 30–70% размера продольной длины цилиндра 11.

Количество теплоты, выделяющейся на вторичной обмотке, и производительность ТЭМП (т.е. количество нагреваемой и/или перемещаемой жидкости в единицу времени, $\text{м}^3/\text{с}$) зависят от вторичного тока и скорости вращения обмотки.

Использование специального элемента из самосмазывающегося неэлектропроводящего материала 10 с теплоизолирующими свойствами, выполняющего функции радиального и/или упорного подшипника скольжения, обеспечивает малые потери на трение.

Изучение предпочтительности использования систем, в основе которых лежат комбинированные устройства, совмещающие в себе функции перекачивания и нагрева, целесообразно начать с анализа возможных областей их применения, к которым в первую очередь

можно отнести различные виды производств, а также технологические процессы, касающиеся транспортировки вязких жидкостей. К таким объектам могут быть отнесены и изучены предприятия нефтедобывающего и перерабатывающего комплексов, магистральные системы транспортировки нефтепродуктов, устройства для подогрева и подачи топлива, автономные системы электроотопления (авиационный, автомобильный, морской и речной транспорт и др.).

Первым рассмотрим нефтеперерабатывающее производство, представляющим собой сложную техническую структуру, насыщенную энергетическим оборудованием, что видно из рис. 3, где показана блок-схема нефтеперерабатывающего завода [1]. Предварительный анализ доказывает, что используется целый комплекс устройств, влияющих не только на качество выпускаемой продукции, но и определяющих затраты на ее производство.

Например, сейчас для нагревания нефти широко применяются теплообменники, трубчатые печи, паровые подогреватели и термосифоны, для охлаждения – конденсаторы-холодильники, холодильники. В процессе разделения нефти и других сложных смесей участвуют ректификационные колонны, абсорберы, отстойники. Кроме того, в технологический цикл входят такие специальные устройства как реакторы, кристаллизаторы, фильтры, центрифуги, насосы и т.д.

Из перечисленного оборудования одним из самых энергоемких являются насосные установки. Приведем их характеристики:

Марка насоса.....	НК 12/40	ТКА 32/80	ТКА 63/80	ТКА 32/125	ТКА 63/125	ТКА 120/80	ТКА 210/80	НКВ 360/80	НКВ 360/125
Мощность электродвигателя, кВт.....	5,5	5,5–22	7,5–30	7,5–37	11–45	11–45	15–75	22–132	37–250
Марка насоса.....	НКВ 360/200	НКВ 360/320	НКВ 600/125	НКВ 600/200	НКВ 600/320	НКВ 1000/200	НКВ 1000/320	НК 210/200	НК 200/370
Мощность электродвигателя, кВт.....	75–400	110–500	75–315	90–500	160–800	160–800	250–1250	37–200	55–400

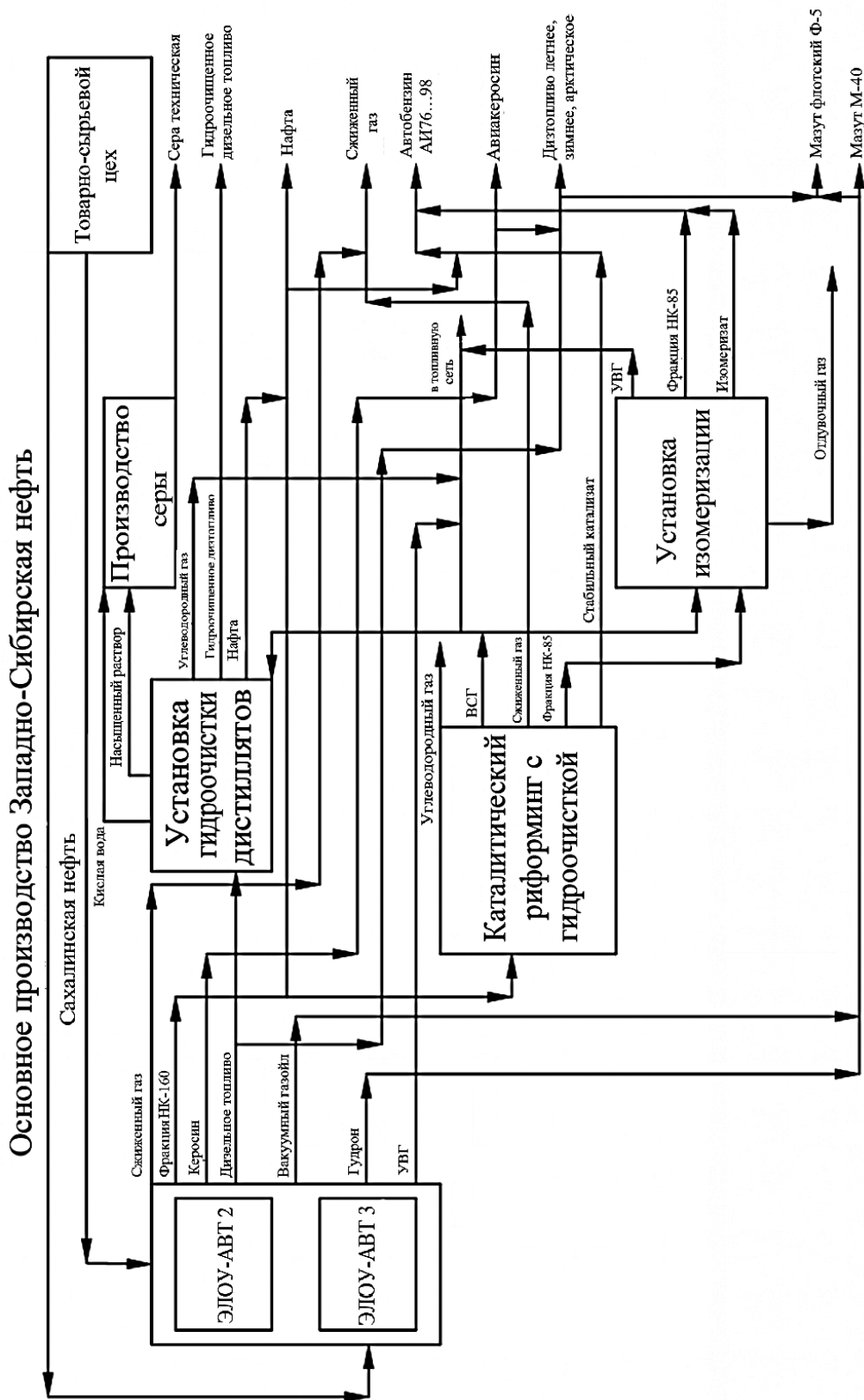


Рис. 3. Блок-схема нефтеперерабатывающего завода

Конструкция насосных установок включает в себя центробежный насос, соединенный муфтой с электродвигателем. Центробежный насос работает в весьма напряженном режиме, что приводит к необходимости постоянного высококвалифицированного обслуживания, часто связанного с длительным удалением оборудования из производственного процесса для ремонта. Анализ вышеприведенных характеристик насосных установок показывает, что единичная мощность применяемых приводных электродвигателей находится в диапазоне 5,5–1250 кВт и, следовательно, определяет мощность и стоимость всей установки.

К немаловажным вопросам при выборе номинальной мощности насосных агрегатов относится изначальное качество первичного сырья – транспортируемой сырой нефти. Лабораторные исследования показывают, что химический состав, например содержание хлористых солей, плотность и другие физико-химические параметры могут меняться в зависимости от места добычи или времени года.

Известно, что к основным условиям при перегонке нефти относятся давление и температура исходного материала и его последующих фракций. Технологический процесс пере-

работки начинается с принудительной подачи сырой нефти в нефтяной резервуар. Затем в специальных теплообменниках она нагревается до температуры порядка 100–120 °С (рис. 4) и поступает на основную установку для дальнейшей переработки.

Полное давление существенно влияет на ход обессеривания топлива. С ростом давления в технологических процессах при остальных одинаковых условиях увеличивается парциальное давление водорода, ускоряющее реакцию гидрирования, и сокращается коксование на катализаторе. Парциальное давление водорода служит важным параметром для поддержания требуемого уровня обессеривания, денитрогенизации и деароматизации сырья. При слишком низком парциальном давлении качество продукта может быть некондиционным, а активность катализаторов может снизиться. В этом случае чистоту водорода следует повышать путем увеличения продувки и подачи подпиточного водорода. Если его подача ограничена, требуется понижать производительность для компенсации недостаточного парциального давления водорода.

Установка гидроочистки дистиллятов рассчитана на парциальное давление водорода

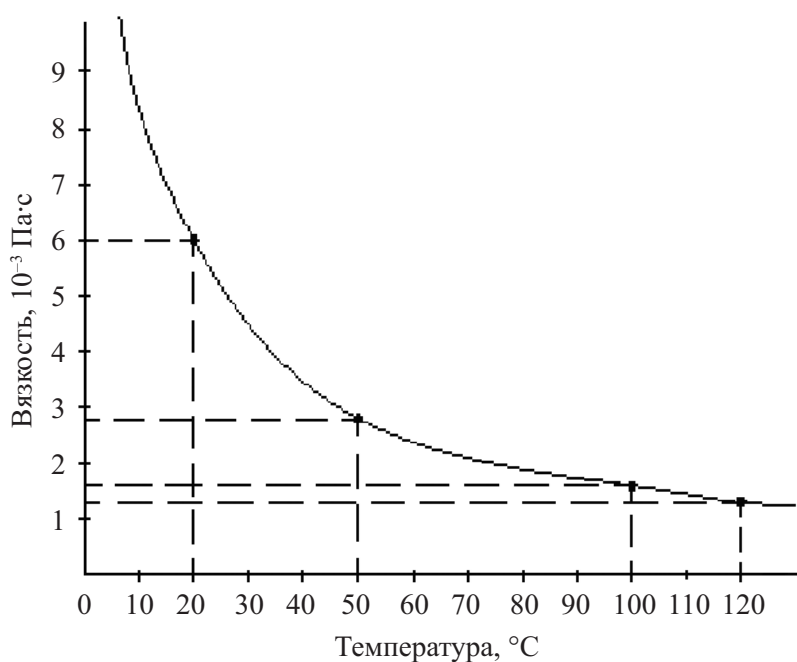


Рис. 4. Зависимость вязкости сырой нефти от ее температуры

на выходе из реактора 1-й ступени в 4,4 МПа (44 кгс/см²) и 6,1 МПа (61 кгс/см²) на выходе из реакторов 2-й и 3-й ступеней.

Увеличение парциального давления водорода приводит к удлинению рабочего цикла и улучшению качества продукта. Экспериментально было определено, что влияние парциального давления водорода на скорость реакции в реакторе 1-й ступени пропорционально в степени 1, в реакторах 2-й ступени – 1,5.

Температура, необходимая для достижения заданного уровня обессеривания, денитрогенизации и деароматизации, в свою очередь, будет зависеть от часовой объемной скорости, парциального давления водорода и кратности циркуляции для заданного состояния активности катализатора (т. е. от состояния в начале цикла (НЦ) до состояния в его конце (КЦ)).

До определенных значений степень обессеривания возрастает с повышением температуры пропорционально росту температуры. При превышении максимально допустимой температуры скорость реакций разложения становится выше по сравнению со скоростью реакции гидрирования сернистых соединений, поэтому уменьшается избирательность действия катализатора по отношению к сере, замедляется рост степени обессеривания, увеличивается выход газа, легких продуктов и кокса.

Для инициирования реакций обессеривания и денитрогенизации при активности катализатора, соответствующей НЦ, требуется температура на входе в реактор не ниже 300 °С, для инициирования реакций деароматизации – не ниже 180 °С.

Для блока гидроочистки дистиллятов в зависимости от этапа работы и режима («зима-лето», НЦ–КЦ) температура на входе в реактор 1-й ступени лежит в диапазоне 342–353 °С, в реакторах 2-й ступени – 219–250 °С, в реакторах 3-й ступени – 306–322 °С.

Технологический цикл переработки не замыкается в рамках предприятия и включает процессы транспортировки как сырых углеводородов, так и готовой продукции с использованием системы магистральных нефтепроводов, железнодорожного, морского и автомо-

бильного транспорта. Это еще одна область для потенциального применения ТЭМП, охватывающая магистральные, промысловые и распределительные нефтепроводы, по которым транспортируется около 95 % добываемой нефти и общая протяженность которых в России составляет около 1 млн км.

В существующих технологических системах требуемые уровни давления и температуры обеспечиваются отдельными устройствами, что усложняет и удорожает процесс производства. Использование ТЭМП решает не только эту проблему, но и одновременно обеспечивает снижение уровня загрязнения атмосферного воздуха вредными выбросами и затрат по охране окружающей среды. При этом количество используемого оборудования меньше, а это, в свою очередь, приводит к увеличению надежности всего рабочего комплекса и понижает эксплуатационные затраты за счет отсутствия необходимости привлечения высококвалифицированного персонала.

К основным параметрам магистрального нефтепровода относятся: производительность, диаметр, протяженность, число нефтеперекачивающих станций, рабочее давление на них и гидравлические потери в трубопроводе. Последний параметр существенно зависит от температуры окружающей среды и в ряде случаев определяет принципиальную возможность перекачивания углеводородного сырья. Похожие проблемы возникают и при перевозке нефтепродуктов в железнодорожных цистернах.

Действительно, транспортировка загустевших нефтепродуктов (масла, мазуты, парафинистые нефти, крекинг-остатки и др.) в холодное время года связана со значительными затруднениями. В этот период без предварительного разогрева их слив практически неосуществим, масса же остатков в затвердевшем состоянии в некоторых случаях достигает значения, близкого к нескольким тоннам, особенно при использовании и эксплуатации железнодорожных цистерн.

В настоящее время данная проблема усложняется, так как значительное количество неф-

тедобывающих и нефтеперерабатывающих предприятий расположено непосредственно в северных районах России, а также в Сибири. В этих районах продолжительность зимы составляет в среднем 6–8 месяцев, дальность расположения превышает 1000 км, продолжительность перевозок колеблется от 7,5 до 14 суток, при объеме перевозок до 15 млн т в год. Время слива в холодное время года зачастую выходит за пределы, установленные нормативами (примерно 8–10 ч). В условиях площадок, где энергетические ресурсы ограничены, полный слив периодически не обеспечивается.

Опыт железнодорожных перевозок жидкостей, имеющих различный коэффициент вязкости, в вагонах-цистернах с объемом котлов 50 и 60 м³ без специальных тепловых изоляций стенок свидетельствует, что нагрев продукта на местах пунктов слива, экономически наиболее оправдывает себя, чем изготовление и эксплуатация в большом количестве специальных вагонов-термосов. В данном случае процесс разогрева ассоциируется с продолжительной, ресурсоемкой, энергозатратной и материально затратной операцией, которая в числе прочих показателей определяет сравнительно небольшой оборот цистерн. Именно по этим причинам ТЭМП можно представить как альтернативные регулируемые источники тепловой мощности применительно к существующим системам транспортировки нефтепродуктов.

Отмеченные обстоятельства позволяют определить и еще одну область, для которой внедрение ТЭМП может улучшить качество использования энергоресурсов – применение их для автономных объектов, т. е. удаленных от централизованных тепловых сетей. Данное мероприятие может стать одним из важнейших шагов, ориентированных на устранение проблем, возникающих при производстве, преобразовании, передаче и дальнейшем использовании тепловой энергии, способствующих выполнению технико-экономических и экологических требований энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2030 г.

К большему применению электронагрева для отопления и горячего водоснабжения приводит многотарифная система оплаты за электроэнергию. Например, для Сибирского и Дальневосточного регионов, в которых длительность отопительного периода превышает 220 суток в год, имеется значительное время, когда объем теплоснабжения, приходящийся на горячее водоснабжение и отопление, не требует номинальной нагрузки крупных теплоэлектроцентралей, что значительно снижает их эффективность [2].

Наиболее существенными достоинствами ТЭМП являются: минимальные потери энергии в процессе ее преобразования и доставки потребителю за счет практически полного ее использования для нагрева и перемещения; высокая надежность и безопасность работы, отсутствие наружных вращающихся частей; возможность экономичного регулирования.

В заключение отметим, что при замене ТЭМП вместо традиционного оборудования в разнообразных отраслях промышленности количество последнего заметно уменьшается, что дает возможность снизить установленную мощность используемого оборудования, а это, в свою очередь, приведет к улучшению технико-эксплуатационных показателей рассмотренных систем.

Библиографический список

1. Елшин А. И. Экономическая целесообразность электроотопления // Междунар. симпозиум «Образование, наука и производство : проблемы, достижения и перспективы» : Материалы Междунар. науч.-технич. конференции «Электротехнические системы и комплексы». Комсомольск-на-Амуре, 21–22 октября 2010 г. : в 5 т. / А. И. Елшин и др. ; Редкол. : А. М. Шпилев (отв. ред.) и др. – Комсомольск-на-Амуре : ГОУВПО «КнАГТУ», 2010. – Т. 3. – С. 190–196.
2. Кузьмин В. М. Электронагревательные устройства трансформаторного типа / В. М. Кузьмин. – Владивосток : Дальнаука, 2001. – 143 с.

3. Новый подход к моделированию полей. – URL : <http://www.elcut.ru> (дата обращения : 17.10.2019 г.).
4. Сипайлов Г. А. Тепловые, гидравлические и аэродинамические расчеты в электрических машинах / Г. А. Сипайлов, Д. И. Санников, В. А. Жадан. – М. : Высшая школа, 1989. – 239 с.
5. Басов К. А. ANSYS справочник пользователя / К. А. Басов. – М. : ДМК Пресс, 2005. – 640 с.
6. Ким К. К. Разработка композитных покрытий для специальных электротехнических устройств / К. К. Ким, С. Н. Иванов // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2019. – № 9. – С. 77–84.
7. Васильев П. Ю. Определение параметров технических средств контроля силовых полупроводниковых приборов путем математического моделирования теплофизических процессов, возникающих при воздействии импульсов тока / П. Ю. Васильев, В. В. Никитин // Материалы Всерос. науч.-технич. конференции «Ресурсосберегающие технологии на железнодорожном транспорте» : в 4 т. Красноярск, 19–21 мая 2005 г. – Красноярск, 2005. – Т. I. – С. 539–543.
8. Байко А. В. Автономные электроэнергетические системы с синхронными генераторами и водородными источниками электроэнергии / А. В. Байко, В. В. Никитин, Е. Г. Серeda // Электротехника. – 2015. – № 8. – С. 47–53.
9. Никитин В. В. Безредукторный тяговый привод городского рельсового транспорта / В. В. Никитин, Я. Ю. Пармас, В. М. Пивоваров, Р. Р. Саттаров // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. – СПб. : ПГУПС, 2013. – Вып 1. – С. 31–38.
10. Baiko A. V. Hydrogen energy sources with current inverters in ship AC power plants / A. V. Baiko, V. V. Nikitin, E. G. Sereda // Russian Electrical Engineering. – 2017. – Vol. 88, iss. 6. – P. 355–360.
11. Никитин В. В. Вагоны-электростанции с комбинированными энергоустановками / В. В. Никитин, А. Н. Марикин, А. В. Третьяков // Электротехника. – 2016. – № 5. – С. 25–31.

Дата поступления: 27.11.2019

Решение о публикации: 02.12.2019

Контактная информация:

КИМ Константин Константинович – д-р техн. наук, профессор; kimkk@inbox.ru
ИВАНОВ Сергей Николаевич – д-р техн. наук, профессор; snivanov57@mail.ru
ХИСМАТУЛИН Марат Ильдусович – аспирант; lokomotivlar@gmail.com

Advantages of application of devices for transportation and heating of working liquids in various industries

K. K. Kim¹, S. N. Ivanov², M. I. Khismatulin¹

¹ Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

² Komsomolsk-na-Amure State University, 27, pr. Lenina, Komsomolsk-na-Amure, Khabarovsk Territory, 681013, Russian Federation

For citation: Kim K. K., Ivanov S. N., Khismatulin M. I. Advantages of application of devices for transportation and heating of working liquids in various industries. *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2019, vol. 16, iss. 4, pp. 573–583. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2019-4-573-583

Summary

Objective: To prove efficiency of electrotechnical pumping devices on the basis of heat-producing electromechanical energy converters as alternative controlled sources of thermal capacity as applied to existing oil product transfer systems, electric warming for heating and hot-water supply. **Methods:** As

main mathematical instruments, methods of mathematical analysis, computational mathematics, mathematical apparatus of fuzzy-set theory, wavelet theory, discrete mathematics and mathematical programming were deployed. ELCUT, FEMLAB, Comsol Multiphysics, NASTRAN, Matlab and MathCAD software packages were used. MAX+PLUS II 10.1 BASELINE was deployed for hardware design automation. PowerGraph 2.1 package was used for measurements. **Results:** It was proven that introducing heat-producing electromechanical energy converters is most promising for transit of oil products, as well as for electric heating and hot-water supply of standalone objects remote from central heating networks. It is shown that replacing traditional equipment with heat-producing electromechanical energy converters would contribute to fulfillment of technical, economic and environmental requirements of the energy strategy of the Russian Federation for the period through to 2030. **Practical importance:** Replacing traditional equipment used for heating and pumping fluids by heat-producing electromechanical energy converters in various industrial results in significant reduction of the quantity of equipment, which allows reducing the installed capacity and thus improve the technical operation parameters of systems under consideration.

Keywords: Heat-producing electromechanical energy converters, pumping facilities, pressure, temperature, circulation, processing technological cycle, heat consumption.

References

1. Elshin A. I. et al. Ekonomicheskaya tselesobraznost' elektrootopleniia [Economic efficiency of electric heating]. *Mezhdunarodnyi simpozium "Obrazovanie, nauka i proizvodstvo: problemy, dostizheniia i perspektivy". Materialy Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii "Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы"* [International symposium "Education, science and industry: problems, achievements and prospects". Proceedings of International research and engineering conference "Electrical engineering systems and networks"]. Komsomolsk-na-Amure, Oct. 21–22, 2010. Five vols. Ed. by A. M. Shpilev (main editor) et al. Komsomolsk-na-Amure, KnAGTU [Komsomolsk-na-Amure State University] Publ., 2010, vol. 3, pp. 190–196. (In Russian)
2. Kuz'min V. M. *Elektronagrevatel'nye ustroistva transformatornogo tipa* [Transformer-type electric heaters]. Vladivostok, Dal'nauka Publ., 2001, 143 p. (In Russian)
3. *Novyi podkhod k modelirovaniu polei* [New approach to field simulation]. Available at: <http://www.elcut.ru> (accessed: 17.10.2019). (In Russian)
4. Sipailov G. A., Sannikov D. I. & Zhadan V. A. *Teplovye, gidravlicheskie i aerodinamicheskie raschetы v elektricheskikh mashinakh* [Thermal, hydraulic and aerodynamic calculations in electrical machines]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1989, 239 p. (In Russian)
5. Basov K. A. *ANSYS spravochnik pol'zovatel'ia* [ANSYS user manual]. Moscow, DMK Press Publ., 2005, 640 p. (In Russian)
6. Kim K. K. & Ivanov S. N. Razrabotka kompozitnykh pokrytii dlia spetsial'nykh elektrotekhnicheskikh ustroistv [Development of composite coating for special electrical devices]. *Izvestiia SPbGETU LETI* [Proceedings of the St. Petersburg Electrotechnical University LETI], 2019, no. 9, pp. 77–84. (In Russian)
7. Vasil'ev P. Iu. & Nikitin V. V. Opredelenie parametrov tekhnicheskikh sredstv kontrolya silovykh poluprovodnikovyykh priborov putem matematicheskogo modelirovaniia teplofizicheskikh protsessov, vznikaiushchikh pri vozdeistvii impul'sov toka [Identification of parameters of technical control facilities of semiconductor power devices by mathematical simulation of thermo-physical processes occurring under the influence of current impulse]. *Materialy Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii "Resursosberegaiushchie tekhnologii na zheleznodorozhnom transporte"* [Proceedings of All-Russian research and engineering conference "Resource-saving technologies in railway transport"]. Four vols. Krasnoyarsk, May 19–21, 2005, vol. I, pp. 539–543. (In Russian)
8. Baiko A. V., Nikitin V. V. & Sereda E. G. Avtonomnye elektroenergeticheskie sistemy s sinkhronnymi generatorami i vodorodnymi istochnikami energii [Autonomous electrical power systems with synchro-

nous generators and hydrogen electrical power sources]. *Elektrotehnika [Electrical engineering]*, 2015, no. 8, pp. 47–53. (In Russian)

9. Nikitin V. V., Parmas Ia. Iu., Pivovarov V. M. & Sattarov R. R. Bezreduktorni tiagovyi privod gorodskogo rel'sovogo transporta [Direct-drive pulling drive of urban rail transport]. *Izvestiia Peterburgskogo universiteta putei soobshcheniia [Proceedings of Petersburg Transport University]*. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2013, iss. 1, pp. 31–38. (In Russian)

10. Baiko A. V., Nikitin V. V. & Sereda E. G. Hydrogen energy sources with current inverters in ship AC power plants. *Russian Electrical Engineering*, 2017, vol. 88, iss. 6, pp. 355–360.

11. Nikitin V. V., Marikin A. N. & Tret'iakov A. V. Vagony-elektrostantsii s kombinirovannymi energoustanovkami [Mobile power plant cars with combined power generation systems]. *Elektrotehnika [Electrical engineering]*, 2016, no. 5, pp. 25–31. (In Russian)

Received: November 27, 2019

Accepted: December 02, 2019

Author's information:

Konstantin K. KIM – D. Sci. in Engineering, Professor; kimkk@inbox.ru

Sergey N. IVANOV – D. Sci. in Engineering, Professor; snivanov57@mail.ru

Marat I. KHISMATULIN – Postgraduate Student; lokomotivlar@gmail.com

УДК 621.313.282.1

Исследование устойчивости капсулы пассажирского трубопроводного транспорта в установившемся режиме при возмущениях продольной координаты

К. К. Ким, И. Р. Крон

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

Для цитирования: Ким К. К., Крон И. Р. Исследование устойчивости капсулы пассажирского трубопроводного транспорта в установившемся режиме при возмущениях продольной координаты // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2019. – Т. 16, вып. 4. – С. 584–591. DOI: 10.20295/1815-588X-2019-4-584-591

Аннотация

Цель: Рассмотрение возможности устойчивого состояния капсулы трубопроводного транспорта в условиях установившегося режима и при возмущениях продольной координаты. Установление необходимых допущений и условий для выявления критериев устойчивости. Определение наилучшего способа регулирования напряжения путевой структуры транспортной системы, имея в виду угол между векторами напряжения путевой структуры и электродвижущей силы системы возбуждения, расположенной в экипажной части капсулы, как исходную величину для управления. **Методы:** Проведен анализ математической модели тягового линейного синхронного двигателя для пассажирского трубопроводного транспорта. Условия устойчивости для регулируемой системы получены с помощью коэффициентов характеристического уравнения третьего порядка и матриц, составленных на основании критерия Гурвица. **Результаты:** В ходе анализа математической модели тягового линейного синхронного двигателя и определения критериев устойчивости системы была решена частная задача устойчивости установившегося режима движения капсулы трубопроводного транспорта, а именно при возмущениях со стороны лишь продольной координаты, тогда как в общем случае капсула имеет шесть механических степеней свободы. Было выявлено, что наилучшая устойчивость капсулы достигается при регулировании напряжения путевой структуры по производной угла θ . При пропорциональном управлении уровнем напряжения наблюдается расширение неустойчивой области при больших коэффициентах рассеяния, характерных для подобного рода транспортных систем. **Практическая значимость:** Результаты проведенного исследования могут в дальнейшем составить теоретическую базу в вопросах устойчивого движения транспортных систем, в которых применяются электродинамический подвес и линейный тяговый синхронный двигатель.

Ключевые слова: Пассажирский трубопроводный транспорт, капсула, критерии устойчивости, тяговый линейный синхронный двигатель, регулируемая система, обобщенная координата, критический угол, напряжение путевой структуры.

Введение

Нормальным состоянием капсулы трубопроводного транспорта с некоторыми допущениями можно назвать такое состояние, в ко-

тором для описания положения в трехмерном пространстве достаточно одной обобщенной координаты. Этой координатой является вектор ϵ_x , проведенный в центр инерции капсулы из начала системы отсчета, движущейся

вдоль путевой структуры со скоростью бегущего магнитного поля в условиях применения электродинамического подвеса (ЭДП) и тягового линейного синхронного двигателя (ТЛСД), причем система возбуждения двигателя располагается в капсуле. При постоянстве скорости бегущего поля ϵ_x можно заменить другой обобщенной координатой θ – углом между векторами напряжения путевой структуры и электродвижущей силой (ЭДС) возбуждения. В общем же случае капсула характеризуется шестью степенями свободы [1].

Единственной величиной в системе пассажирского трубопроводного транспорта (ПТТ), на которую можно оказать регулирующее воздействие, является напряжение путевой структуры [2]. Вопрос управления устойчивым состоянием транспортного средства в случае шести степеней свободы пока не является решенным. Однако в этом отношении рационально рассматривать частные задачи, например устойчивость капсулы при ее движении вдоль оси путевой структуры (вектор скорости капсулы V_x коллинеарен вектору ϵ_x). Устойчиво в данном случае движение, которое не характеризуется наличием переходных процессов, переводящих систему в новое состояние, описываемое иными законами [3].

Определение критериев устойчивости

В ходе исследования математической модели ТЛСД, согласно критериям Гурвица [4], были получены условия устойчивости для нерегулируемой системы

$$\begin{aligned} & (1 - \sigma)(x \sin \theta + r \cos \theta)^2 U - \\ & - \frac{r}{x} [(2 - \sigma)x^2 + r^2] E_0 \sin \theta_0 + \\ & + [(2\sigma - 1)r^2 + x^2\sigma] E_0 \cos \theta_0 > 0, \quad (1) \\ & (1 - \sigma)(r^2 + x^2\sigma)U + \\ & + [(2\sigma - 1)r^2 + (x\sigma)^2] E_0 \cos \theta_0 - \end{aligned}$$

$$- \frac{r}{x} [(2 - \sigma)x^2 + r^2] E_0 \sin \theta_0 > 0, \quad (2)$$

$$x\sigma \cos \theta_0 - r \sin \theta_0 > 0, \quad (3)$$

$$\begin{aligned} & [(2\sigma - 1)r^2 + x^2\sigma] U \cos \theta_0 - \\ & - \frac{r}{x} [(2\sigma - 1)x^2 + r^2] \times \\ & \times U \sin \theta_0 - 2r^2 E_0 > 0, \quad (4) \end{aligned}$$

где σ – коэффициент рассеяния обмотки; x , r – индуктивное и активное сопротивление путевой структуры соответственно; U – напряжение путевой структуры; E_0 , θ_0 – критические значения соответственно ЭДС возбуждения и угла θ .

Необходимо отметить, что x , r в системе (1)–(4) – величины одного порядка. Это определяет весьма большое значение коэффициента затухания путевой структуры. Такое обстоятельство позволяет исключить из рассмотрения переходные процессы.

Далее невозмущенные величины обозначены индексом 0, а возмущения – знаком Δ .

Поскольку все перемещения капсулы относительно продольной оси координат полагаются квазистационарными, то возможно изучение электрических параметров, описывающих ТЛСД, в представлении d , q , характерном для традиционной вращающейся синхронной машины [5].

Тогда в представлении d , q напряжения фаз можно записать таким образом:

$$\begin{aligned} u_d &= -U_m \sin \theta + U_\Delta \cos \psi_\Delta, \\ u_q &= U_m \cos \theta + U_\Delta \sin \psi_\Delta, \\ U_\Delta &= k_\theta (\theta - \theta_0) + k'_\theta \frac{d\theta}{dt}. \quad (5) \end{aligned}$$

В (5) U_Δ – напряжение регулирования системы, отражающее закон управления, ψ_Δ – возмущенная величина начального сдвига фаз.

В случае регулирования системы только по θ , так что $k'_{d0} = k'_{q0} = 0$, критерии устойчивости получаются следующими:

$$(1 - \sigma)(x \sin \theta_0 + r \cos \theta_0)U \times \\ \times [r(\cos \theta_0 - k_{d0}) + x(\sin \theta_0 - k_{q0})] - \\ - \frac{r}{x}[(2 - \sigma)x^2 + r^2]E_0(\sin \theta_0 - k_{q0}) + \\ + [(2\sigma - 1)r^2 + x^2\sigma]E_0 \times \\ \times (\cos \theta_0 - k_{d0}) > 0, \quad (6)$$

$$(1 - \sigma)U\{(\cos \theta_0 - k_{d0})[(r^2 + x^2\sigma) \times \\ \times \cos \theta_0 + (1 - \sigma)rx \sin \theta_0] + \\ + (\sin \theta_0 - k_{q0})[(r^2 + x^2\sigma)\sin \theta_0 - \\ - (1 - \sigma)rx \cos \theta_0]\} + \\ + E_0[(\cos \theta_0 - k_{d0}) \times \\ \times [(2\sigma - 1)r^2 + (x\sigma)^2] - \\ - \frac{r}{x}[(2 - \sigma)x^2\sigma + r^2](\sin \theta_0 - k_{q0})] > 0, \quad (7)$$

$$x\sigma(\cos \theta_0 - k_{d0}) - r(\sin \theta_0 - k_{q0}) > 0, \quad (8)$$

$$[(2\sigma - 1)r^2 + x^2\sigma]U \cos \theta_0 - \\ - \frac{r}{x}[(2\sigma - 1)x^2 + r^2]U \sin \theta_0 - \\ - 2r^2E_0 > 0, \quad (9)$$

где k_d, k_q – коэффициенты усиления системы управления, для которых справедливы соотношения

$$k_d = k_\theta \cos \psi_\Delta, \quad k'_d = k'_\theta \cos \psi_\Delta, \\ k_{d0} = k_d / U_m, \quad k'_{d0} = k'_d / U_m, \\ k_q = k_\theta \sin \psi_\Delta, \quad k'_q = k'_\theta \sin \psi_\Delta, \\ k_{q0} = k_q / U_m, \quad k'_{q0} = k'_q / U_m.$$

Исследуем приведенные критерии устойчивости (1)–(4), (6)–(9). Для этого пренебрежем сначала активным сопротивлением путевой структуры [6]. В таком случае

• для нерегулируемой системы

$$(1 - \sigma)U \sin^2 \theta_0 + \sigma E_0 \cos \theta_0 > 0, \quad (1a)$$

$$(1 - \sigma)U + \sigma E_0 \cos \theta_0 > 0, \quad (2a)$$

$$\cos \theta_0 > 0; \quad (3a)$$

• для регулируемой системы ($k_{d0}, k_{q0} \neq 0, k'_{d0} = k'_{q0} = 0$)

$$(1 - \sigma)U \sin \theta_0 (\sin \theta_0 - k_{q0}) + \\ + \sigma E_0 (\cos \theta_0 - k_{d0}) > 0, \quad (6a)$$

$$(1 - \sigma)U (1 - k_{d0} \cos \theta_0 - k_{q0} \sin \theta_0) + \\ + \sigma E_0 (\cos \theta_0 - k_{d0}) > 0, \quad (7a)$$

$$\cos \theta_0 - k_{d0} > 0, \quad (8a)$$

$$\cos \theta_0 > 0. \quad (9a)$$

Анализ устойчивости регулируемой и нерегулируемой систем

При нормальном состоянии системы напряжение путевой структуры и ЭДС возбуждения – величины одного порядка, а $\sigma < 1$. Поэтому среди условий (1a)–(3a) более строгим является (3a). Это значит, что устойчивость нерегулируемой системы при пренебрежении активным сопротивлением путевой структуры обуславливается условием (3a). Следовательно, критический угол θ^0 , который определяет границу области устойчивости, равен $\pi/2$. При допущении $r \neq 0$ из (1)–(4) получаем $\theta^0 < \pi/2$. Устойчивая область уменьшается, притом тем значительно, чем больше r . Это следует из рис. 1, на котором $k_E = E_0/U, k_x = x/r$ (на рис. 1, 2 неустойчивая область заштрихована). Описанное негативное влияние r на устойчивость связано, скорее всего, с явлением самораскачивания. На устойчивость системы также влияет коэффициент σ . Как видно на рис. 1,

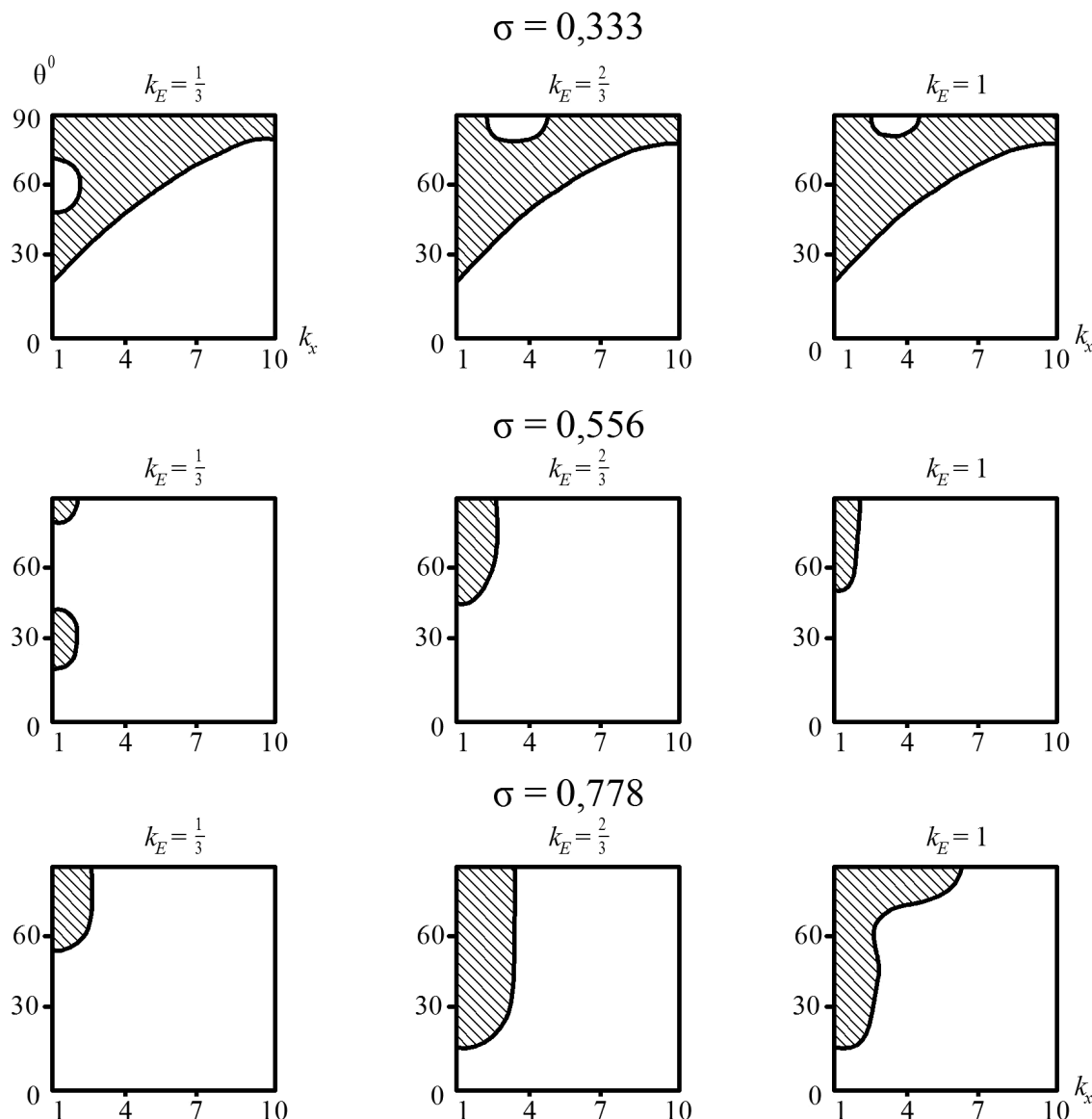


Рис. 1. Области неустойчивости для нерегулируемой системы

при низких значениях σ область неустойчивости существенно расширяется. Значит, можно считать, что ТЛСД, благодаря большим полям рассеяния, будет более устойчив, чем классическая синхронная машина [7–10].

Рассмотрим условия (6а)–(9а). Необходимо отметить, что k_{d0}, k_{q0} должны быть меньше нуля. При $r = 0$ и $k_{d0}, k_{q0} < 0$ устойчивость определяется условием (9а). Тогда $\theta^0 = \pi/2$, как и в случае нерегулируемой системы. При $r \neq 0$ критический угол уменьшается. Особенно это проявляется при больших значениях

r , например $x/r < 2$. На рис. 2 показаны области неустойчивости на плоскости θ^0, k_x при различных значениях $k_0 = k_{d0} = k_{q0}$. Видно, что управление устойчивым состоянием только по углу θ без его производных не оказывает желаемого эффекта, даже наоборот: устойчивые области уменьшаются. Однако могут быть и исключения. Так, при достаточно низких значениях σ и относительно высоких k_0 возможно расширение области устойчивости (см. рис. 2 для случаев $\sigma = 0,333, k_E = 2/3$ и $k_E = 1$ при коэффициентах регулирования $0, -1$).

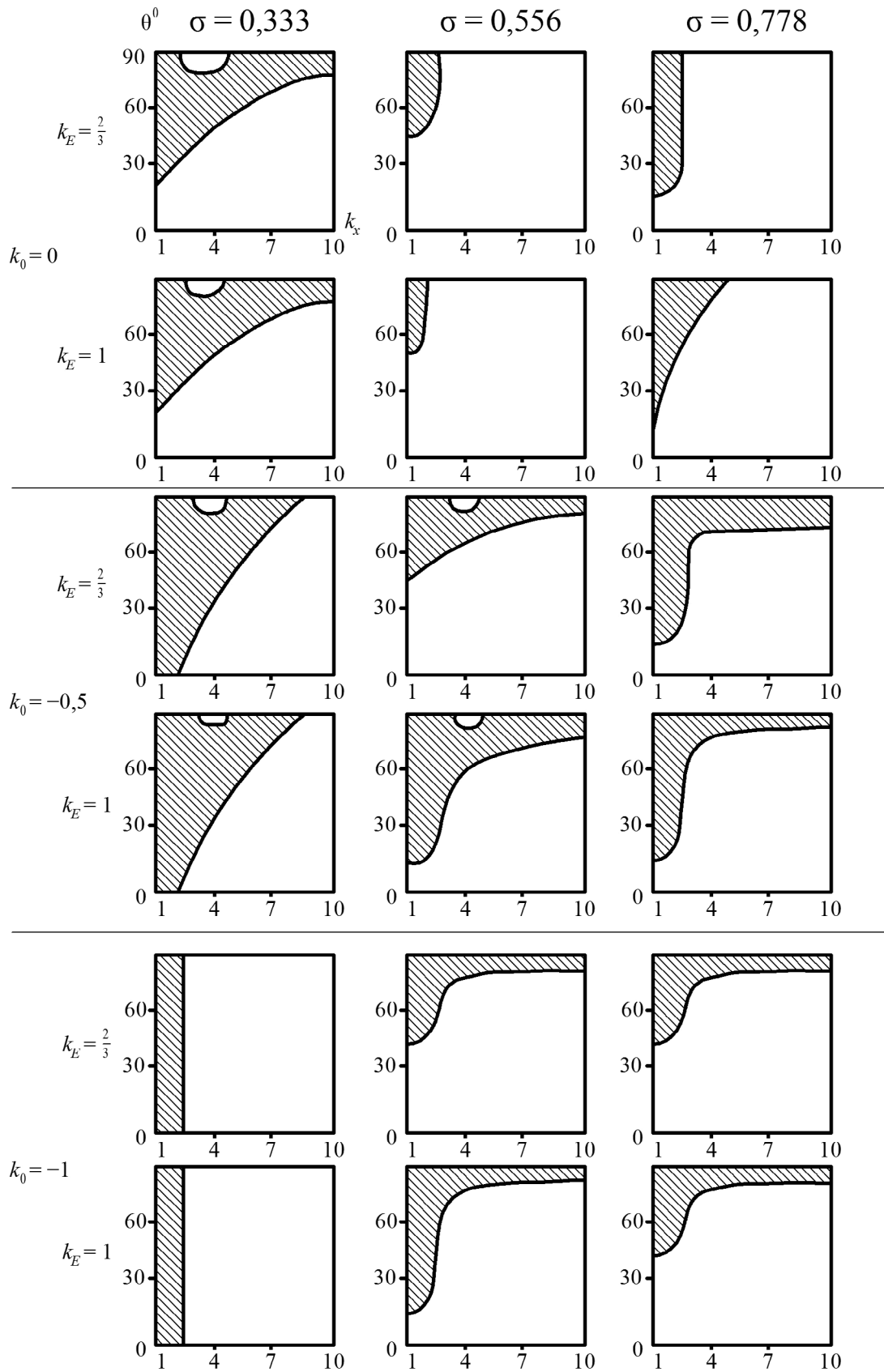


Рис. 2. Области неустойчивости для регулируемой системы

Выясним роль производных угла θ и запишем критерии устойчивости системы, регулируемой по углу θ и его производным:

$$(1 - \sigma)U \sin \theta^0 (\sin \theta^0 - k_{q0}) + \sigma E_0 (\cos \theta^0 - k_{d0}) > 0, \quad (10)$$

$$L \left[\begin{array}{l} (1 - \sigma)U (1 - k_{d0} \cos \theta^0 - k_{q0} \sin \theta^0) + \\ + \sigma E_0 (\cos \theta^0 - k_{d0}) \end{array} \right] -$$

$$- \frac{r_3}{\sigma} [(1 - \sigma)U k'_{q0} \sin \theta^0 + \sigma E_0 k'_{d0}] > 0, \quad (11)$$

$$\begin{aligned} & \frac{3\sqrt{2}\pi LL_3 U}{\tau x^2} \times \\ & \times \left[\begin{array}{l} (1 - \sigma)U (k'_{d0} \cos \theta^0 - k'_{q0} \sin \theta^0) - \\ - \sigma E_0 k'_{d0} \end{array} \right] \times \\ & \times [L_3 \left[\begin{array}{l} (1 - \sigma)U (1 - k_{d0} \cos \theta^0 - k_{q0} \sin \theta^0) + \\ + \sigma E_0 (\cos \theta^0 - k_{d0}) \end{array} \right] - \\ & - \frac{r_3}{\sigma} [(1 - \sigma)U k'_{q0} \sin \theta^0 + \sigma E_0 k'_{d0}] + \\ & + \sqrt{2} m^0 r_3 \frac{\tau}{\pi} [L_3 (1 - \sigma)U \cos \theta^0 \times \\ & \times (\cos \theta^0 - k_{d0}) - \\ & - \frac{r_3}{\sigma} [(1 - \sigma)U k'_{q0} \sin \theta^0 + \sigma E_0 k'_{d0}]] > 0, \quad (12) \end{aligned}$$

где L_3, r_3 – индуктивность и сопротивление экрана.

При условиях $k_{d0} = k_{q0} = 0$ и $k'_{d0} = k'_{q0} < 0$, как видно из соотношений (10), (11), устойчивая работа системы обеспечивается при $\theta > \pi/2$. Критический угол при этом удовлетворяет выражению

$$(1 - \sigma)U \sin^2 \theta^0 + \sigma E_0 \cos \theta^0 = 0.$$

Очевидно, что критический угол θ^0 не зависит от коэффициентов k'_{d0}, k'_{q0} непосредственно. Однако при регулировании по производной θ условие (9), которым определялось

устойчивое состояние системы в условиях регулирования без учета производной, теряет прежнюю значимость, и наиболее сильным становится критерий (10). Заметим, что неравенства (8), (9) и соответствующее им условие (12) являются следствием одного и того же критерия Гурвица (из их членов составляется матрица для анализа). Тогда устойчивость системы при $\theta > \pi/2$ обусловлена лишь управлением уровня напряжения путевой структуры по первой производной угла θ .

Заключение

Таким образом, при некоторых допущениях и условиях, описанных выше для каждого случая, при исследовании математической модели ТЛСД ПТТ было установлено, что регулирование уровня напряжения путевой структуры по углу θ не дает желаемого результата, а наоборот: область устойчивости сужается. Исключением следует признать состояние системы, когда потоки рассеяния малы. В этом случае при больших коэффициентах регулирования возможно расширение устойчивой зоны. Однако случай малых σ для подобного рода транспортных систем не характерен.

Регулирование напряжения путевой структуры по производной угла θ приводит к совершенно иным результатам. Критический угол θ^0 становится больше $\pi/2$ и происходит сужение неустойчивой области.

Библиографический список

1. Ландау Л. Д. Теоретическая физика : учеб. пособие : в 10 т. – Т. 1. Механика. – 4-е изд., испр. / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – М. : Наука, 1988. – 216 с.
2. Ким К. К. Системы электродвижения с использованием магнитного подвеса и сверхпроводимости : монография / К. К. Ким. – М. : Учеб.-метод. центр по образованию на ж.-д. транспорте, 2007. – 360 с.
3. Ким К. К. Математическая модель асинхронной машины для вибрационных исследований /

- К. К. Ким, Е. Б. Зазыбина // Мир транспорта. – 2015. – Т. 13. – № 3. – С. 6–19.
4. Бесекаерский В. А. Теория систем автоматического регулирования. – 3-е изд., испр. / В. А. Бесекаерский. – М. : Наука, 1975. – 768 с.
5. Вольдек А. И. Электрические машины. Машины переменного тока : учебник для вузов / А. И. Вольдек, В. В. Попов. – СПб. : Питер, 2007. – 350 с.
6. Ким К. И. Переходные процессы в асинхронной машине : монография / К. И. Ким, К. К. Ким. – СПб. : ОМ-Пресс, 2013. – 90 с.
7. Горев А. А. Переходные процессы синхронной машины / А. А. Горев. – Л. ; М. : Госэнергоиздат, 1950. – 551 с.
8. Ким К. К. Процессы диффузии магнитного поля в магнитопровод магнитного подшипника / К. К. Ким, Е. Б. Зазыбина // Учен. зап. КнАГТУ. – 2015. – № 1 (21). – С. 21–29.
9. Ким К. К. Система автоматического управления радиального магнитного подшипника / К. К. Ким, Е. Б. Зазыбина // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2015. – № 1. – С. 30–36.
10. Ким К. К. Вариант вакуумной транспортной системы / К. К. Ким // Железнодорожный транспорт. – 2016. – № 12. – С. 67–68.
- Дата поступления: 27.11.2019
Решение о публикации: 02.12.2019
- Контактная информация:**
КИМ Константин Константинович – д-р техн. наук, профессор; kimkk@inbox.ru
КРОН Игорь Романович – студент; mechenu@yandex.ru

Stability analysis of passenger pipeline transport capsule in steady state in case of disturbances of longitudinal coordinate

K. K. Kim, I. R. Kron

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

For citation: Kim K. K., Kron I. R. Stability analysis of passenger pipeline transport capsule in steady state in case of disturbances of longitudinal coordinate. *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2019, vol. 16, iss. 4, pp. 584–591. DOI: 10.20295/1815-588X-2019-4-584-591

Summary

Objective: Consider the possibility of steady state of a pipeline transport capsule under conditions of steady-state conditions and in case of disturbances of longitudinal coordinate. Establish necessary allowances and conditions to identify stability criteria. Determine the best method for controlling strain of transport system's track structure considering as reference value for control the angle between vectors of strain of track structure and of electromotive force of excitation system. **Methods:** Mathematical simulation of traction linear synchronous motor was analysed. Stability conditions for the regulated system were obtained from tertiary characteristic equation coefficients and matrices compiled on the basis of the Hurwitz criterion. **Results:** In the course of analysis of a simulation model of the traction linear synchronous motor and establishing the criteria for system stability, the partial problem of stability of steady-state condition of movement of pipeline transport capsule was solved, namely in case of disturbances only from the longitudinal coordinate, whereas in the generic case the capsule has six mechanical degrees of freedom. It was established that the best possible stability of the capsule is achieved by regulating strain of track structure by the θ angle derivative. In case of proportional control of strain level, expansion of unstable area with large dispersion coefficients characteristic for transport systems of this

sort is observed. **Practical importance:** In the future, results of the study can form the theoretical foundation for the problems of steady motion of transport systems in which electro-dynamic levitation and linear traction synchronous motor are used.

Keywords: Passenger pipeline transport, capsule, stability criteria, traction linear synchronous motor, controlled system, generalized coordinate, critical angle, track structure strain.

References

1. Landau L. D. & Lifshits E. M. *Teoreticheskaia fizika. Uchebnoe posobie. T. 1. Mekhanika [Theoretical physics. Study guide. Vol. 1. Mechanics]*. 10 vols. 4th revised edition. Moscow, Nauka Publ., 1988, 216 p. (In Russian)
2. Kim K. K. *Sistemy elektrodvizheniia s ispol'zovaniem magnitnogo podvesa i sverkhprovodimosti [Electric propulsion systems deploying magnetic levitation and superconductivity]*. Monograph. Moscow, Uchebno-metodicheskii tsentr po obrazovaniiu na zheleznorozhnom transporte [Learning and teaching centre for railway transport education] Publ., 2007, 360 p. (In Russian)
3. Kim K. K. & Zazybina E. B. *Matematicheskaia model' asinkhronnoi mashiny dlia vibratsionnykh issledovaniy [Mathematical simulation of an asynchronous machine for vibration studies]*. *Mir transporta [Transport world]*, 2015, vol. 13, no. 3, pp. 6–19. (In Russian)
4. Besekerskii V. A. *Teoriia sistem avtomaticheskogo regulirovaniia [Automatic control systems theory]*. 3rd revised edition. Moscow, Nauka Publ., 1975, 768 p. (In Russian)
5. Vol'dek A. I. & Popov V. V. *Elektricheskie mashiny. Mashiny peremennogo toka [Electrical machines. Alternating-current machines]*. Textbook for higher education. Saint Petersburg, Piter Publ., 2007, 350 p. (In Russian)
6. Kim K. I. & Kim K. K. *Perekhodnye protsessy v asinkhronnoi mashine [Transition processes in asynchronous machine]*. Monograph. Saint Petersburg, OMPress Publ., 2013, 90 p. (In Russian)
7. Gorev A. A. *Perekhodnye protsessy sinkhronnoi mashiny [Transient processes of synchronous machine]*. Leningrad and Moscow, Gosenergoizdat Publ., 1950, 551 p. (In Russian)
8. Kim K. K. & Zazybina E. B. *Protsessy diffuzii magnitnogo polia v magnitoprovod magnitnogo podshipnika [Processes of magnetic field diffusion into magnetic circuit of the magnetic bearing]*. *Uchenye zapiski KnAGTU [Transactions of the Komsomolsk-na-Amure State University]*, 2015, no. 1 (21), pp. 21–29. (In Russian)
9. Kim K. K. & Zazybina E. B. *Sistema avtomaticheskogo upravleniia radial'nogo magnitnogo podshipnika [Radial magnetic bearing automatic control system]*. *Elektronika i elektrooborudovanie transporta [Transport electronics and electrical equipment]*, 2015, no. 1, pp. 30–36. (In Russian)
10. Kim K. K. *Variant vakuumnoi transportnoi sistemy [Vacuum transport system option]*. *Zheleznodorozhnyi transport [Railway transport]*, 2016, no. 12, pp. 67–68. (In Russian)

Received: November 27, 2019

Accepted: December 02, 2019

Author's information:

Konstantin K. KIM – D. Sci. in Engineering, Professor; kimkk@inbox.ru

Igor R. KRON – Student; mechenu@yandex.ru

УДК 621.333

Определение основных параметров асинхронного тягового электродвигателя

А. Я. Якушев, Т. М. Назирхонов, И. П. Викулов, К. В. Марков

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

Для цитирования: Якушев А. Я., Назирхонов Т. М., Викулов И. П., Марков К. В. Определение основных параметров асинхронного тягового электродвигателя // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2019. – Т. 16, вып. 4. – С. 592–601. DOI: 10.20295/1815-588X-2019-4-592-601

Аннотация

Цель: Параметры тяговых преобразователей и тяговых электродвигателей имеют однозначную взаимосвязь по уровню напряжения, частоте переключения силовых электронных приборов, пульсации тока. Величина номинального напряжения асинхронных тяговых электродвигателей (АТЭД) находится в соответствии с уровнем напряжения тяговой сети, типом инверторного преобразователя и алгоритмом его управления. Определение параметров АТЭД необходимо для создания компьютерной имитационной модели, позволяющей воспроизводить электромагнитные процессы в тяговом электроприводе и преобразователях, а также функции обработки полученных результатов моделирования, адекватные реальным условиям применения на электрическом подвижном составе преобразователей с различными алгоритмами управления в режимах тяги и рекуперативного торможения. **Методы:** Для определения параметров АТЭД применительно к Т-образной схеме замещения используются режимы холостого хода, короткого замыкания и номинальной нагрузки с помощью метода разделения потерь в двигателе. Потери в тяговых преобразователях и тяговых редукторах учитываются в соответствии с мощностью, развиваемой АТЭД. **Результаты:** Предложен способ расчета параметров АТЭД на основании расчетных режимов холостого хода и короткого замыкания с применением метода разделения потерь. Получены аналитические выражения для расчета основных параметров АТЭД применительно к Т-образной схеме замещения. Приведены основные расчетные параметры и электротехнические величины, характеризующие режимы работы АТЭД серии SEA-107E электровоза серии «O'Z-ELR». **Практическая значимость:** Полученные результаты могут быть использованы в компьютерной имитационной модели, предназначенной для воспроизведения электромагнитных процессов в тяговом электроприводе и преобразователях, при определении энергетических характеристик электровоза серии «O'Z-ELR».

Ключевые слова: Асинхронный тяговый электродвигатель, Т-образная схема замещения, метод расчета параметров, активные и индуктивные сопротивления обмоток.

Введение

Асинхронные электродвигатели широко применяются в тяговом приводе рельсового транспорта благодаря большей надежности и меньшим затратам на изготовление и эксплуатацию по сравнению с коллекторным.

Одной из приоритетных задач железнодорожной компании АО «Узбекистон темир йуллари» для удовлетворения потребностей социально-экономического развития Узбекистана является замена на железных дорогах страны электровозов российского производства ВЛ60К и ВЛ80С на более совершенные.

Для этой цели в Китайской Народной Республике были закуплены электровозы повышенной мощности серии «O'Z-ELR» с асинхронным тяговым приводом.

Шестиосные электровозы переменного тока серии «O'Z-ELR» (рис. 1) разработаны с учетом последних тенденций в области электровозостроения. К характерным особенностям электровоза относятся применение асинхронного тягового электропривода, тяговых преобразователей на базе IGBT-транзисторов, поосное регулирование силы тяги и торможения, микропроцессорная система управления [1].

Использование асинхронного тягового электродвигателя (АТЭД) невозможно без полупроводникового преобразователя. При этом форма напряжения и тока обмотки статора далека от синусоидальной.

В настоящее время существует актуальная проблема повышения энергетической эффективности железнодорожного транспорта, что связано с увеличением энергетических показателей электрического подвижного состава (ЭПС). Важным шагом в этом направлении является создание компьютерной имитационной модели, позволяющей воспроизводить электромагнитные процессы в тяговом электро-

приводе и преобразователях, а также функции обработки полученных результатов моделирования, адекватных реальным условиям применения на ЭПС преобразователей с различными алгоритмами управления в режимах тяги и рекуперативного торможения.

Энергопотребление ЭПС в эксплуатационных режимах регистрируется измерительными приборами – счетчиками электроэнергии. Составляющие расхода и потерь электроэнергии на движение ЭПС можно учесть только аналитическими методами. Для адекватного выполнения анализа энергобаланса необходимо определить параметры, а также энергетические показатели преобразователей и агрегатов тягового электропривода.

Параметры и энергетические характеристики тяговых преобразователей и тяговых электродвигателей имеют однозначную взаимосвязь по уровню напряжения, частоте переключения силовых электронных приборов, пульсации токов.

На электровозах серии «O'Z-ELR» основу тяговых преобразователей составляют двухуровневые автономные инверторы напряжения (АИН). Диаграммы фазных и линейного напряжений, а также фазного тока при



Рис. 1. Электровоз «O'Z-ELR»

180-градусном алгоритме управления показаны на рис. 2.

Эффективное значение линейного напряжения, подводимого к обмоткам электродвигателя при 180-градусном управлении инвертором, составляет 81,5% напряжения питания преобразователя U_d напряжение входного фильтра АИН. Электромагнитный момент АТЭД создается основными гармониками магнитного потока и тока ротора. Форма кривых магнитного потока и тока при 180-градусном алгоритме управления АИН далека от синусоидальной. Действующее значение основной гармоники линейного напряжения, подводимого к АТЭД, составляет $0,78U_d$ [2, 3].

Регулирование напряжения, подводимого к АТЭД, осуществляется широтно-импульсной модуляцией управления токопроводящими интервалами силовых ключей АИН.

Синусоидальность формы магнитного потока и тока статора достигается применением алгоритма управления АИН с синусоидальной широтно-импульсной модуляцией. В этом случае эффективное значение основной гармоники линейного напряжения, подводимого к обмоткам АТЭД, составляет всего $0,61U_d$. При применении усовершенствованного алгоритма управления АИН с пространственно-векторной широтно-импульсной модуляцией эффективное значение основной гармоники линейного напряжения равно $0,7U_d$ [4].

Экспериментальное определение параметров обмоток АТЭД в большинстве случаев затруднено техническими условиями реализации испытательных режимов. Аналитическое определение параметров АТЭД – активного сопротивления и индуктивности рассеяния обмоток, величины механических потерь и потерь в стали – можно выполнить на основе режимов холостого хода и короткого замыкания с использованием метода разделения потерь в режиме номинальной нагрузки.

Сопротивление обмоток фазы статора (Ом) в этом случае определяется мощностью потерь $\Delta P_{SM.H}$ меди при номинальной нагрузке

$$r_s = \frac{\Delta P_{SM.H}}{3I_{SH}^2}, \quad (1)$$

где I_{SH} – ток фазы статора в номинальном режиме.

Определим мощность потерь (Вт) в меди статора при номинальной нагрузке по формуле

$$\Delta P_{SM.H} = \frac{P_H \cdot 10^3}{\eta_H} (1 - (\eta_H + s_H)) - (\Delta P_{MECH.H} + \Delta P_{SCOT.H} + \Delta P_{SDM}), \quad (2)$$

в которой s_H – скольжение ротора в режиме номинальной нагрузки, P_H – мощность номиналь-

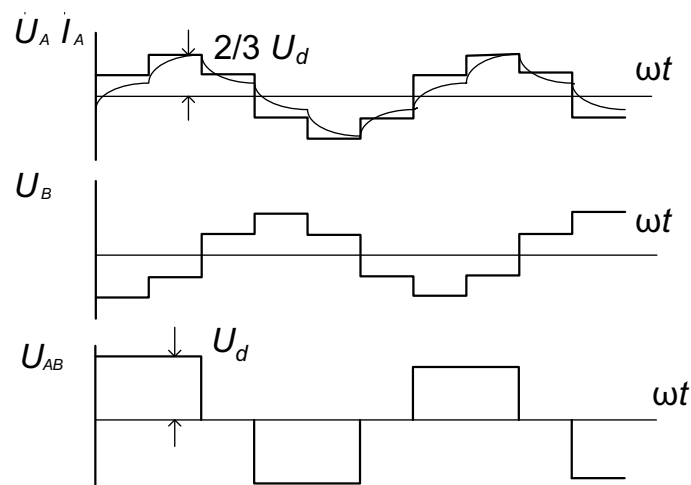


Рис. 2. Диаграммы фазных и линейного напряжений, а также фазного тока

ного режима, η_n – коэффициент полезного действия (КПД) номинального режима, $\Delta P_{\text{ст.н}}$ – мощность потерь в стали статора в режиме номинальной нагрузки, $\Delta P_{\text{мех.н}}$ – мощность механических потерь в режиме номинальной нагрузки, $\Delta P_{\text{сдм}}$ – мощность добавочных потерь в меди статора, обусловленных пространственными гармониками тока статора.

Мощность механических потерь в режиме номинальной нагрузки можно принять равной $\Delta P_{\text{мех.н}} = 0,002 \frac{P_n}{\eta_n} \cdot 10^3$ Т [5], мощность добавочных потерь от пространственных гармоник тока – $\Delta P_{\text{сдм}} = 0,005 \frac{P_n}{\eta_n} \cdot 10^3$ Т [5].

Мощность потерь в стали в режиме номинальной нагрузки практически равна мощности потерь в стали для режима $\frac{3}{4}$ номинальной нагрузки. Последнюю можно определить из условия равенства основных потерь в стали и меди статора при максимальном КПД двигателя η_{max} , соответствующем режиму $\frac{3}{4}$ номинальной нагрузки (Вт) (рис. 3):

$$\Delta P_{\text{ст.3/4}} = \frac{3}{4 \cdot 2} \frac{P_n \cdot 10^3}{\eta_{\text{max}}} (1 - \eta_{\text{max}}) - \quad (3)$$

$$- (\Delta P_{\text{мех.3/4}} + \Delta P_{\text{сдм}}).$$

Механические потери при номинальной частоте вращения ротора практически не зависят от нагрузки, поэтому с достаточной точностью можно принять, что $\Delta P_{\text{мех.3/4}} = \Delta P_{\text{мех.н}}$.

Сопротивление ротора, приведенное к сопротивлению фазы статора, можно рассчитать по мощности потерь в роторе при номинальном скольжении и приведенном токе ротора $I'_{rн}$ (Ом):

$$r'_r = \frac{P_n \cdot 10^3 \cdot s_n}{3 I'^2_{rн}}. \quad (4)$$

Найдем ток ротора, приведенный к току статора, для режима номинальной нагрузки (А) по формуле [6]

$$I'_{rн} = I_{сн} \sqrt{1 - \left(\frac{I_{s0}}{I_{сн}} \right)^2} - \frac{I_{s0}}{I_{сн} 2b_n}, \quad (5)$$

в которой I_{s0} – ток режима холостого хода АТЭД при номинальном напряжении и номинальной частоте тока статора, b_n – кратность наибольшего электромагнитного момента.

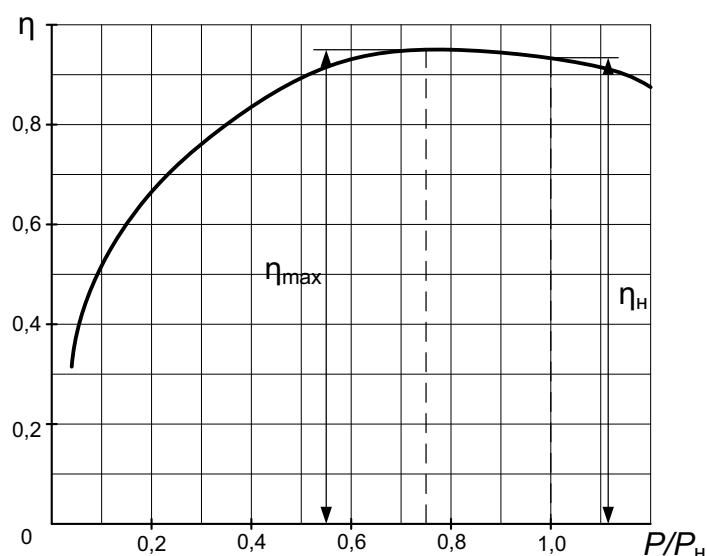


Рис. 3. Зависимость КПД АТЭД от нагрузки

Величина b_H определяется по режиму номинальной нагрузки и индуктивному сопротивлению короткого замыкания X_K двигателя:

$$b_H = \frac{U_{SH}^2 (1 - s_H)}{\sqrt{3} \cdot 2c_1 (P_H \cdot 10^3 + \Delta P_{\text{мех.н}}) X_K}, \quad (6)$$

где c_1 – коэффициент приведения параметров обмоток АТЭД к Т-образной схеме замещения.

Полное сопротивление короткого замыкания для фазы статора АТЭД (Ом) обуславливается кратностью тока короткого замыкания $K_{I_{K3}} = 7-8$, равной

$$Z_K = \sqrt{X_K^2 + (c_1 r_K)^2} = \frac{U_{SH}}{\sqrt{3} I_{SH} K_{I_{K3}}}, \quad (7)$$

здесь r_K – сопротивление короткого замыкания двигателя, $r_K = r_s + r_r'$.

Индуктивное сопротивление короткого замыкания (Ом) можно определить из формулы

$$X_K = Z_K \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_{K3}}, \quad (8)$$

в которой $\cos \varphi_{K3}$ – коэффициент мощности двигателя для режима короткого замыкания, предварительно принимаем $\cos \varphi_{K3} = 0,15-0,2$.

Ток режима холостого хода АТЭД (А) [7]

$$I_{s0} \approx I_{SH} \left(\sin \varphi_{SH} - \frac{\cos \varphi_{SH}}{2b_H} \right), \quad ((9)$$

где $\cos \varphi_{SH}$ – коэффициент мощности двигателя для номинального режима.

После выполнения расчетов по формулам (1)–(9) следует уточнить величины r_r' , X_K , $c_1 \approx$

$\approx 1 + \frac{Z_K}{2Z_0}$ и повторить уточненный расчет ак-

тивного и индуктивного сопротивлений статора и ротора АТЭД.

Из опыта проектирования АТЭД мощностью 1–1,3 МВт соотношение индуктивности рассеяния фазы статора и приведенной индуктивности рассеяния фазы ротора в относительных единицах составляет 1:0,8.

Индуктивность рассеяния фазы статора ($L_{s\sigma}$, Н)

$$L_{s\sigma} = \frac{X_K}{1,8 \cdot 2\pi \cdot f_{SH}}, \quad (10)$$

здесь f_{SH} – частота напряжения статора в номинальном режиме.

Индуктивность рассеяния фазы ротора ($L'_{r\sigma}$, Н), приведенная к фазе статора, равна

$$L'_{r\sigma} = \frac{X_K \cdot 0,8}{1,8 \cdot 2\pi \cdot f_{SH}}. \quad (11)$$

Полное сопротивление фазы двигателя в режиме холостого хода (Z_0 , Ом)

$$Z_0 = \frac{U_{SH}}{\sqrt{3} I_{s0}}. \quad (12)$$

Активная составляющая тока холостого хода фазы статора (I_{s0a} , А)

$$I_{s0a} = \frac{\Delta P_{\text{ст.3/4}} + (r_s \cdot I_{s0}^2) + \Delta P_{\text{сдм}} + \Delta P_{\text{мех.н}}}{\sqrt{3} \cdot U_{SH}}. \quad (13)$$

Ток намагничивания фазы статора (I_μ , А)

$$I_\mu = \sqrt{I_{s0}^2 - I_{s0a}^2}. \quad (14)$$

Сопротивление взаимной индукции (X_μ , Ом) обмоток фазы статора и ротора рассчитываем по формуле

$$X_\mu = \frac{U_{SH}}{\sqrt{3} \cdot I_\mu} - X_{s\sigma}, \quad (15)$$

в которой $X_{s\sigma}$ – сопротивление индуктивности рассеяния фазы статора, $X_{s\sigma} = 2\pi f_{SH} L_{s\sigma}$.

Взаимная индуктивность обмотки фазы статора и ротора, приведенная к статору (L_μ , Н), равна

$$L_\mu = \frac{X_\mu}{2\pi \cdot f_{SH}}. \quad (16)$$

ТАБЛИЦА 1. Паспортные данные АТЭД «SEA-107E»

Параметры	Обозначение	Значение
Мощность номинальная, кВт	P_n	1250
Частота вращения, об/мин	n_n	1350
Номинальное линейное напряжение, В	$U_{сн}$	2150
Номинальный ток, А	$I_{сн}$	390
Коэффициент мощности при 100%-ной нагрузке	$\cos \varphi_{сн}$	0,85
КПД	η_n	0,95
Номинальная частота тока статора, Гц	$f_{сн}$	46
Число пар полюсов	p	2
Номинальное скольжение ротора	s_n	0,01

ТАБЛИЦА 2. Расчетные параметры и основные электротехнические величины АТЭД «SEA-107E»

Параметры и данные	Обозначение	Значение
Мощность потерь в меди статора при номинальной нагрузке, Вт	$\Delta P_{сн.н}$	28 108
Мощность механических потерь в режиме номинальной нагрузки, Вт	$\Delta P_{мех.н}$	2645
Мощность добавочных потерь от пространственных гармоник тока, Вт	$\Delta P_{сдм}$	6613
Мощность потерь в стали в режиме $\frac{3}{4}$ номинальной нагрузки, Вт	$\Delta P_{ст.3/4}$	15 542
Мощность потерь в меди ротора при номинальной нагрузке, Вт	$\Delta P_{р.н}$	18310
Сопротивление обмоток фазы статора, Ом	r_s	0,062
Сопротивление ротора, приведенное к сопротивлению фазы статора, Ом	r'_r	0,045
Кратность наибольшего электромагнитного момента	b_n	1,9
Полное сопротивление короткого замыкания, Ом	Z_k	0,454
Индуктивное сопротивление короткого замыкания, Ом	X_k	0,441
Индуктивное сопротивление потоков рассеяния фазы статора, Ом	$X_{с\sigma}$	0,245
Индуктивное сопротивление потоков рассеяния ротора, приведенное к фазе статора, Ом	$X'_{r\sigma}$	0,196
Индуктивность рассеяния фазы статора, Н	$L_{с\sigma}$	0,0008478
Индуктивность рассеяния фазы ротора, приведенная к фазе статора, Н	$L'_{r\sigma}$	0,0006782
Полное сопротивление фазы двигателя в режиме холостого хода, Ом	Z_0	11,211
Коэффициент приведения параметров обмоток к Т-образной схеме замещения	c_1	1,023

Окончание табл. 2

Параметры и данные	Обозначение	Значение
Ток ротора, приведенный к току статора для режима номинальной нагрузки, А	I'_{rn}	374
Ток режима холостого хода, А	I_{s0}	110,7
Активная составляющая тока холостого хода фазы статора, А	I_{s0a}	6,863
Ток намагничивания фазы статора, А	I_{μ}	110,5
Индуктивное сопротивление взаимоиндукции обмоток фазы статора и ротора, Ом	X_{μ}	10,987
Взаимная индуктивность статора и ротора, приведенная к статору (индуктивность намагничивания), Н	L_{μ}	0,038

На основании формул (10)–(16) выполнен расчет основных параметров АТЭД «SEA-107E», применяемого на электровозах «O'Z-ELR». Паспортные данные, расчетные параметры и электротехнические величины, характеризующие режимы работы АТЭД SEA-107E, приведены в табл. 1 и 2 [8–12].

Заключение

Предложен способ расчета параметров АТЭД на основании опытов холостого хода и короткого замыкания с применением метода разделения потерь в режиме номинальной нагрузки.

Получены аналитические выражения для расчета параметров и основные характеристические данные АТЭД применительно к Т-образной схеме замещения.

Приведены основные расчетные параметры и электротехнические величины, характеризующие режимы работы АТЭД серии SEA-107E электровоза серии «O'Z-ELR».

Библиографический список

1. Викулов И. П. Сравнительный анализ технических характеристик электровозов серий «O'Z-ELR» и «O'zbekiston» / И. П. Викулов, Т. М. Назирхонов //

Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2019. – Т. 16, вып. 1. – С. 68–76.

2. Плакс А. В. Системы управления электрическим подвижным составом / А. В. Плакс. – М.: Маршрут, 2005. – 358 с.

3. Плакс А. В. Новый пассажирский электровоз серии «O'Z-Y» / А. В. Плакс, Д. О. Раджибаев, Х. М. Турсунов // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2011. – № 1. – С. 237–240.

4. Андрущенко А. А. Асинхронный тяговый привод локомотивов: учеб. пособие / А. А. Андрущенко, Ю. В. Бабков, А. А. Зарифьян и др.; под ред. А. А. Зарифьяна. – М.: Учеб.-метод. центр по образованию на ж.-д. транспорте, 2013. – 413 с.

5. 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.

6. Курбасов А. С. Проектирование тяговых электродвигателей / А. С. Курбасов, В. И. Седов, Л. Н. Сорин. – М.: Транспорт, 1987. – 536 с.

7. Сыромятников И. А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей / И. А. Сыромятников; под ред. Л. Г. Мамякоянца. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 240 с.

8. Бердиев У. Т. Эксплуатация и ремонт электровозов «O'zbekiston» и «O'z-Y» / У. Т. Бердиев, И. С. Камалов, У. Ш. Исроилов, Д. О. Раджибаев. – Ташкент: MCHJ ADAD PLYUS, 2016. – 286 с.

9. Назирхонов Т. М. Имитационная модель $4q-s$ преобразователя электровоза переменного тока с асинхронным тяговым двигателем серии «UZ-ELR» / Т. М. Назирхонов // Ресурсосберегающие технологии на железнодорожном транспорте. – Ташкент : Ташкент. ин-т инженеров ж.-д. транспорта, 2019. – С. 52–54.

10. Мощный электрический локомотив с приводом переменного тока типа СКЕ2. Руководство машиниста по эксплуатации. – Ташкент : Ташкент. ин-т инженеров ж.-д. транспорта, 2014. – 120 с.

11. Бенькович Н. И. Асинхронный тяговый привод перспективного тепловоза для Восточного полигона российских железных дорог / Н. И. Бенькович, И. А. Ролле // Электроника и электрооборудование транспорта : науч.-технич. журн. – СПб. : ПГУПС, 2019. – № 2. – С. 35–38.

12. Агунов А. В. Разработка универсального комплекса для исследования работы подвески с активными элементами двухосной тележки подвижного состава / А. В. Агунов, В. В. Каверин, Е. И. Макарова, И. А. Ролле // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. – СПб. : ПГУПС, 2019. – Т. 16, вып. 1. – С. 25–30.

Дата поступления: 27.09.2019

Решение о публикации: 04.10.2019

Контактная информация:

ЯКУШЕВ Алексей Яковлевич – канд техн. наук, доцент; el_tyaga@mail.ru

НАЗИРХОНОВ Тулаган Мансурхон угли – аспирант; tolagan@mail.ru

ВИКУЛОВ Илья Павлович – канд. техн. наук, доцент; i_vikulov@mail.ru

МАРКОВ Кирилл Викторович – аспирант; k.v.markov@yandex.ru

Determination of the main parameters of an asynchronous traction electric motor

A. Ya. Yakushev, T. M. Nazirkhonov, I. P. Vikulov, K. V. Markov

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

For citation: Yakushev A. Ya., Nazirkhonov T. M., Vikulov I. P., Markov K. V. Determination of the main parameters of an asynchronous traction electric motor. *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2019, vol. 16, iss. 4, pp. 592–601. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2019-4-592-601

Summary

Objective: The parameters of traction converters and traction electric motors have an unambiguous relationship in terms of voltage level, switching frequency of power electronic devices, current ripple. The rated voltage of asynchronous traction electric motors (ATEMs) is in conformity with the voltage of the traction network, the type of inverter, and its control algorithm. The determination of ATEM parameters is necessary to create a computer simulation model that would allow reproducing electromagnetic processes in an electric traction drive and converters, as well as processing functions of the simulation findings that are adequate to the actual conditions of application of converters with various control algorithms in the traction and regenerative braking modes on electric rolling stock. **Methods:** To determine the ATEMs parameters as applied to the T-shaped equivalent circuit, the idle, short circuit, and rated load modes are used using the method of loss separation in the motor. Losses in traction converters and traction gearboxes are taken into account in accordance with the power developed by ATEMs. **Results:** A technique for calculating the ATEMs parameters based on the calculated idle and short circuit modes using the loss separation method is proposed. Analytical expressions have been obtained for calculating the main ATEMs parameters as applied to the T-shaped equivalent circuit. The

main design parameters and electrical values characterizing the operating modes of the SEA-107E ATEMs of an O'Z-ELR electric locomotive are presented. **Practical importance:** The findings can be used in a computer simulation model designed to reproduce electromagnetic processes in an electric traction drive and converters, when determining the power characteristics of an O'Z-ELR electric locomotive.

Keywords: Asynchronous traction motor, T-shaped equivalent circuit, method for calculating parameters, resistance and inductive reactance of windings.

References

1. Vikulov I.P. & Nazirkhonov T.M. Sravnitel'nyy analiz tekhnicheskikh kharakteristik elektrovozov seriy "O'Z-ELR" i "O'zbekiston" [A comparative analysis of the technical parameters of the "O'Z-ELR" and "O'zbekiston" series electric locomotives]. *Proceedings of Petersburg Transport University*. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2019, vol. 16, iss. 1, pp. 68–76. (In Russian)
2. Plaks A.V. *Sistemy upravleniya elektricheskim podvizhnym sostavom* [Control systems for electric rolling stock]. Moscow, Marshrut Publ., 2005, 358 p. (In Russian)
3. Plaks A.V., Radzhibayev D.O. & Tursunov Kh.M. Novyy passazhirskiy elektrovoz serii "O'Z-Y" [New passenger electric locomotive of the "O'Z-Y" series]. *Nauchnyye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka* [Scientific Problems of Transport of Siberia and the Far East], 2011, no. 1, pp. 237–240. (In Russian)
4. Andryushchenko A.A., Babkov Yu.V., Zarif'yan A.A. et al. *Asinkhronnyy tyagovyy privod lokomotivov* [Asynchronous traction drive of locomotives]. Uchebnoye posobiye [Training manual]. Ed. by A.A. Zarif'yan. Moscow, Training and Methodology Centre for Railway Transport Publ., 2013, 413 p. (In Russian)
5. Grishchenko A.V. & Kozachenko E.V. *Novyye elektricheskkiye mashiny lokomotivov* [New electric locomotive machines]. Ucheb. posobie dlya vuzov zh.-d. transporta [A training manual for universities of railway transport]. Moscow, Training and Methodology Centre for Railway Transport Publ., 2008, 271 p. (In Russian)
6. Kurbasov A.S., Sedov V.I. & Sorin L.N. *Proyektirovaniye tyagovykh elektrodvigatelyey* [Designing traction electric motors]. Moscow, Marshrut Publ., 1987, 536 p. (In Russian)
7. Syromyatnikov I.A. Rezhimy raboty asinkhronnykh i sinkhronnykh dvigateley [Operating modes of asynchronous and synchronous motors]. Ed. by L.G. Mamikoyants. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1984, 240 p. (In Russian)
8. Berdiyev U.T., Kamalov I.S., Isroilov U. Sh. & Radzhibayev D.O. *Ekspluatatsiya i remont elektrovozov "O'zbekiston" i "O'z-Y"* [Operation and repair of "O'zbekiston" and "O'z-Y" electric locomotives]. Tashkent, MCHJ ADAD PLYUS Publ., 2016, 286 p. (In Russian)
9. Nazirkhonov T.M. Imitatsionnaya model' 4q-s preobrazovatelya elektrovoza peremennogo toka s asinkhronnym tyagovym dvigatelem serii "UZ-ELR" [Simulation model of 4q-s AC electric locomotive converter with "UZ-ELR" asynchronous traction motor]. *Resursoberegayushchiye tekhnologii na zheleznodorozhnom transporte* [Resource-saving technologies in railway transport]. Tashkent, Tashkent Institute of Railway Engineers, 2019, pp. 52–54. (In Russian)
10. *Moshchnyy elektricheskyy lokomotiv s privodom peremennogo toka tipa CKE2* [Powerful electric locomotive with AC drive type CKE2]. Rukovodstvo mashinista po ekspluatatsii [Operator's manual]. Tashkent, Tashkent Institute of Railway Engineers, 2014, 120 p. (In Russian)
11. Ben'kovich N.I. & Rolle I.A. Asinkhronnyy tyagovyy privod perspektivnogo teplovoza dlya Vostochnogo poligona rossiyskikh zheleznykh dorog [Asynchronous traction drive of a promising diesel locomotive for the Eastern Polygon of the Russian railways]. *Electronics and electrical equipment of transport: Periodic scientific and technical magazine*. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2019, no. 2, pp. 35–38. (In Russian)
12. Agunov A.V., Kaverin V.V., Makarova E.I. & Rolle I.A. Razrabotka universal'nogo kompleksa dlya issledovaniya raboty podveski s aktivnymi elementami dvukhosnoy telezhi podvizhnogo sostava

[Development of a universal complex for studying the operation of the suspension with active elements of the rolling stock biaxial trolley]. *Proceedings of Petersburg Transport University*. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2019, vol. 16, iss. 1, pp. 25–30. (In Russian)

Received: September 27, 2019

Accepted: October 04, 2019

Author's information:

Aleksey Ya. YAKUSHEV – PhD in Engineering, Associate Professor; el_tyaga@mail.ru

Tulagan M. ugli NAZIRKHONOV – Postgraduate Student; tolagan@mail.ru

Ilia P. VIKULOV – PhD in Engineering, Associate Professor; i_vikulov@mail.ru

Kirill V. MARKOV – Postgraduate Student; k.v.markov@yandex.ru

УДК 656.21

Развитие железнодорожной инфраструктуры станций в связи с реализацией инвестиционного проекта создания Северного широтного хода

А. В. Сугоровский

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

Для цитирования: *Сугоровский А. В.* Развитие железнодорожной инфраструктуры станций в связи с реализацией инвестиционного проекта создания Северного широтного хода // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2019. – Т. 16, вып. 4. – С. 602–610. DOI: 10.20295/1815-588X-2019-4-602-610

Аннотация

Цель: Предложить на примере реконструкции железнодорожной станции Кулой обоснование развития железнодорожной инфраструктуры станций участка «Коноша–Лабытнанги», необходимого в рамках проекта создания железнодорожного Северного широтного хода, предусмотренного отраслевой, региональной стратегиями, а также государственными программами Российской Федерации. **Методы:** Для достижения поставленной цели использованы теория вероятностей, математическая статистика и имитационное моделирование. **Результаты:** Для станции Кулой установлены границы продолжительности занятия приемоотправочных путей и закономерностей ее распределения, методом имитационного моделирования определено потребное путевое развитие. **Практическая значимость:** Предложенным порядком целесообразно выполнять обоснование развития железнодорожной инфраструктуры станций.

Ключевые слова: Железнодорожный путь, Северный широтный ход, путевое развитие, железнодорожная станция, имитационное моделирование, реконструкция.

Введение

Реализация проекта железнодорожного Северного широтного хода (СШХ) предусмотрена отраслевой, региональной стратегиями, а также государственными программами Российской Федерации. Проект реализуется в Ямало-Ненецком автономном округе и предполагает развитие железнодорожного СШХ по маршруту «Обская–Салехард–Надым–Пангоды–Новый Уренгой–Коротчаево» общей протяженностью 686 км (без учета подходов) [1, 2]. Проектируемая линия, с небольшими отклонениями, пройдет практически по той же трассе, что и «Великий Северный железнодорожный путь», и установит мировой рекорд по «полярности», пересекая 71-ю параллель [3, 4].

В рамках проекта будет осуществляться как новое строительство отдельных участков маршрута, так и реконструкция (усиление или достройка) уже существующих участков, включая объекты железнодорожной инфраструктуры направления «Лабытнанги–Чум–Котлас–Коноша» Северной железной дороги – филиала ОАО «РЖД» на подходах к СШХ.

Для ликвидации инфраструктурных ограничений на участке «Коноша–Котлас–Чум–Лабытнанги» потребуется выполнение комплекса мероприятий, в частности:

- строительство 8 развязок на перегонах участка «Обская–Харп-Северное Сияние–Чум»,
- строительство вторых путей общей протяженностью 238,6 км,

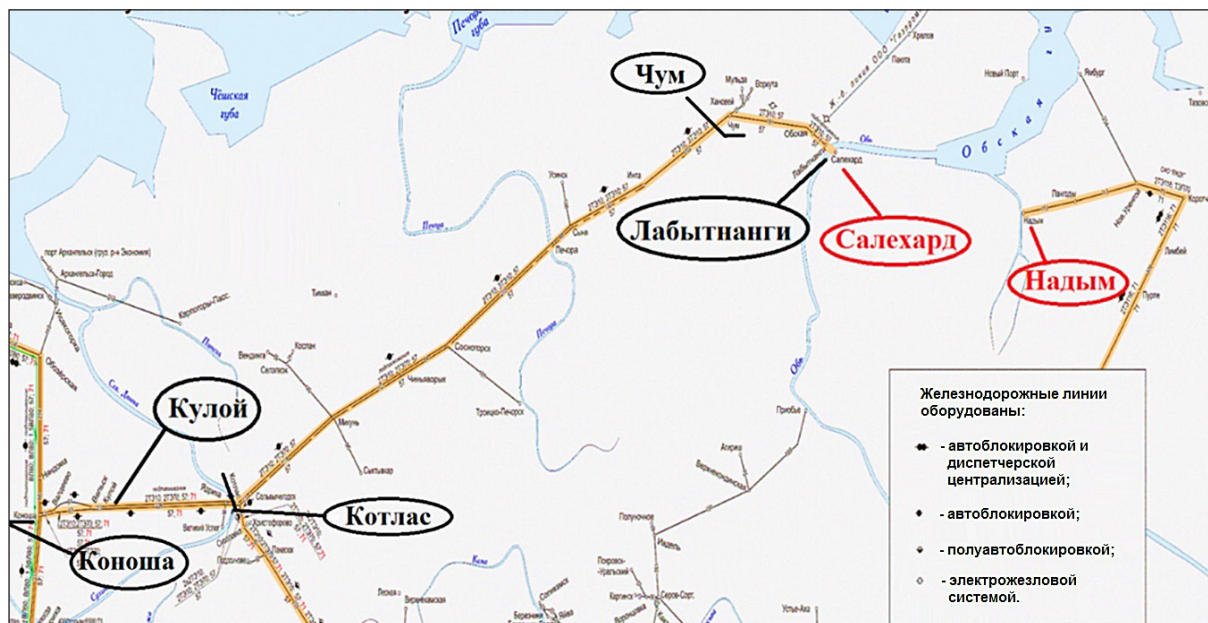


Рис. 1. Схема участка «Коноша–Котлас–Чум–Лабытнанги»

– реконструкция 8 станций (включая удлинение приемоотправочных путей до 71-го условного вагона на станциях Обская, Печора, Инта-1, Елецкая, Сольвычегодск, Кулой, Микунь, Сосногорск).

Схема участка «Коноша–Котлас–Чум–Лабытнанги» приведена на рис. 1.

В статье предложено обоснование развития железнодорожной инфраструктуры станций участка «Коноша–Лабытнанги» с применением метода имитационного моделирования на примере реконструкции железнодорожной станции Кулой. Для решения поставленной задачи требуется проанализировать технико-эксплуатационную характеристику станции и планируемый к перевозке грузопоток.

Технико-эксплуатационная характеристика станции Кулой

Станция Кулой по характеру выполняемой работы является участковой 2-го класса, расположенной на 845–847 км двухпутного участка линии «Коноша–Воркута».

В настоящее время на станции имеются 9 приемоотправочных путей, 8 из которых ис-

пользуются для приема и отправления грузовых поездов, 1 – для пассажирского движения [5]. На станции выполняются: безостановочный пропуск, прием и отправление поездов всех видов сообщений; обслуживание пассажиров; маневровая работа по формированию поездов, отцепке и прицепке вагонов; смена локомотивных бригад; расформирование/формирование грузовых поездов в соответствии с планом формирования; обработка транзитных грузовых поездов без переработки, в том числе со сменой локомотива и/или локомотивной бригады; работа с транзитными грузовыми поездами, следующими с изменением норм массы и/или длины; формирование/расформирование сборных, передаточных поездов; работа с местными вагонами, прибывающими под выгрузку или погрузку; выгрузка, погрузка вагонов; оформление перевозочных документов [6].

Прогнозный объем грузоперевозок

Согласно Генеральной схеме развития сети железных дорог ОАО «РЖД», объемы отправления грузов железнодорожным транс-

портом со станций севера Уральского федерального округа к 2020 г. достигнут 49,2 млн т (+17,9 млн т к уровню отчетного периода).

При условии реализации проекта СШХ за счет переключения отдельных грузопотоков с существующих направлений и появления новых точек их зарождения суммарный грузопоток, следующий со станций севера Уральского федерального округа по СШХ в западном направлении, в 2020 г. составит 23,1 млн т. Вместе с тем для обеспечения развития предприятий, расположенных в полигоне тяготения СШХ, на 2020 г. прогнозируется завоз материалов и оборудования по новой железнодорожной линии в восточном направлении в объеме 0,8 млн т.

Таким образом, суммарная загрузка СШХ прогнозируется на 2020 г. в объеме 23,9 млн т [7].

Существующие размеры движения по станции Кулой приняты по графику движения поездов на 2019 г. (рис. 2).

Перспективные размеры движения по станции Кулой на 2020 г. (при реализации проекта СШХ) приняты на основе данных ОАО «Институт экономики и развития транспорта» и представлены на рис. 3.

Расчет необходимого путевого развития станции Кулой для освоения перспективного поездопотока целесообразно выполнить методом имитационного моделирования.

Создание имитационной модели работы станции Кулой

Точная продолжительность занятия приемоотправочных путей станции является случайной величиной, зависящей от состояния поступающих с внешней сети вагонов, местных условий, времени ожидания локомотива и других факторов. Поэтому для ввода ее в имитационную модель необходимо определение границ, в которых находится эта слу-

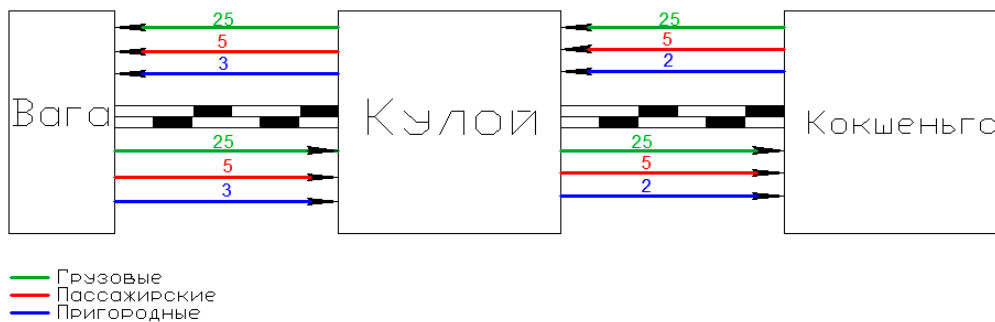


Рис. 2. Существующий поездопоток станции Кулой в 2019 г.

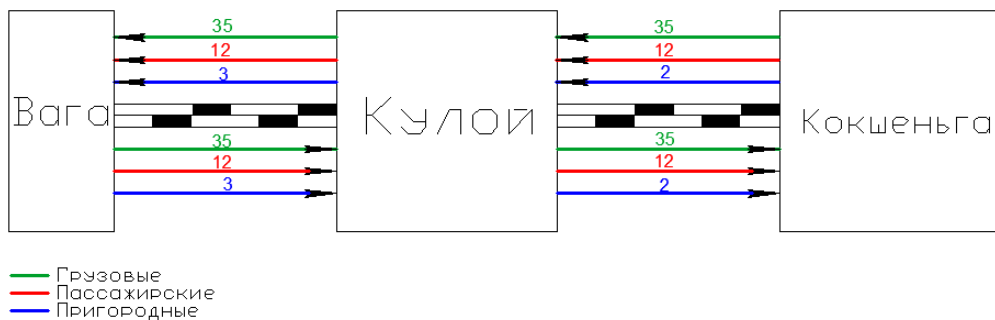


Рис. 3. Перспективный поездопоток станции Кулой

чайная величина, и закономерностей ее распределения.

Использование методов теории вероятностей и математической статистики позволяет решить поставленную задачу [8, 9].

Границы продолжительности занятия приемоотправочных путей станции могут быть установлены по *правилу трех сигм*: все данные с вероятностью 0,997 находятся в пределах $\pm 3 \cdot \sigma$ от *выборочного среднего* \bar{t} , характеризующего положение случайной величины t , которое может быть определено в результате обработки статистических данных по формуле

$$\bar{t} = \sum_{i=1}^k t_i \cdot p_i,$$

в которой t_i – значение случайной величины в i -м интервале; p_i – эмпирическая вероятность (частота) равенства случайной величины значению t_i :

$$p_i = \frac{h_i}{\sum_{i=1}^k h_i},$$

где h_i – число наблюдений случайной величины t_i ; $\sum_{i=1}^k h_i$ – общее число наблюдений; i – номер наблюдения ($i = 1, 2, \dots, k$).

Выборочное среднее, рассчитанное для *однородной* совокупности, значимо, т. е. действительно характеризует ее, для *неоднородной* совокупности – незначимо, т. е. не характеризует ее из-за значительного разброса значений признака в совокупности.

Для проверки является ли совокупность данных *однородной* или *неоднородной*, следует выполнить оценку *коэффициента вариации* V_i , характеризующего относительное рассеивание случайной величины по отношению к среднему значению:

$$V_i = \frac{\sigma_i}{\bar{t}},$$

здесь σ_i – *среднеквадратическое отклонение*, характеризующее среднее абсолютное откло-

нение случайной величины от его среднего значения:

$$\sigma_i = \sqrt{D_i},$$

где D_i – *выборочная дисперсия*, характеризующая рассеивание случайной величины около ее среднего значения:

$$D_i = \sum_{i=1}^k \bar{t}_i^2 \cdot p_i - \left(\sum_{i=1}^k \bar{t}_i \cdot p_i \right)^2.$$

В результате обработки эмпирических данных с использованием пакета прикладной программы Статистика (Statistica) построены теоретические кривые распределения вероятности продолжительности занятия приемоотправочных путей станции Кулой нечетными грузовыми поездами со сменой локомотивов (рис. 4), получены выборочное среднее – 116 мин, среднеквадратическое отклонение – 24 мин и коэффициент вариации – 0,21 (выборка однородная).

Для определения потребного путевого развития станции Кулой методом имитационного моделирования в настоящей работе применен специализированный программный комплекс «Аврора».

В созданной модели транспортной системы посредством логических цепочек описана технология работы станции Кулой, т. е. обслуживание категорий передвижений на устройствах транспортной системы. Под *категорией* передвижений понимаются поезда, которые обслуживаются устройствами транспортной системы по конкретной технологии. *Устройствами* в модели выступают отдельные элементы транспортной системы, на которых выполняются определенные технологические функции. Основной характеристикой устройства является количество *каналов*. Все каналы одного устройства выполняют одинаковые функции и взаимозаменяемы.

Имитационное моделирование дает возможность исследовать процесс функционирования системы транспортного обслуживания станции Кулой посредством варьирования

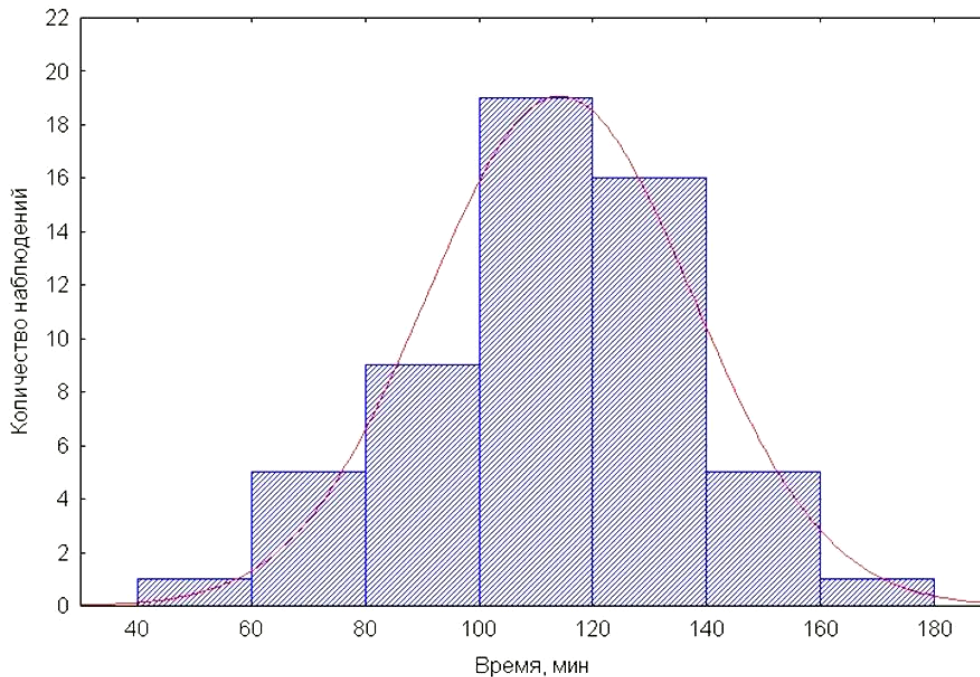


Рис. 4. Результаты аппроксимации эмпирического распределения продолжительности занятия приемоотправочных путей станции Кулой нечетными грузовыми поездами со сменой локомотивов

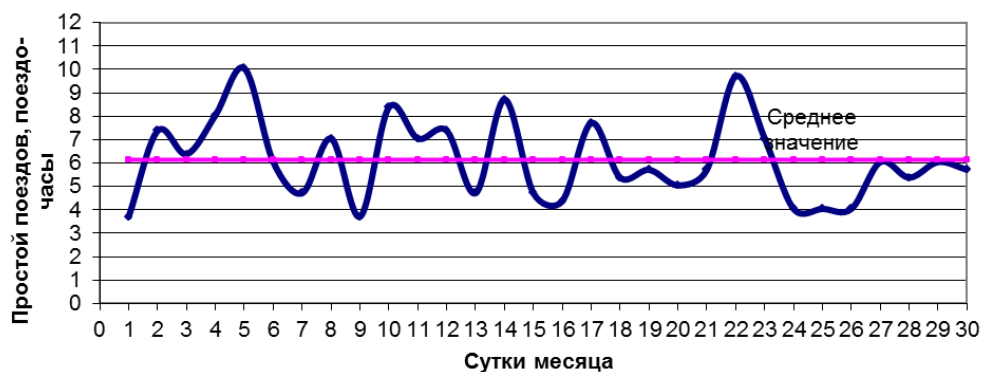


Рис. 5. График изменения простоев составов в ожидании обслуживания за 30 смежных суток

основной характеристики устройств – количества каналов, т. е. путей станции. В результате различных экспериментов с моделью транспортной системы станции Кулой установлено, что для освоения перспективного поездопотока необходимо 9 приемоотправочных путей для грузовых поездов. На рис. 5 показано, как изменяются простои составов в ожидании обслуживания за 30 смежных суток. Из него следует, что транспортная система станции Кулой работает достаточно стабильно: суммарные

задержки перед устройствами колеблются в ту и другую сторону от средних значений, но нарастания этих задержек не происходит [10].

Таким образом, для стабильной работы станции Кулой на заданные объемы работы потребуется дополнительный приемоотправочный путь для грузовых поездов.

Обоснование развития железнодорожной инфраструктуры других станций целесообразно вести вышеизложенным способом, реконструкцию – с учетом сложных инженерно-

геологических условий, обоснования этапности развития, а также с расчетом пропускной способности стрелочных горловин [11–13].

Стоит отметить, что для приведения участка «Коноша–Котлас–Чум–Лабытнанги» к единым общесетевым стандартам обращения поездов длиной в 71 условный вагон при реконструкции станций участка необходимо предусмотреть удлинение приемоотправочных путей станций до нормы полезной длины 1050 м [14, 15].

Заключение

Для развития Арктической транспортной системы «Северный морской путь–Северный широтный ход–Транссиб» предусматривается перенос грузового движения на направление «Лабытнанги–Чум–Котлас–Коноша» Северной железной дороги, обеспечение которого выполнимо за счет проведения комплекса мероприятий: реконструкции 8 станций, строительства 8 развязок.

Предложен порядок обоснования развития железнодорожной инфраструктуры станций участка «Коноша–Котлас–Чум–Лабытнанги» с применением метода имитационного моделирования на примере железнодорожной станции Кулой – одной из 8 станций, входящих в участок.

Укладка дополнительного пути и увеличение длины приемоотправочных путей до 71-го условного вагона на станции Кулой позволят освоить перспективные размеры движения. Развитие железнодорожной инфраструктуры других станций участка целесообразно обосновать так, как изложено в настоящей статье.

Библиографический список

1. Дурягин Н. Н. Арктическая железная дорога России – Северный широтный ход / Н. Н. Дурягин // Управление развитием крупномасштабных систем : материалы IX Междунар. науч.-практич. конференции «MLSD'2016». – М. : Изд-во Ин-та

проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, 2016. – С. 64–66.

2. АО «Корпорация развития» : карта проектов. – URL : <http://www.cupp.ru/karta-proekta> (дата обращения : 06.09.2019 г.).

3. Голубев А. А. Северный Широтный ход – головной участок транспортной магистрали / А. А. Голубев // Научные горизонты. – Белгород : Изд-во Индивидуальный предприниматель М. В. Всяких, 2018. – Т. 1, № 11. – С. 77–81.

4. Костенко В. В. Риск-ориентированная оценка проектных решений по отдельным пунктам Северного широтного хода / В. В. Костенко, М. В. Четчуев // Десятый международный симпозиум Eltrans 10.0, посвященный 210-летию со дня основания первого транспортного вуза России – Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I. Санкт-Петербург, 9–11 октября 2019 г. : тез. докл. : в 2 ч. – СПб. : ПГУПС, 2019. – Ч. 2. – С. 10–12.

5. Техническо-распорядительный акт железнодорожной станции Кулой Северной железной дороги – филиала ОАО «РЖД». – Утв. ДЦС-6 1 июля 2017 г. – М., 2017. – 80 с.

6. Технологический процесс работы участковой станции Кулой Северной железной дороги – филиала ОАО «РЖД». – Утв. ДЦС-6 22 ноября 2016 г. – М., 2016. – 121 с.

7. Бизнес-план : Создание Северного широтного хода «Обская–Салехард–Надым–Пангоды–Новый Уренгой–Коротчаево» и железнодорожных подходов к нему. – М. : [б. и.], 2016. – 128 с.

8. Венцель Е. С. Теория вероятностей / Е. С. Венцель. – М. : Высшая школа, 2001. – 575 с.

9. Рублева Г. В. Математическая статистика : статистические критерии проверки гипотез : учеб.-метод. пособие для студентов очной формы обучения технических и инженерных специальностей / Г. В. Рублева. – Тюмень : ТюмГУ, 2014. – 50 с.

10. Котенко А. Г. Вопросы повышения стабильности выполнения графика движения поездов / А. Г. Котенко, А. А. Грачев, А. В. Гоголева, Т. М. Шманев // Бюл. результатов науч. исследований. – 2018. – Вып. 1. – С. 59–70.

11. Бенин А. В. Реконструкция промышленных объектов в сложных инженерно-геологических условиях Северо-Запада / А. В. Бенин, Е. В. Город-

нова // Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве Российской Федерации: материалы XI Общерос. конференции изыскательских организаций. – М. : ООО «Ин-т геотехники и инженерных изысканий в строительстве», СРО Ассоциация «Инженерные изыскания в строительстве», НП «Союз изыскателей», ООО «Геомаркетинг», Общественный совет по развитию саморегулирования, Региональная общественная организация, 2015. – С. 26–29.

12. Шепель А. С. Новая методика расчета пропускной способности стрелочной горловины / А. С. Шепель // Железнодорожный транспорт. – 2019. – № 4. – С. 24–28.

13. Ефименко Ю. И. Проблемы оптимизации этапности развития станций при использовании альтернативных вариантов проектных решений / Ю. И. Ефименко, М. В. Четчуев, А. Г. Филиппов, М. В. Губарь // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. – СПб. : ПГУПС, 2018. – Т. 15, вып. 2. – С. 194–205.

14. Грошев Г. М. О разработке информационных технологий диспетчерского регулирования поездо- и вагонопотоков на железнодорожных полигонах на основе реализации экономических принципов управления / Г. М. Грошев, И. В. Кашицкий, А. В. Суторовский // Интеллектуальные системы на транспорте : материалы I Междунар. науч.-практич. конференции «ИнтеллектТранс-2011». – СПб. : ПГУПС, 2011. – С. 191–199.

15. Грошев Г. М. Обоснование с применением имитационного моделирования эффективности диспетчерского регулирования на участке / Г. М. Грошев, А. В. Суторовский, Ан. В. Суторовский // Транспортные системы и технологии (СПб.). – 2016. – Т. 2, № 2. – С. 106–109.

Дата поступления: 05.11.2019

Решение о публикации: 11.11.2019

Контактная информация:

СУГОРОВСКИЙ Артем Васильевич – канд. техн. наук, доцент; c123945@yandex.ru

The development of railway infrastructure of stations related to implementation of the investment design project for Northern Latitudinal Railway

A. V. Sugorovsky

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

For citation: Sugorovsky A. V. The development of railway infrastructure of stations related to implementation of the investment design project for Northern Latitudinal Railway. *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2019, vol. 16, iss. 4, pp. 602–610. (In Russian)

DOI: 10.20295/1815-588X-2019-4-602-610

Summary

Objective: To justify railway infrastructure development of stations at the “Konosha–Labytnangy” section by the example of the Kuloy Railway station reconstruction. The former is essential within the framework of Northern Latitudinal Railway design project, provided by sectoral and regional strategies, as well as the Russian Federation government programs. **Methods:** Probability theory, mathematical statistics, as well as simulation modeling were applied in order to achieve the stated objective. **Results:** The limits of the receiving and departure track holding period as well as distribution principles of the former were established for the Kuloy station. The required arrangement of tracks was determined by means of

simulation modeling. **Practical importance:** It is reasonable to justify the railway infrastructure development of stations by the proposed pattern.

Keywords: Railroad track, Northern Latitudinal Railway, arrangement of tracks, railway station, simulation modeling, reconstruction.

References

1. Duryagin N. N. Arkticheskaya zheleznaya doroga Rossii – Severniy shirotniy khod [Arctic railway of Russia – Northern Latitudinal Railway]. *Upravleniye razvitiyem krupnomasshtabnykh system. Materialy IX Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «MLSD'2016»* [Development control of the large-scale systems. Proceedings of the 9th International research and training conference “MLSD'2016”]. Moscow, V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of the Russian Academy of Sciences Publ., 2016, pp. 64–66. (In Russian)
2. AO “Korporatsiya razvitiya”: karta proektov [AO «Development corporation»: project map]. Available at: <http://www.cupp.ru/karta-proekta> (accessed: 06.09.2019). (In Russian)
3. Golubev A. A. Severniy shirotniy khod – golovnoy uchastok transportnoy magistraly [Northern Latitudinal Railway – traffic artery advance section]. *Nauchniye gorizonty* [Research perspective]. Belgorod, Individual entrepreneur M. V. Vsyakikh, 2018, vol. 1, no. 11, pp. 77–81. (In Russian)
4. Kostenko V. V. & Chetchuev M. V. Risk-orientirovannaya otsenka proektnykh resheniy po razdelnyim punktam Svernogo shirotnogo khoda [Risk-based assessment of project design for interstations of the Northern Latitudinal Railway]. *Desyatiy mezhdunarodniy simposium Eltrans 10.0, posvyashchenniy 210-letiyu so dnya osnovaniya pervogo transportno-go vuza Rossii – Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya Imperatora Aleksandra I, Sankt-Peterburg, 9–11 oktyabrya 2019 g.* [The 10th International symposium Eltrans 10.0, dedicated to 210th anniversary of the first Russian university of transport – Emperor Alexander I Petersburg State University of Railway Transport, St. Petersburg, October 9–11th, 2019]. Abstract. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2019, ch. 2, pp. 10–12. (In Russian)
5. *Tekhnicheskoye rasporyaditelnyy akt zheleznodorozhnoy stantsii Kuloy Severnoy zheleznoy dorogi – filiala OAO “RZhD”* [Technological instructions of Severnaya Railway Kuloy station – OAO “Russian Railways” subsidiary]. Approved by DTsS-6 on July 1st, 2017. Moscow, 2017, 80 p. (In Russian)
6. *Tekhnologicheskoye protsess raboty uchastkovoy stantsii Kuloy Severnoy zheleznoy dorogi – filiala OAO “RZhD”* [Engineering process of Severnaya Railway Kuloy station – OAO “Russian Railways” subsidiary]. Approved by DTsS-6 on November 22nd, 2016. Moscow, 2016, 121 p. (In Russian)
7. *Biznes-plan “Sozdaniye Severnogo shirotnogo khoda “Obskaya–Salekhard–Nadym–Pangody–Noviy Urengoy–Korotchaevo” i zheleznodorozhnykh podkhodov k nemu* [Business plan “The design of Northern Latitudinal Railway “Obskaya–Salekhard–Nadym–Pangody–Noviy Urengoy–Korotchaevo” and approaches to it”]. Moscow, [sine nomine], 2016, 128 p. (In Russian)
8. Ventsel E. S. *Teoriya veroyatnostey* [Probability theory]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2001, 575 p. (In Russian)
9. Rubleva G. V. *Matematicheskaya statistika: statisticheskiye kriterii proverky gipotez*. Uchebno-metodicheskoye posobiye dlya studentov ochnoy formy obucheniya tekhnicheskikh i inzhenernykh spetsialnostey [Mathematical statistics: statistical criteria of hypothesis checking. Study guide for full-time students of engineering specialities]. Tyumen, TyumGU [University of Tyumen] Publ., 2014, 50 p. (In Russian)
10. Kotenko A. G., Grachev A. A., Gogoleva A. V. & Shmanev T. M. *Voprosy povysheniya stabilnosti vypolneniya grafika dvizheniya poezdov* [Stability augmentation of train schedule fulfillment]. *Byulleten rezultatov nauchnykh issledovaniy* [Bulletin of research results], 2018, iss. 1, pp. 59–70. (In Russian)
11. Benin A. V. & Gorodnova E. V. *Rekonstruktsiya promyshlennykh obyektov v slozhnykh inzhenerno-geologicheskikh usloviyakh Severo-Zapada* [Recon-

struction of industrial facilities in severe engineering geological conditions of the North-West]. *Perspektivy razvitiya inzhenernykh izyskaniy v stroitelstve Rossiyskoy Federatsii. Materialy XI Obshcherossiyskoy konferentsii izyskatelskikh organizatsiy* [Development prospects for engineering survey in the Russian Federation building. *Proceedings of the 11th All-Russian conference of survey contractors*]. Moscow, OOO “Institute of Geotechnology and Engineering survey in buiding”, SRO [Self-Regulatory Organization] “Engineering Survey in Building” Association, NP [Non-profit Organization] “Union of investigators”, OOO “Geomarketing”, Public Council on Self-governing Development, Regional Public Organization, 2015, pp. 26–29. (In Russian)

12. Shepel A. S. Novaya metodika rasheta propusknoy sposobnosti strelochnoy gorlovinoy [New calculation procedure for carrying capacity of the lead]. *Zheleznodorozhniy transport* [Railway transport], 2019, no. 4, pp. 24–28. (In Russian)

13. Efimenko Y. I., Chetchuev M. V., Filippov A. G. & Gubar M. V. Problemy optimizatsii etapnosty razvitiya stantsiy pry ispolzovanii alternativnykh variantov proektnykh resheniy [Optimization problems of phases of railroad station development when using alternative types of project design]. *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. 194–205. (In Russian)

14. Groshev G. M., Kashitskiy I. V. & Sugorovskiy A. V. O razrabotke informatsionnykh tekhnologiy dispetcherskogo regulirovaniya poezdo- i vagonopoto- kov na zheleznodorozhnykh poligonakh na osnove realizatsii ekonomicheskikh printsipov upravleniya [The development of information technologies for supervisory control of train and car traffic volume at railway poligons based on implementation of economic principles of management]. *Intellektualniye sistemy na trans- porte. Materialy I Mezhdunaroy nauchno-prakticheskoy konferentsii “IntellektTrans-2011”* [Smart systems for transport. *Proceedings of the 1st International research and training conference “IntellektTrans-2011”*]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2011, pp. 191–199. (In Russian)

15. Groshev G. M., Sugorovskiy A. V. & Sugorovskiy An. V. Obosnovaniye s primeneniye imitatsionnogo modelirovaniya effektivnosti dispetcherskogo regulirovaniya na uchastke [Efficiency justification of supervisory control at a section by means of simulation modeling]. *Transportniye sistemy i tekhnologii* [Transport systems and technologies]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2016, vol. 2, no. 2, pp. 106–109. (In Russian)

Received: November 05, 2019

Accepted: November 11, 2019

Author’s information:

Artem V. SUGOROVSKY – PhD in Engineering, Associate Professor; c123945@yandex.ru

УДК 625.09

Управление безопасностью и культура безопасности на транспорте

Ф. И. Сухов, В. Г. Попов, Ю. К. Боландова, Е. Г. Асманкин

Российский университет транспорта (МИИТ), Российская Федерация, 127994, Москва, ул. Образцова, 9, стр. 9

Для цитирования: Сухов Ф. И., Попов В. Г., Боландова Ю. К., Асманкин Е. Г. Управление безопасностью и культура безопасности на транспорте // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2019. – Т. 16, вып. 4. – С. 611–619.
DOI: 10.20295/1815-588X-2019-4-611-619

Аннотация

Цель: В настоящее время система «Транспорт России» не в полной мере формируется в соответствии с концепцией устойчивого развития. Поэтому представлены ограничения, влияющие на систему, и рассмотрены ее основные сущности. **Методы:** Применяется международный и отечественный опыт реализации и оценки культуры безопасности, как один из возможных вариантов оценки состояния безопасности используется математический метод, разработанный авторами. **Результаты:** Установлено, что представленная методология культуры безопасности корректна для применения на транспорте. Описан новый метод оценки безопасности движения поездов. Для обеспечения безопасного и устойчивого развития системы «Транспорт России» и оценки эффективности принимаемых управленческих решений могут быть использованы разноуровневые методы оценки безопасности движения поездов, в том числе предложенные авторами. **Практическая значимость:** В России и за рубежом методология культуры безопасности успешно реализуется в атомной отрасли. Внедрение этой методологии на транспорте позволит значительно повысить безопасность перевозок.

Ключевые слова: Экологическая безопасность, обеспечение безопасности транспорта, железнодорожный транспорт, устойчивое развитие, оценка риска.

Необходимость обеспечения безопасного и устойчивого развития транспортного комплекса России до 2030 г. закреплена в Транспортной стратегии Российской Федерации [1], а также в Стратегии развития Холдинга «РЖД» [2]. В этих документах декларируется стремление обеспечить устойчивое развитие транспорта на протяжении всего его жизненного цикла.

Согласно [3], устойчивое развитие (англ. sustainable development), т. е. гармоничное (правильное, равномерное, сбалансированное) развитие, – это процесс изменений, в котором эксплуатация природных ресурсов, направление инвестиций, ориентация научно-технического развития, развитие личности

и институциональные изменения согласованы друг с другом и укрепляют современный и будущие потенциалы для удовлетворения человеческих потребностей и устремлений.

Исходя из современной концепции Организации Объединенных Наций (ООН), устойчивое развитие транспорта непосредственно связано со следующими целями устойчивого развития в целом [4]:

«Цель 9: Создание стойкой инфраструктуры, содействие всеохватной и устойчивой индустриализации и инновациям»;

«Цель 11: Обеспечение открытости, безопасности, жизнестойкости и экологической устойчивости городов и населенных пунктов»;

«Цель 12: Обеспечение перехода к рациональным моделям потребления и производства»;

«Цель 13: Принятие срочных мер по борьбе с изменением климата и его последствиями».

С некоторыми из других целей устойчивого развития, согласно классификации ООН, устойчивое развитие транспорта связано косвенным образом.

В современных условиях состояние системы транспорта не в полной мере обеспечивает его устойчивое развитие [5, 6]. Решение задачи безопасного и устойчивого развития транспорта представляет собой некоторый процесс, обеспечивающий переход от существующего состояния к желательному.

На обеспечение безопасности и устойчивого развития транспорта России влияют следующие ограничения:

<i>Внутренние:</i>	<i>Внешние:</i>
Финансовые ресурсы	Сохранение биосферы Земли
Трудовые ресурсы	Ограничения системных покупателей
Природные ресурсы	
Социальная организация	
Материальная культура	
Духовная культура	

К основным системным покупателям в системе транспорта относятся работники транспорта, государство, организации, частные лица и пассажиры как потребители услуг транспор-

та, формирующие спрос на виды и объемы перевозок пассажиров и грузов.

Внешние ограничения прежде всего связаны с состоянием социально-экономической активности людей, материальной и духовной культуры общества, законодательно-правовой базы государства, степенью интеграции его в мировое сообщество.

Согласно [7], «Транспорт России» – сложная целенаправленная система, обладающая свойством самоорганизации и состоящая из частей, типов частей, входов и выходов, выполняемых функций.

Обособленными сущностями этой системы являются:

– **Вход** – обеспечение системы ресурсами и «ценностями», необходимыми для реализации процесса;

– **Процессор** – реализация центрального функционала системы;

– **Выход** – достижение целей функционирования системы;

– **Ограничения** – внешние воздействия на систему.

В процессоре как основной сущности системы «Транспорт России» можно выделить такие элементы (подсущности) (рис. 1):

– **Управляющая система**, отвечающая за социально-организационную сферу, социальная функция [8];

– **Система связи**, обеспечение информацией процессов;

– **Управляемая система**, обеспечивающая функционирование природно-технической системы.

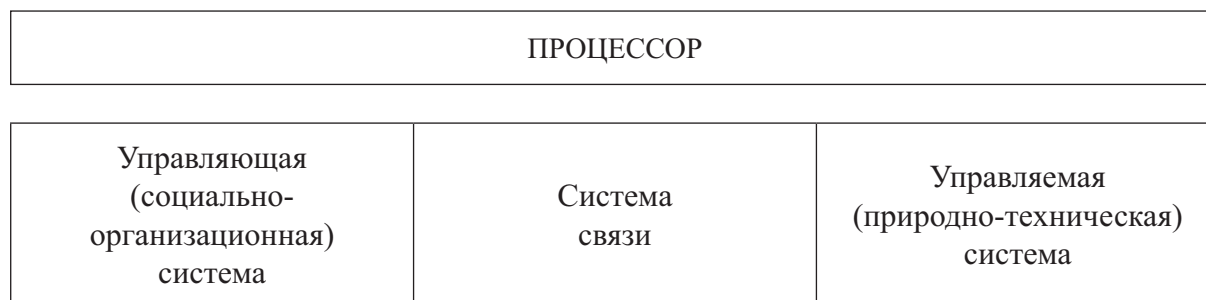


Рис. 1. Процессор системы «Транспорт России»

Все функционально обособленные сущности транспорта неразделимы и объединены потоками прямой и обратной связи в единое целое. Стоит отметить, что макроскопические подсистемы транспорта не имеют четких, формализованных, границ. У них есть область взаимного пересечения.

Для реализации стратегии устойчивого развития транспорта России [9] следует обеспечить минимальные затраты ресурсов и «ценностей» при получении максимально возможного количества произведенных «ценностей», т. е. возможности удовлетворения потребностей в перевозках как современного, так и будущих поколений страны при сохранении качества окружающей среды.

Для обеспечения реализации задач и целей устойчивого развития транспорта в России государство должно выступать гарантом по обеспечению следующих факторов:

- экономическое развитие;
- социальная справедливость;
- охрана окружающей среды.

Внутренние и внешние неблагоприятные ограничения или их сочетание, которые можно определить как угрозы развития системы «Транспорт России», могут привести не только к недостижению стратегической цели – устойчивому развитию, но и перейти в конечном итоге в такие крайне нежелательные процессы как стагнация, деградация или даже распад транспортной системы страны. В частности, в качестве примера стагнации и некоторой деградации системы «Транспорт России» можно указать период активных общественно-политических преобразований на рубеже XX–XXI вв. [10].

Согласно [11], безопасность – состояние защищенности жизненно важных интересов личности, общества и государства от внутренних и внешних угроз. Безопасность транспорта России в рамках Стратегии устойчивого развития должна обеспечиваться не как защитные мероприятия, а как самоподдерживающийся процесс, который уменьшает существующие угрозы и не порождает новые [12], т. е. устойчивое развитие транспорта должно органиче-

ски включать в себя обеспечение безопасности, а безопасность транспорта будет обеспечиваться через его устойчивое развитие.

Безопасность транспорта России должна пронизывать все сферы деятельности транспорта и все объектно-выраженные элементы.

Обеспечение безопасности транспорта России является видом деятельности (процессом), при котором человек (субъект) воздействует на объект управления с целью ограничения или устранения существующих и предотвращению потенциальных угроз. Целенаправленное, осторожное и соразмерное возникающей проблеме безопасности воздействие человека на объект управления напрямую зависит от социальной установки (аттитюда – отношение) – предрасположенности человека воспринимать проблему безопасности определенным образом и действовать самым безопасным способом в отношении объекта. Такой подход к обеспечению безопасности в современной литературе получил название «культура безопасности» [13–15].

Субъектами культуры безопасности можно считать всех участников процесса функционирования и развития транспорта России. В их число входят работники транспорта и конечные пользователи услуг транспорта, в том числе и пассажиры [16].

Стоит отметить, что для полноценного функционирования системы «Транспорт России» в рамках разработанной стратегии с использованием подхода «Культура безопасности» важна как управленческая деятельность, основанная на цикле Деминга, так и система оценки безопасности движения.

Анализ безопасности должен проводиться на всех этапах жизненного цикла технического средства – от подготовки технического задания на его разработку, предпроектные и проектные работы, процесс изготовления и завершая процессом его эксплуатации и последующей утилизации [17]. Для полноценного анализа необходимо использовать не только фактические данные о безопасности движения, но и выполнять прогнозы, применяя при этом различные методы моделирования. Пол-

ный жизненный цикл безопасности, согласно [18], представлен на рис. 2.

Анализ фактического состояния безопасности на железнодорожном транспорте основывается на общем числе нарушений безопасности движения (НБД), которые представляют собой сумму всех происшествий, перечисленных в [19, 20] и произошедших за год. Методы математического моделирования (прогнозирования) базируются на тех же данных.

В Европейском Союзе оценка надежности и безопасности технических систем на евро-

пейских железных дорогах производится с использованием комплекса показателей RAMS (Reliability, Availability, Maintainability, Safety), которые тесно взаимосвязаны друг с другом [21]. Согласно этому стандарту, определение уровня риска по каждому из факторов позволяет получить комплексный показатель. Для численной оценки уровня риска, а также для формирования требований по безопасности в методологии RAMS применяется шкала уровней опасности. Величина стандартного или целевого уровня опасности принимается как

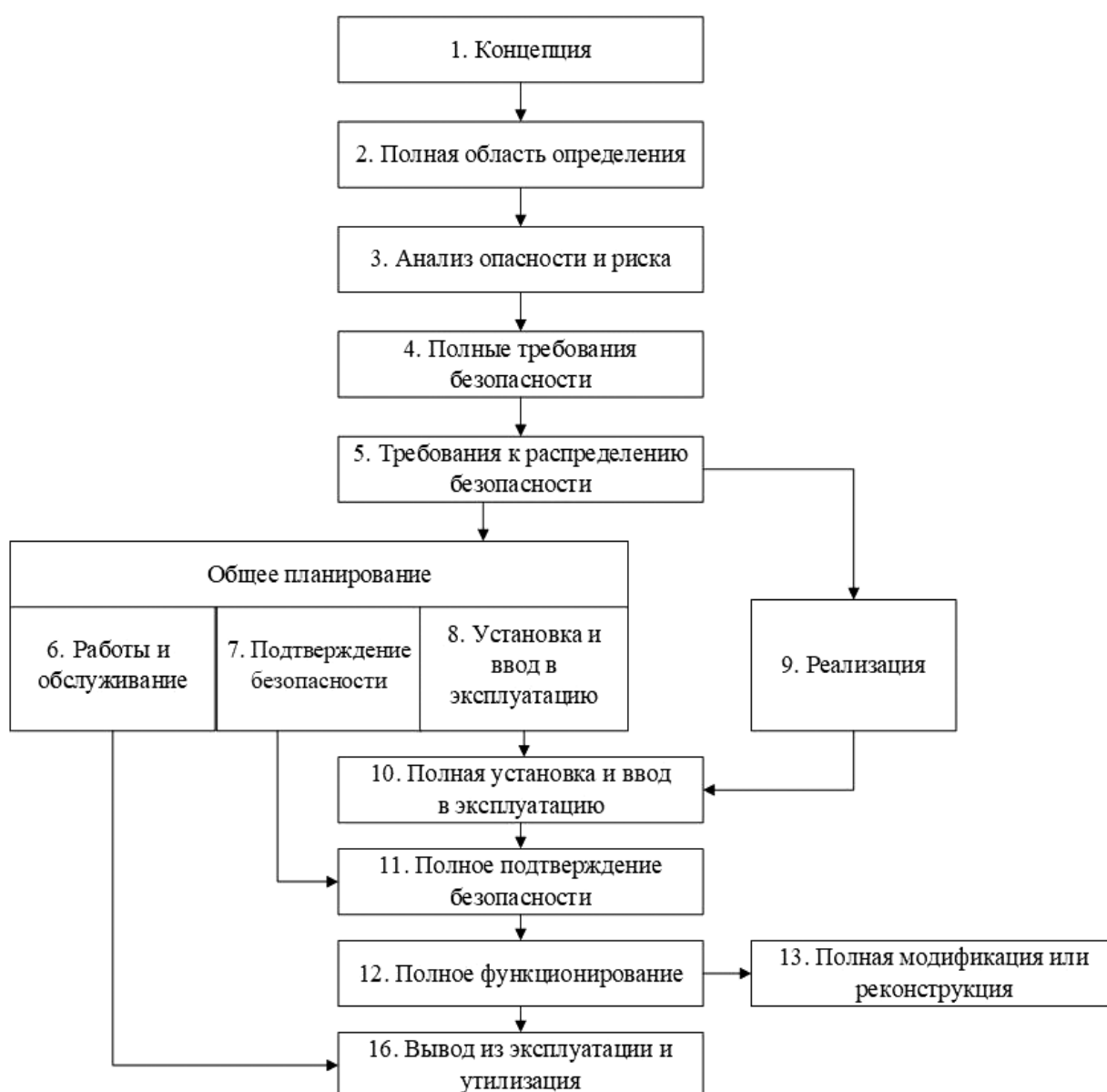


Рис. 2. Полный жизненный цикл безопасности движения [18]

один смертельный случай на 1 млн человек в год (10^{-6}) [22].

Вопросы обеспечения безопасности рассматриваются разными авторами [23, 24]. Решение прикладной задачи управления и прогнозирования риска в процессе движения поезда по определенному маршруту предложено в работе [25]. В ней эколого-экономическая оценка риска возникновения нежелательного события B_i при транспортировке нефти и нефтепродуктов по конкретному маршруту производится по формуле

$$R_{ЭК}(B_i) = R_M(B_i) \cdot \sum_{k=1}^3 P_k(B_i) \cdot Y_k(B_i),$$

в которой $P_k(B_i)$ – вероятность реализации k -го ($k = 1, 2, 3$) сценария развития аварийного происшествия, квалифицируемого как событие B_i (крушение, авария, особый брак в работе), для грузовых поездов, перевозящих нефть и нефтепродукты; $Y_k(B_i)$ – эколого-экономический ущерб от реализации k -го ($k = 1, 2, 3$) сценария аварийного происшествия.

Для комплексной оценки уровня безопасности можно использовать индекс уровня безопасности движения [26], общий вид которого можно представить как

$$U_{БД} = -\frac{\sum_{k=1}^{k=N} \Omega_k \ln \Omega_k}{\ln W} \times [1 - \exp(-\Gamma_{пр} / \Gamma_{пр0})],$$

где W – полный объем представителей видов НБД во всех отделах bk ; $\Gamma_{пр}$ – приведенная грузонапряженность (млрд т·км брутто в год на 1 км эксплуатационной длины железных дорог); $\Gamma_{пр0}$ – базовое значение приведенной грузонапряженности.

Таким образом, обеспечение безопасного и устойчивого развития системы «Транспорт России» возможно с учетом культуры безопасности; вместе с тем для оценки эффективности принимаемых управленческих решений необходимо применение разноуровневых методов оценки безопасности движения поездов.

Библиографический список

1. Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 года. – Утв. распоряжением Правительства Российской Федерации от 22 ноября 2008 г. № 1734-р.
2. Стратегия развития Холдинга «РЖД» на период до 2030 года. – Утв. советом директоров ОАО «РЖД» 20 декабря 2013 г.
3. Академик. – URL : <https://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/16886#.D0.9B.D0.B8.D1.82.D0.B5.D1.80.D0.B0.D1.82.D1.83.D1.80.D0.B0> (дата обращения : 17.03.2019 г.).
4. Сайт Организации Объединенных Наций. – URL : <https://www.un.org/sustainabledevelopment/ru/sustainable-development-goals/> (дата обращения : 17.03.2019 г.).
5. Гришаева Ю. М. Устойчивое развитие транспорта в городах России : Опыт и актуальные задачи / Ю. М. Гришаева, О. Ю. Матанцева, И. В. Спирин и др. // Юг России : экология, развитие. – 2018. – Т. 13, № 4. – С. 24–48.
6. Бевзюк Е. А. Проблемы устойчивого развития транспорта / Е. А. Бевзюк // Право и государство : теория и практика. – 2006. – № 3. – С. 99–104.
7. Гуд Г. Х. Системотехника. Введение в проектирование больших систем / Г. Х. Гуд, Р. Э. Макол ; пер. с англ. К. Н. Трофимова ; под ред. Г. Н. Поварова. – М. : Сов. радио, 1962. – 383 с.
8. Keller A. G. Societal evolution; a study of the evolutionary basis of the science of society / A. G. Keller. – М. : Оникс, 2012. – 359 р.
9. Попов В. Г. Выбор стратегии энерго- и ресурсосбережения в рамках экологической политики организации / В. Г. Попов, Ф. И. Сухов, Ю. А. Чамова // Безопасность жизнедеятельности. – 2016. – № 2 (182). – С. 31–35.
10. Транспорт России : застой и деградация : докл. Ин-та глобализации и социальных движений (ИГСО). – URL : http://www.finansy.ru/t/post_1313312251.html (дата обращения : 17.03.2019 г.).
11. Федеральный закон «О безопасности» от 05.03.1992 г. № 2446-1.
12. Урсул А. Д. Перспективы безопасного будущего цивилизации / А. Д. Урсул, А. Л. Романович // Вестн. РАЕН. – 2002. – № 4. – С. 27–33.

13. МАГАТЭ. Культура безопасности. – Сер. изданий по безопасности. № 75-INSAG-4. – М. : МАГАТЭ, 1991.
14. Машин В. А. Культура безопасности : анализ коренных причин / В. А. Машин // Электрические станции. – 2018. – № 11. – С. 2–14.
15. Обознов А. А. Культура безопасности на железнодорожном транспорте / А. А. Обознов, Ю. В. Бессонова, Д. Л. Петрович, Е. С. Енина, В. В. Сериков // Человеческий фактор : проблемы психологии и эргономики. – 2014. – № 4 (71). – С. 45–52.
16. Обознов А. А. Культура безопасности пассажиров общественного транспорта / А. А. Обознов, Ю. В. Бессонова, Д. Л. Петрович // Организационная психология и психология труда (Ин-т психологии Российской академии наук). – 2016. – Т. 1, № 1. – С. 200–226.
17. Теория безопасности движения поездов. – URL : <http://www.1520mm.ru/catastrophe/main.phtml> (дата обращения : 17.03.2019 г.).
18. Шубинский И. Б. Методы обеспечения функциональной безопасности движения поездов с учетом использования гармонизированных стандартов / И. Б. Шубинский. – Лондон, 2008. – 40 с.
19. Положение об организации расследования и учета транспортных происшествий и иных событий, связанных с нарушением правил безопасности движения и эксплуатации железнодорожного транспорта на инфраструктуре ОАО «РЖД» (Распоряжение ОАО «РЖД» от 21 августа 2017 г. № 1697р) // Справочно-поисковая система «Консультант+» (дата обращения : 17.03.2019 г.).
20. Положение о порядке учета транспортных происшествий и иных событий, связанных с нарушением правил безопасности движения и эксплуатации железнодорожного транспорта на инфраструктуре ОАО «РЖД», в автоматизированной системе управления безопасностью движения (Распоряжение ОАО «РЖД» от 17 ноября 2015 г. № 2703 р) // Справочно-поисковая система «Консультант +» (дата обращения : 17.03.2019 г.).
21. CENELEC – EN 50126-1. Railway Applications – The Specification and Demonstration of Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS). – Pt 1: Generic RAMS Process. Стандарт EN 50126 (CENELEC). – URL : <https://standards.globalspec.com/std/10262901/EN%2050126-1> (дата обращения : 17.03.2019 г.).
22. Красковский А. Е. Комплексная оценка рисков для безопасности движения / А. Е. Красковский, Д. И. Рогоза, П. А. Плеханов // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. – СПб. : ПГУПС 2011. – Вып. 1. – С. 54–65.
23. Аксенов В. А. Перспективные экологически безопасные шумо-, виброзащитные материалы для пассажирских вагонов локомотивной тяги / В. А. Аксенов, О. С. Юдаева, О. Г. Егорова, А. С. Гладаренко // Изв. Транссиба. – Омск : Омск. гос. ун-т путей сообщения, 2014. – № 2 (18). – С. 95–100.
24. Аксенов В. А. Пути повышения эффективности содержания объектов инфраструктуры железных дорог / В. А. Аксенов, А. М. Завьялов // Изв. Транссиба. – Омск : Омск. гос. ун-т путей сообщения, 2013. – № 2 (14). – С. 113–117.
25. Попов В. Г. Оценка риска от аварийных происшествий / В. Г. Попов, Ф. И. Сухов, С. В. Петров // Мир транспорта. – 2012. – № 6 (44). – С. 150–155.
26. Popov V. Traffic safety management based on integrated assessment of safety level / V. Popov, Ph. Sukhov, V. Filippov // MATEC Web Conference Siberian Transport Forum TransSiberia–2018 (Omsk). – 2018. – Vol. 239. – URL : https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/abs/2018/98/mateconf_ts2018_02003/mateconf_ts2018_02003.html (дата обращения : 17.03.2019 г.).

Дата поступления: 05.11.2019

Решение о публикации: 12.11.2019

Контактная информация:

СУХОВ Филипп Игоревич – канд. техн. наук, доцент; philipp.sukhov@mail.ru

ПОПОВ Владимир Георгиевич – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой; vropov_miit@mail.ru

БОЛАНДОВА Юлия Константиновна – ассистент; jbolandova@gmail.com

АСМАНКИН Евгений Геннадьевич – ассистент; asman08@yandex.ru

Safety management and safety culture in transport

F. I. Sukhov, V. G. Popov, Yu. K. Bolandova, E. G. Asmankin

Russian University of Transport (MIIT), 9, Bldg. 9, Obraztsova ul., Moscow, 127994, Russian Federation

For citation: Sukhov F. I., Popov V. G., Bolandova Yu. K., Asmankin E. G. Safety management and safety culture in transport. *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2019, vol. 16, iss. 4, pp. 611–619. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2019-4-611-619

Summary

Objective: Currently, the Transport of Russia system is not exactly developing in accordance with the concept of sustainable development; therefore, the restrictions affecting the system will be described and its main notions will be considered. **Methods:** The international and domestic experience of the implementation and assessment of the safety culture is used. A mathematical method developed by the authors is used as one of the possible options for assessing the state of safety. **Results:** It has been established that the described safety culture methodology is correct for use in transport. A new method for assessing the train traffic safety is proposed. To ensure the safe and sustainable development of the Transport of Russia system and to evaluate the effectiveness of managerial decisions made, multilevel methods for assessing the train traffic safety can be used, including those discussed in the article. **Practical importance:** In Russia and abroad, the safety culture methodology is being successfully implemented in the nuclear power sector. The introduction of this methodology in transport will significantly improve the traffic safety.

Keywords: Environmental safety, ensuring the transport safety, railway transport, sustainable development, risk assessment.

References

1. *Transport Strategy of the Russian Federation through 2030*. Approved by Decree of the Government of the Russian Federation N 1734-r (1734-p) dated November 22, 2008. (In Russian)

2. *Development Strategy of Russian Railways Holding for the period until 2030*. Approved by the Board of Directors of JSC RZD as of December 20, 2013. (In Russian)

3. *Academic*. Available at: <https://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/16886#.D0.9B.D0.B8.D1.82.D0.B5.D1.80.D0.B0.D1.82.D1.83.D1.80.D0.B0> (accessed: 17.03.2019). (In Russian)

4. *United Nations website*. Available at: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/ru/sustainable-development-goals/> (accessed: 17.03.2019). (In Russian)

5. Grishayeva Yu. M., Matantseva O. Yu., Spirin I. V. et al. *Ustoychivoye razvitiye transporta v gorodakh*

Rossii: Opyt i aktual'nyye zadachi [Sustainable development of transportation in the cities of Russia: Experience and priorities]. *South of Russia: ecology, development*, 2018, vol. 13, no. 4, pp. 24–48. (In Russian)

6. Bevzyuk E. A. *Problemy ustoychivogo razvitiya transporta* [Problems of sustainable development of transport]. *Law and State: The Theory and Practice*, 2006, no. 3, pp. 99–104. (In Russian)

7. Goode H. H. & Machol R. E. *Sistemotekhnika. Vvedenie v proektirovaniye bol'shykh sistem* [System Engineering. An Introduction to the design of large-scale systems]. Moscow, Sovetskoye Radio Publ., 1962, 383 p. (In Russian)

8. Keller A. G. *Societal evolution; a study of the evolutionary basis of the science of society*. Moscow, Oniks Publ., 2012, 359 p.

9. Popov V. G., Sukhov F. I. & Chamova Yu. A. *Vybor strategii energo- i resursosberezheniya v ramkakh ekologicheskoy politiki organizatsii* [Choosing the

energy and resource conservation strategies in the framework of the environmental policy of an organization]. *Safety of life activity*, 2016, no. 2 (182), pp. 31–35. (In Russian)

10. *Transport of Russia: stagnation and degradation*. Report of the Institute of Globalization and Social Movements (IGSO). Available at: http://www.finansy.ru/t/post_1313312251.html (accessed: 17.03.2019). (In Russian)

11. *Federal Law of RF “On Safety”* dated March 05, 1992, no. 2446-I. (In Russian)

12. Ursul A. D. & Romanovich A. L. Perspektivy bezopasnogo budushchego tsivilizatsii [Prospects for a safer future of civilization]. *Bulletin of the Russian Academy of Natural Sciences*, 2002, no. 4, pp. 27–33. (In Russian)

13. *IAEA. Safety culture*. Safety series, no. 75-IN-SAG-4. Moscow, IAEA Publ., 1991. (In Russian)

14. Mashin V. A. Kul'tura bezopasnosti: analiz korennykh prichin [Safety culture: analysis of root causes]. *Electrical stations*, 2018, no. 11, pp. 2–14. (In Russian)

15. Oboznov A. A., Bessonova Yu. V., Petrovich D. L., Enina E. S. & Serikov V. V. Kul'tura bezopasnosti na zheleznodorozhnom transporte [Safety culture in railway transport]. *Human Factors: Problems of Psychology and Ergonomics*, 2014, no. 4 (71), pp. 45–52. (In Russian)

16. Oboznov A. A., Bessonova Yu. V. & Petrovich D. L. Kul'tura bezopasnosti passazhirov obshchestvennogo transporta [Safety culture of public transport passengers]. *Organizational Psychology and Psychology of Labor*, 2016, vol. 1, no. 1, pp. 200–226. (In Russian)

17. *Teoriya bezopasnosti dvizheniya poyezdov* [Theory of train traffic safety]. Available at: <http://www.1520mm.ru/catastrophe/main.phtml> (accessed: 17.03.2019). (In Russian)

18. Shubinskiy I. B. *Metody obespecheniya funktsional'noy bezopasnosti dvizheniya poyezdov s uchedom ispol'zovaniya garmonizirovannykh standartov* [Methods for ensuring functional safety of train traffic taking the harmonized standards into account]. London, 2008, 40 p.

19. Regulation on the organization of investigation and registration of traffic accidents and other events related to violation of the traffic safety and railway transport operation rules in the infrastructure of JSC Russian Railways (Order of JSC RZD dated August 21, 2017, N 1697r (1697 p)). *ConsultantPlus legal reference information system* (accessed: 17.03.2019). (In Russian)

20. Regulation on the procedure for registration of traffic accidents and other events related to violation of the traffic safety and railway transport operation rules in the infrastructure of JSC Russian Railways in the automated traffic safety management system (Order of JSC RZD dated Tuesday, November 17, 2015, N 2703r (2703 p)). *ConsultantPlus legal reference information system* (accessed: 17.03.2019). (In Russian)

21. *CENELEC – EN 50126-1. Railway Applications – The Specification and Demonstration of Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS). Pt 1: Generic RAMS Process Standart EN 50126 (CENELEC)*. Available at: <https://standards.global-spec.com/std/10262901/EN%2050126-1> (accessed: 17.03.2019).

22. Kraskovskiy A. E., Rogoza D. I. & Plekhanov P. A. Comprehensive risk assessment for traffic safety. *Proceedings of Petersburg Transport University*. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2011, iss. 1, pp. 54–65. (In Russian)

23. Aksenov V. A., Yudayeva O. S., Egorova O. G. & Gladarenko A. S. Perspektivnyye ekologicheski bezopasnyye sh·chmo-, vibrozashchitnyye materialy dlya passazhirskikh vagonov lokomotivnoy tyagi [Promising environmentally friendly noise and vibration protection materials for locomotive passenger cars]. *Izvestia Transsiba* [Journal of Transsib Railway Studies]. Omsk, Omsk State Transport University, 2014, no. 2 (18), pp. 95–100. (In Russian)

24. Aksenov V. A. & Zav'yalov A. M. Puti povyshe-niya effektivnosti soderzhaniya ob"yektov infrastruktury zheleznykh dorog [Methods to improve the efficiency of the railway infrastructure facilities maintenance]. *Izvestia Transsiba* [Journal of Transsib Railway

Studies]. Omsk, Omsk State Transport University, 2013, no. 2 (14), pp. 113–117. (In Russian)

25. Popov V. G., Sukhov F. I. & Petrov S. V. Otsenka riska ot avariynykh proisshestviy [Risk assessment for accidents]. *World of Transport*, 2012, no. 6 (44), pp. 150–155. (In Russian)

26. Popov V., Sukhov Ph. & Filippov V. Traffic safety management based on integrated assessment of safety level. *MATEC Web Conference Siberian Transport Forum TransSiberia–2018* (Omsk), 2018, vol. 239. Available at: https://www.matec-conferences.org/articles/matecconf/abs/2018/98/matecconf_ts2018_02003/matecconf_ts2018_02003.html (accessed: 17.03.2019).

Received: November 05, 2019

Accepted: November 12, 2019

Author's information:

Philipp I. SUKHOV – PhD in Engineering, Associate Professor; philipp.sukhov@mail.ru

Vladimir G. POPOV – D. Sci. in Engineering, Professor, Head of the Department; vpopov_miit@mail.ru

Julia K. BOLANDOVA – Assistant; jbolandova@gmail.com

Evgenii G. ASMANKIN – Assistant; asman08@yandex.ru

УДК 621.313.33

Разработка нейросетевой модели для диагностики состояния локомотивного асинхронного электродвигателя

О. Р. Хамидов

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

Для цитирования: Хамидов О. Р. Разработка нейросетевой модели для диагностики состояния локомотивного асинхронного электродвигателя // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2019. – Т. 16, вып. 4. – С. 620–630.

DOI: 10.20295/1815-588X-2019-4-620-630

Аннотация

Цель: Оценка технического состояния асинхронных тяговых электродвигателей (АТЭД) локомотивов. **Методы:** Используются методы интеллектуального анализа данных для контроля и диагностики технического состояния АТЭД локомотивов. Предложено аналитическое исследование АТЭД в программной среде MATLAB/Simulink. **Результаты:** Показано, что одной из наиболее динамично развивающихся является теория систем искусственного интеллекта, а именно технология нейронных сетей, позволяющая решать широкий спектр задач: от распознавания режима работы АТЭД до восстановления потерянной информации с информационных каналов в условиях бортовой реализации объекта, которые обладают важными положительными свойствами, например, такими как быстроедействие, обучаемость, аппроксимационные свойства и т. д. Представлена разработанная нейросетевая модель для оценки технического состояния АТЭД локомотивов, 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 позволяют проанализировать несимметричные режимы переменных состояний АТЭД локомотивов.

Ключевые слова: Экспертные системы, диагностика, асинхронный тяговый электродвигатель, современные интеллектуальные методы, нейронные сети, неисправности локомотивов.

Введение

В настоящее время применение искусственных нейронных сетей (ИНС) является одной из наиболее динамично развивающихся областей искусственного интеллекта [1–3]. Она успешно внедрена в различных областях науки и техники, таких как распознавание образов, системы диагностики разных сложных технических объектов, экология и наука об окружающей среде, построение математических моделей, описывающих климатические

характеристики, биомедицинские приложения и др.

Проведенные результаты анализа показали [1, 4–6], что для оценки технического состояния локомотивных асинхронных тяговых электродвигателей (АТЭД) необходимо использовать новые подходы к решению задачи идентификации (аппроксимации функций), которые позволяют распараллеливать алгоритмы вычислений для увеличения скорости расчета, а также разработанные модели. Поэтому перспективным подходом является

применение теории систем искусственного интеллекта, а именно технологии ИНС, которые позволяют решать широкий спектр задач: от распознавания режима работы АТЭД до восстановления потерянной информации с информационных каналов в условиях бортовой реализации объекта.

Искусственные нейронные сети – универсальные аппроксиматоры [6–8], способные эффективно и качественно решать задачи контроля и диагностики технического состояния локомотивных АТЭД. Перспективы использования ИНС в условиях бортовой реализации на локомотиве качественно по-новому позволят осуществлять процесс контроля параметров АТЭД.

Основные этапы методики построения искусственной нейросетевой модели включают: анализ данных на начальном этапе постановки задачи и выбора архитектуры ИНС; преобразование данных для построения более эффективной процедуры настройки ИНС; выбор архитектуры ИНС для АТЭД; выбор структуры ИНС; выбор алгоритма обучения ИНС для АТЭД локомотивов; тестирование и обучение ИНС; анализ точности нейросетевого решения для АТЭД; принятие решения о техническом состоянии АТЭД локомотивов на основе полученных результатов.

К главным задачам диагностики локомотивных АТЭД относятся определение текущего состояния и прогнозирование изменения технического состояния локомотивных АТЭД в зависимости от наработки. Для решения этих задач могут быть использованы модели, различные по методам построения и применения, в том числе ИНС [1, 4, 8–13].

ИНС строятся по принципам организации и функционирования их биологических аналогов, которые способны решать широкий круг задач распознавания образцов, идентификации, прогнозирования, оптимизации управления сложными объектами. Повышение производительности компьютеров все в большей мере связывают с ИНС, в частности нейрокompьютерами [1, 2, 5]. ИНС можно разделить на два больших класса, в зависимости

от количества слоев в сети: однослойные и многослойные.

Моделирование АТЭД локомотивов в программной среде MATLAB/Simulink

Реализация математической модели АТЭД осуществлялась в программной среде MATLAB/Simulink. 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. Исходными служили параметры АТЭД электровозов серии «UZ-ELR». На рис. 1 представлена имитационная модель АТЭД, собранного в программной среде MATLAB/Simulink.

В настоящее время широкое распространение получило использование 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 локомотивов.

Описание нейросетевой модели

К наиболее динамично развивающимся 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

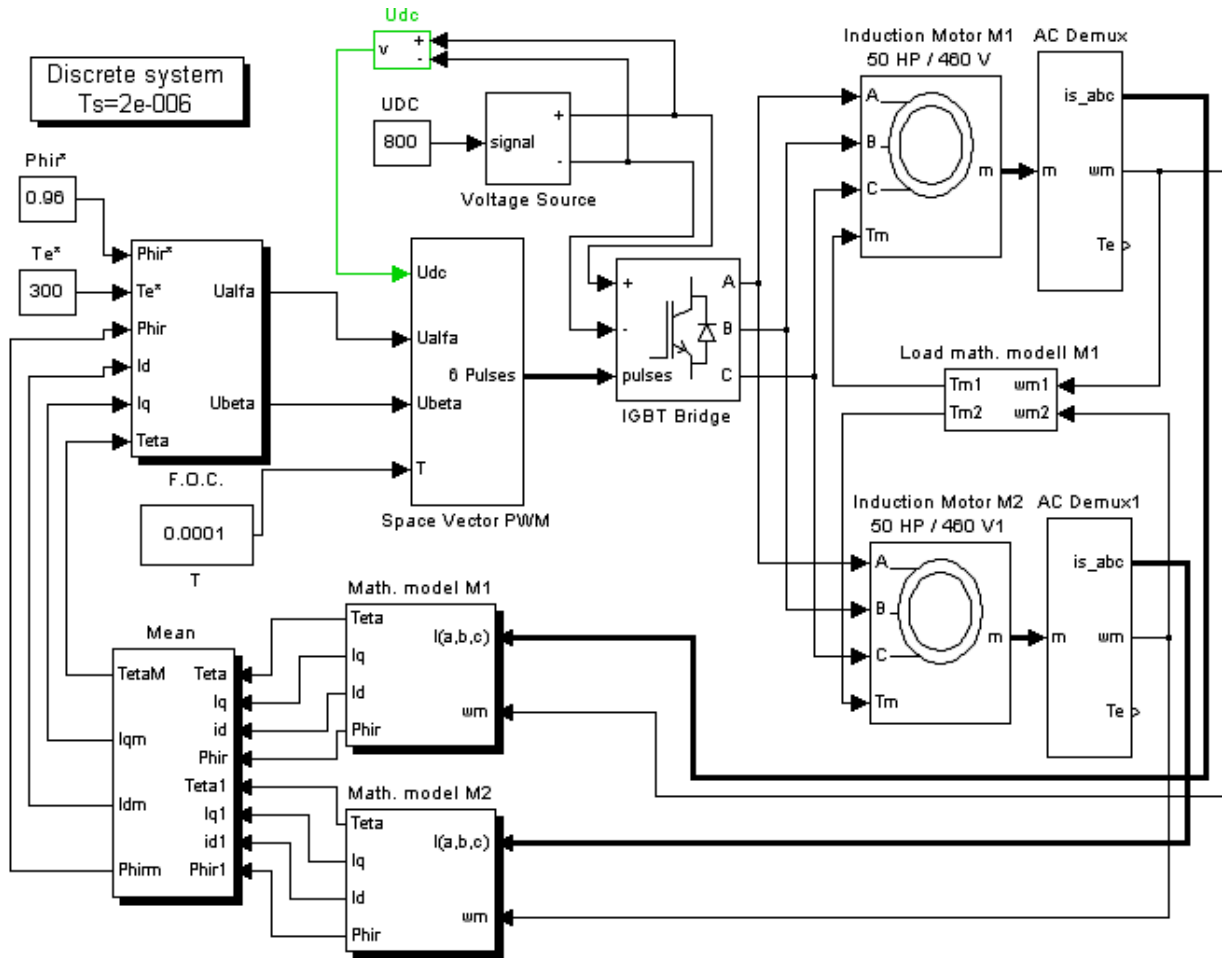


Рис. 1. Моделирование АТЭД в программной среде MATLAB/Simulink

математическими методами, а также адаптироваться к конкретному типу АТЭД.

Опишем построение модели искусственно-го нейрона. Входные сигналы X_N , поступающие на блоки, обладают собственным весовым коэффициентом W_N . По аналогии с терминологией, принятой в нейрофизиологии, будем утверждать, что возбуждательные синапсы соответствуют положительным значениям весовых коэффициентов, а тормозные синапсы – отрицательным. После проведения масштабирования с принятыми коэффициентами W_N входные сигналы искусственного нейрона суммируются на элементе сложения S , а результат сложения подвергается преобразованию с помощью активационной функции $F(S)$. В общем случае для некоторых функций активации полезным оказывается в модель нейрона включить сдвиг

b [2–4, 8]. 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. Структура нейросетевой модели для диагностики АТЭД локомотивов приведена на рис. 2.

Для нейронного анализатора АТЭД локомотивов входными данными являются ток, напряжения, угловая скорость, момент сопротивления, оцененные параметры и ошибки предикторов:

$$X = [I_A, I_B, I_C, U_A, U_B, U_C, \omega, M]^T,$$

выходными – определенный класс технического состояния АТЭД локомотивов:

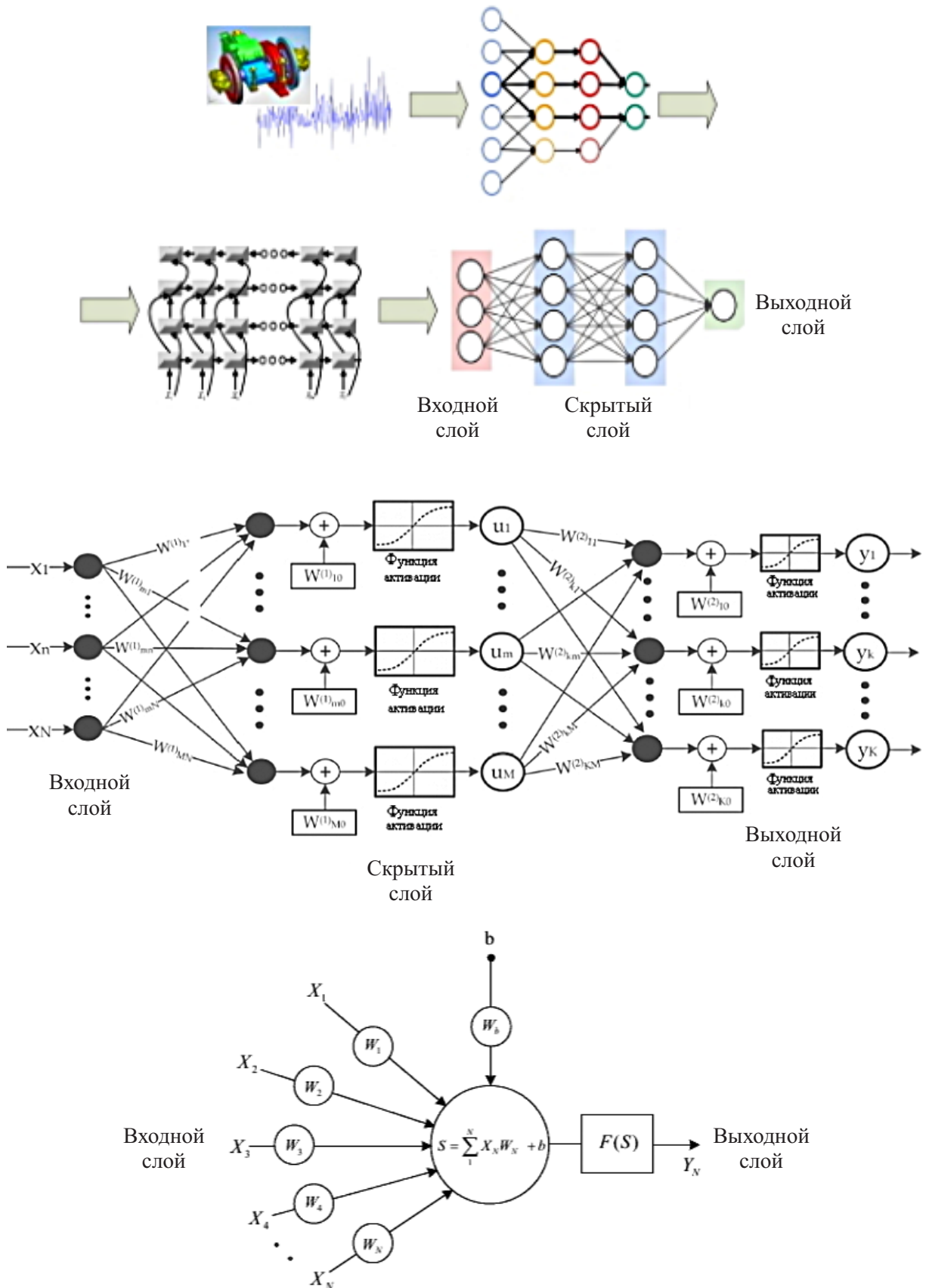


Рис. 2. Структура нейросетевой модели для оценки технического состояния АТЭД локомотивов

$$Y = [Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, Y_5, Y_6]^T,$$

где

$$Y = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T \text{ – исправен;}$$

$$Y = [0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T \text{ – перегрев;}$$

$Y = [0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0]^T$ – обрыв стержней ротора;

$Y = [0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0]^T$ – межвитковые замыкания;

$Y = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0]^T$ – пробой изоляции АТЭД;

$Y = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1]^T$ – 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, 10, 14–16]. Для реализации (обработки) этих данных, полученных при выполнении математического моделирования и оценке технического состояния АТЭД локомотивов, была использована ИНС пакета программ MATLAB/Simulink. На рис. 3 и 4 представлены спектры АТЭД.

На рис. 5–7 приведены результаты обучения ИНС при неисправности АТЭД. Из них видно, что собранная модель трехфазного АТЭД с короткозамкнутым ротором в программной среде MATLAB/Simulink позволяет анализировать несимметричные режимы переменных состояния тягового электродвигателя.

Для создания полной обучающей выборки тестовых и тренировочных данных для ИНС необходим предварительный сбор параметров локомотива с учетом широкого диапазона пространства его состояний. Эти измерения накапливаются в базе данных испытаний в течение длительного времени, потому применение ИНС дает возможность проанализировать всю совокупность результатов.

Модель трехфазного АТЭД в используемой программной среде позволяет анализировать несимметричные режимы переменных состояния электродвигателя.

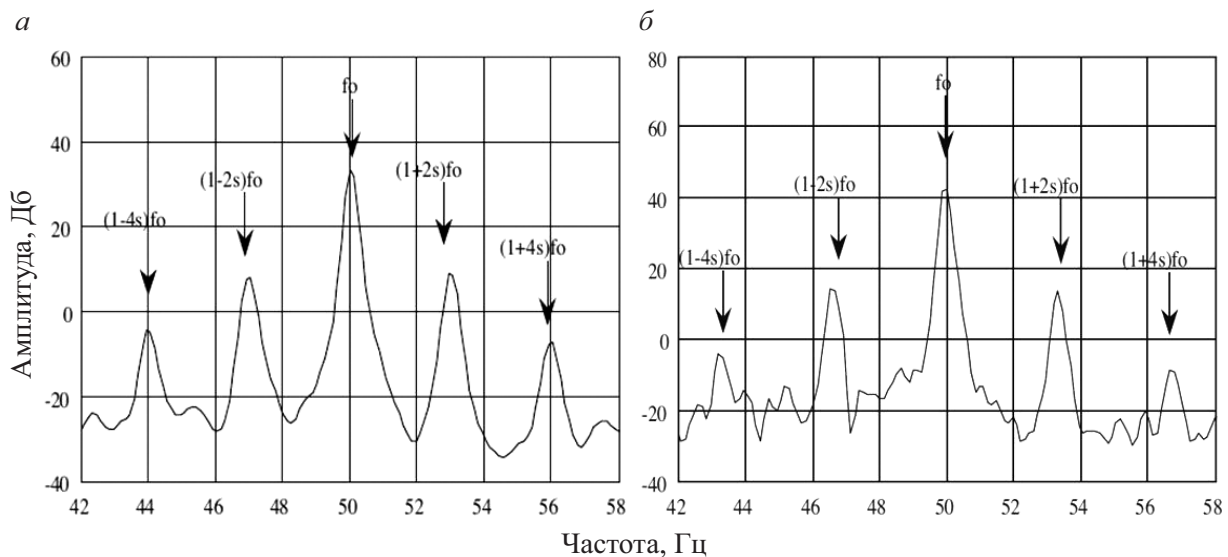


Рис. 3. Спектр тока при полной нагрузке одного обрыва стержня ротора с двумя обрывами стержней, показывающими $(1 \pm 2s)fs$ (а) и $(1 \pm 4s)fs$ (б) боковых полос

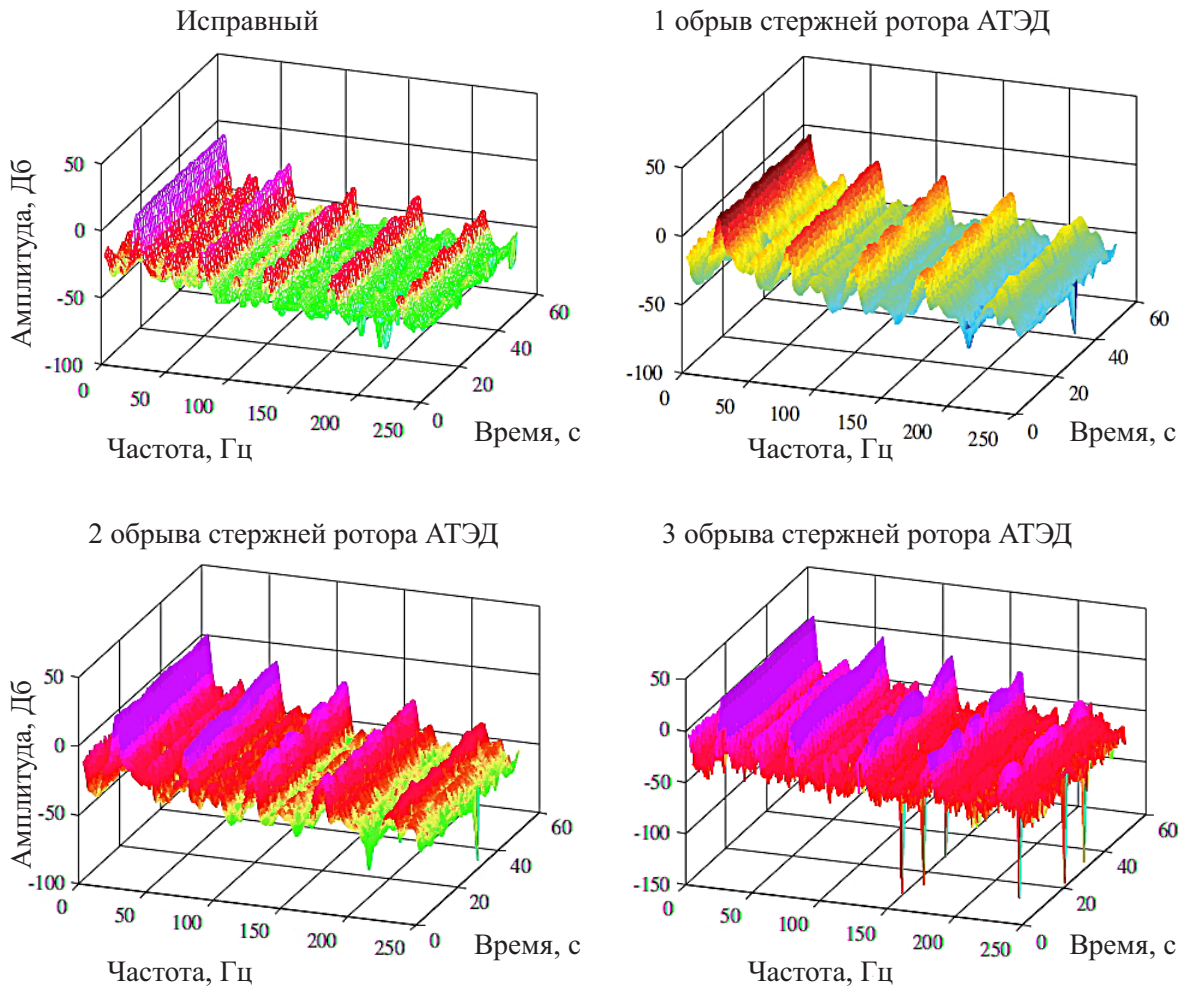


Рис. 4. Спектры АТЭД локомотивов с установленными пороговыми значениями (обрыв стержней)

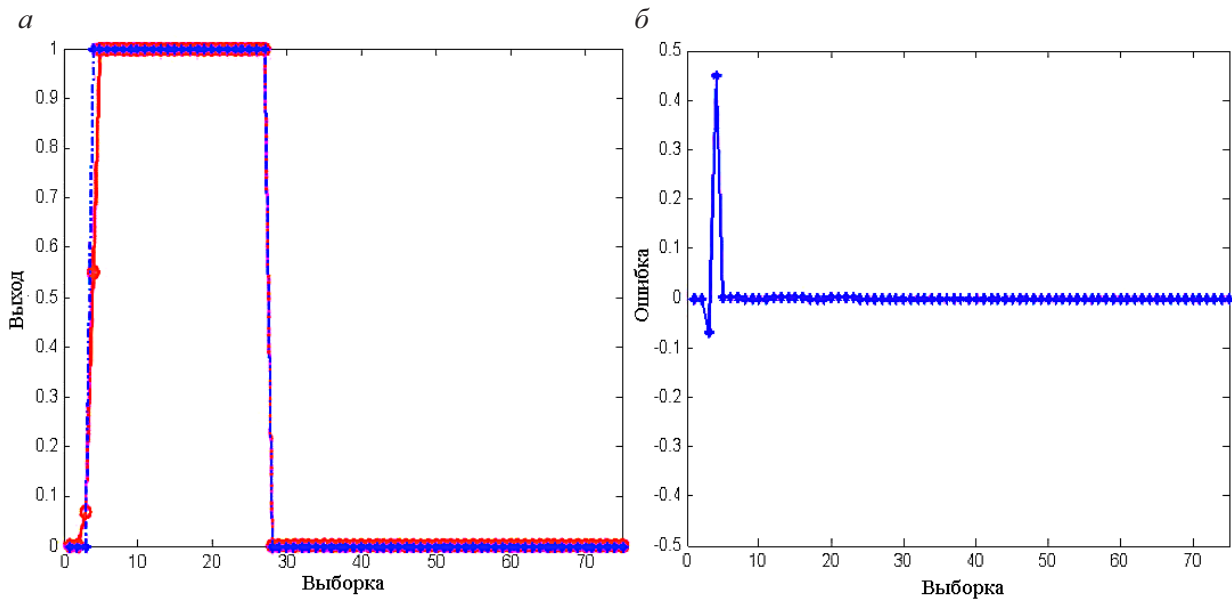


Рис. 5. Результаты обучения ИНС: *а* – выход ИНС для неисправности на фазе А АТЭД; *б* – ошибка ИНС для неисправности на фазе А АТЭД

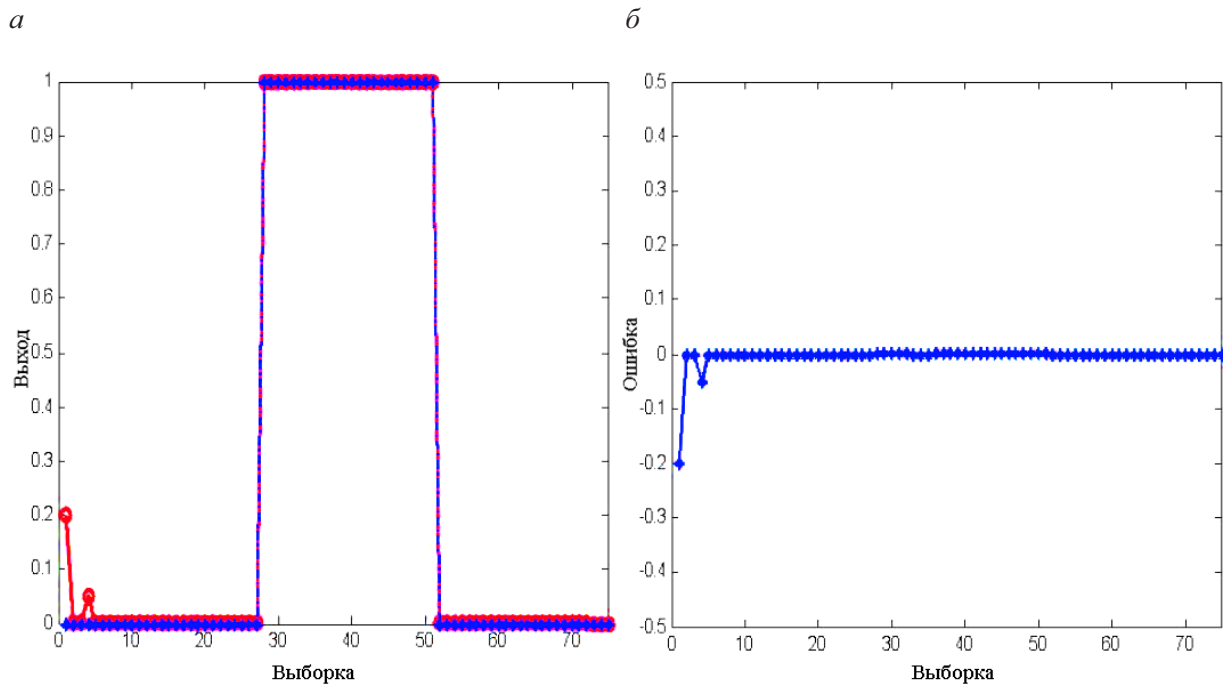


Рис. 6. Результаты обучения ИНС: *а* – выход ИНС для неисправности на фазе В АТЭД; *б* – ошибка ИНС для неисправности на фазе В АТЭД

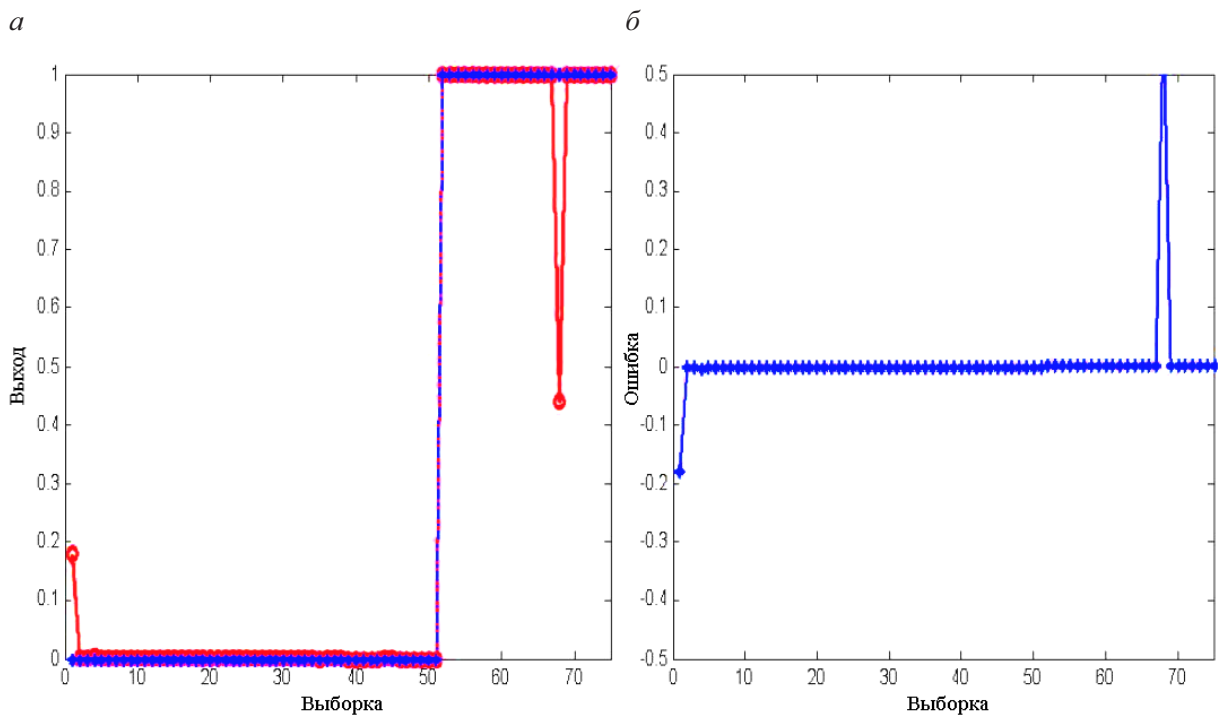


Рис. 7. Результаты обучения ИНС: *а* – выход ИНС для неисправности на фазе С АТЭД; *б* – ошибка ИНС для неисправности на фазе С АТЭД

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 приводит к максимально достоверному описанию физических процессов 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. 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.
3. Хамидов О. Р. Математическая модель вибро-возмущающих 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.
4. 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.
5. Агунов А. В. Использование нейро-нечетких диагностических моделей при оценке технического состояния электрооборудования тепловоза / А. В. Агунов, А. В. Грищенко, В. А. Кручек, В. В. Грачев // *Электротехника*. – 2017. – № 10. – С. 14–18.
6. Брынский Е. А. Неисправности асинхронных электродвигателей и их диагностика : учеб. пособие / Е. А. Брынский, Ю. Л. Преснов. – СПб. : СПбГТУ, 1999. – 68 с.
7. 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», 3–7 июля 2013 г. – СПб. : ПГУПС, 2013. – С. 174–176.
8. Kanika G. A review on fault diagnosis of induction motor using artificial neural networks / G. Kanika, K. Arunpreet // *International Journal of Science and Research*. – 2014. – Iss. 7. – P. 680–684.
9. 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.
10. Бабков Ю. В. Модернизация электропривода тепловозов и электровозов с тяговыми электродвигателями постоянного тока / Ю. В. Бабков, К. С. Перфильев, В. Ю. Евсеев, В. В. Грачев, Д. Н. Курилкин // *Труды третьей Междунар. науч.-практич. конференции «Перспективы развития сервисного обслуживания локомотивов»*. – 2018. – С. 114–120.
11. Briz F. Broken rotor bar detection in line-fed induction machines using complex wavelet analysis of startup transients / F. Briz, M. Degner, P. Garcia, D. Bragado // *IEEE Trans. Ind. Appl.* – 2008. – Vol. 44. – P. 760–768.
12. Ghatе V. N. Optimal MLP neural network classifier for fault detection of three phase induction motor / V. N. Ghatе, S. V. Dudul // *Expert Syst. Appl.* – 2010. – Vol. 37. – P. 3468–3481.
13. Alexandre B. Fault diagnosis of an induction motor based on fuzzy logic, artificial neural network an

hybrid system / B. Alexandre, N. Y. Maurice, N. N. Leandre, M. M. Laure // *International Journal of Control Science and Engineering*. – 2018. – Iss. 8 (2). – P. 42–51.

14. 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.

15. Грищенко А. В. О влиянии боксования колесных пар на эксплуатационную энергоэффективность тепловозов / А. В. Грищенко, В. В. Грачев, Д. Н. Курилкин, Ф. Ю. Базилевский, В. А. Перминов, И. Э. Нестеров // *Вестн. Науч.-исслед. и*

конструкторск.-технологич. ин-та подвижного состава. – 2015. – № 97. – С. 59–67.

16. Грищенко А. В. Оценка влияния процессов боксования колесных пар тепловозов на их энергетическую эффективность в эксплуатации / А. В. Грищенко, В. В. Грачев, Ф. Ю. Базилевский, Д. Н. Курилкин // *Бюл. результатов науч. исследований*. – 2014. – № 4 (13). – С. 51–60.

Дата поступления: 07.11.2019

Решение о публикации: 15.11.2019

Контактная информация:

ХАМИДОВ Отабек Рустамович – канд. техн. наук, докторант; otabek.rustamovich@yandex.ru

Design of neural diagnosis model for locomotive induction motor

O. R. Khamidov

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

For citation: Khamidov O. R. Design of neural diagnosis model for locomotive induction motor. *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2019, vol. 16, iss. 4, pp. 620–630. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2019-4-620-630

Summary

Objective: Health assessment of asynchronous traction motors (ATED) of locomotives. **Methods:** Data mining techniques were applied for control and diagnostics of technical condition of ATED. Analytical study of ATED in MATLAB/Simulink software environment was proposed. **Results:** It was demonstrated that one of the most developing theories is the theory of artificial intelligence systems, namely neural-net technology. The technology allows for the solution of a wide range of tasks: from detection of ATED operating mode to lost data recovery from information channels under conditions of onboard implementation of an object. The above mentioned systems possess a number of important beneficial features, such as operation speed, learnability, approximation properties, etc. The designed neural network model for health assessment of ATED for locomotives was demonstrated. Feasibility of preventing diagnostics, which makes it possible to detect defects at the earliest stage of their development, was justified. **Practical importance:** The results obtained by means of MATLAB/Simulink software environment allow for the analysis of asymmetrical conditions of ATED state variables.

Keywords: Expert systems, diagnostics, asynchronous traction motor, modern intelligent techniques, neural network, locomotive fault condition.

References

1. Khamidov O. R. & Kasymov O. T. Razrabotka metodiky kompleksnogo diagnostirovaniya asinkhronnogo tyagovogo elektrodvigatelya podvizhnogo sostava zheleznodorozhnogo transporta [Development of a complex diagnostics technique for asynchronous traction motor of the railway rolling stock]. *Materialy konferentsiy GNII "Natsrazvitiye"*. Sbornik izbrannykh stately [Proceedings of GNII "Natsrazvitiye" conference. Collection of selected research papers]. Saint Petersburg, GNII "Natsrazvitiye" [Humanitarian National Research Institute] Publ., 2017, pp. 32–39. (In Russian)
2. Khamidov O. R. & Kasymov O. T. Otsenka tekhnicheskogo sostoyaniya asinkhronnykh tyagovykh elektrodvigatelye elektrovozov serii "UZ-EL" sredstvami vibrodiagnostiki [Health assessment of asynchronous traction motors for "UZ-EL"-series electric locomotives by means of vibration-based diagnostics]. *Materialy konferentsiy GNII "Natsrazvitiye"*. Sbornik izbrannykh stately [Proceedings of GNII "Natsrazvitiye" conference. Collection of selected research papers]. Saint Petersburg, GNII "Natsrazvitiye" [Humanitarian National Research Institute] Publ., 2017, pp. 13–19. (In Russian)
3. Khamidov O. R. & Panchenko M. N. Matematicheskaya model vibrovozmushchayushchikh sil lokomotivnogo asinkhronnogo elektrodvigatelya [Simulation model of disturbance forces of the locomotive induction motor]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya [Proceedings of Petersburg State Transport University]*. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2013, iss. 4 (37), pp. 60–67. (In Russian)
4. Grishchenko A. V. & Kozachenko E. V. *Noviye elektricheskiye mashiny lokomotivov [New electrical machinery of the locomotive]*. Uchebnoye posobiye dlya vuzov zheleznodorozhnogo transporta [Teaching aid for colleges of railway transport]. Moscow, Uchebno-metodicheskiy tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte [Training and Methodology Centre for Railway Transport] Publ., 2008, 271 p. (In Russian)
5. Agunov A. V., Grishchenko A. V., Kruchek V. A. & Grachev V. V. Ispolzovaniye neuro-nechetkikh diagnosticheskikh modeley pry otsenke tekhnicheskogo sostoyaniya elektrooborudovaniya teplovoza [Application of neuro-fuzzy diagnostic models for health assessment of electrical equipment for the diesel locomotive]. *Elektrotehnika [Electrical engineering]*, 2017, no. 10, pp. 14–18. (In Russian)
6. Brynskiy E. A. & Presnov Y. L. *Neispravnosty asinkhronnykh elektrodvigatelye i ikh diagnostika [Induction motors: faults and diagnostics]*. Uchebnoye posobiye [Teaching aid]. Saint Petersburg, SPbGTU [Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University] Publ., 1999, 68 p. (In Russian)
7. Khamidov O. R. & Grishchenko A. V. Vibrodiagnostika povrezhdeniya podshipnikov kacheniya lokomotivnykh asinkhronnykh elektrodvigatelye [Vibration-based fault diagnostics of rolling bearing for the locomotive induction motor]. *VIII Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya "Podvizhnoy sostav XXI veka: idei, trebovaniya, proekty" [The 8th International research and training conference "The 21st century Rolling stock: ideas, requirements, projects"*, July 3–7th, 2013]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2013, pp. 174–176. (In Russian)
8. Kanika G. A. & Arunpreet K. Review on fault diagnosis of induction motor using artificial neural networks. *International Journal of Science and Research*, 2014, iss. 7, pp. 680–684.
9. Mikhailov A. S. & Staroverov B. A. Problemy i perspektivy ispolzovaniya iskusstvennykh neironnykh setey dlya identifikatsii i diagnostiki tekhnicheskikh obyektov [Problems and prospects of using artificial neural networks for identification and diagnostics of technical objects]. *Vestnik IGEU [Bulletin of IGEU [Ivanovo Power Engineering University]*. Ivanovsk, IGEU [Ivanovo Power Engineering University] Publ., 2013, iss. 3, pp. 64–66. (In Russian)
10. Babkov Y. V., Perfiliev K. S., Evseyev V. Y., Grachev V. V. & Kurilkin D. N. Modernizatsiya elektroprivoda teplovozo i elektrovozov s tyagovymy elektrodvigatelyamy postoyannogo toka [Modernization of the electric motor drive for diesel locomotives and electric locomotives with direct-current traction motors]. *Trudy tretyey Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Perspektivy razvitiya servisnogo obsluzhivaniya lokomotivov" [Proceedings of the Third International research and training conference "Development prospects of locomotive maintenance service"*, 2018, pp. 114–120. (In Russian)

11. Briz F., Degner M., Garcia P. & Bragado D. Broken rotor bar detection in line-fed induction machines using complex wavelet analysis of startup transients. *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 2008, vol. 44, pp. 760–768.
12. Ghate V.N. & Dudul S.V. Optimal MLP neural network classifier for fault detection of three phase induction motor. *Expert Syst. Appl.*, 2010, vol. 37, pp. 3468–3481.
13. Alexandre B., Maurice N.Y., Leandre N.N. & Laure M.M. Fault diagnosis of an induction motor based on fuzzy logic, artificial neural network and hybrid system. *International Journal of Control Science and Engineering*, 2018, iss. 8 (2), pp. 42–51.
14. Grishchenko A.V., Grachev V.V., Babkov Y.V., Klimenko Y.I., Kim S.I., Perfilyev K.S. & Fedotov M.V. Apparat iskusstvennykh neironnykh setey dlya diagnostiki sovremennogo lokomotiva [A system of artificial neural networks for diagnostics of the modern locomotive]. *Lokomotiv [Locomotive]*, 2012, no. 7, pp. 36–40. (In Russian)
15. Grishchenko A.V., Grachev V.V., Kurilkin D.N., Bazilevskiy F.Y., Perminov V.A & Nesterov I.E. O vliyaniy boksovaniya kolesnykh par na ekspluatatsionnyu energoeffektivnost teplovozov [The influence of wheel-pair spinning on energy performance of diesel locomotives]. *Vestnik nauchno-issledovatel'skogo i konstruktorsko-tehnologicheskogo institute podvizhnogo sostava [Bulletin of the Rolling Stock Scientific Research Design and Technology Institute]*, 2015, no. 97, pp. 59–67. (In Russian)
16. Grishchenko A.V., Grachev V.V., Bazilevskiy F.Y. & Kurilkin D.N. Otsenka vliyaniya protsessov boksovaniya kolesnykh par teplovozov na ikh energeticheskuyu effektivnost v ekspluatatsii [Impact assessment of wheel-pair spinning on energy performance of diesel locomotives in service]. *Byulleten rezultatov nauchnykh issledovaniy [Bulletin of research results]*, 2014, iss. 4 (13), pp. 51–60. (In Russian)

Received: November 07, 2019

Accepted: November 15, 2019

Author's information:

Otabek R. KHAMIDOV – PhD in Engineering, Technicks Doctoral;
otabek.rustamovich@yandex.ru

УДК 629.42-192(075)

Методика анализа и математическая модель функции готовности локомотивного парка с учетом холодного резерва

Ж. О. Кувондиков, А. Е. Цаплин

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

Для цитирования: Кувондиков Ж. О., Цаплин А. Е. Методика анализа и математическая модель функции готовности локомотивного парка с учетом холодного резерва // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2019. – Т. 16, вып. 4. – С. 631–641.

DOI: 10.20295/1815-588X-2019-4-631-641

Аннотация

Цель: Учитывая восстанавливаемый парк локомотивов с холодным резервом, математически смоделировать долгосрочную перспективу готовности локомотивного парка; показать важность расчета коэффициента готовности всего локомотивного парка для осуществления необходимой мощности транспортировки для покрытия запланированных услуг; разработать методику для прогнозирования дальнейшего поведения всего локомотивного парка. **Методы:** Определение коэффициента готовности локомотивного парка путем использования марковского анализа. Построение дифференциальных уравнений Чепмена–Колмогорова произведено с помощью марковского анализа. **Результаты:** Применив марковский анализ и уравнения Чепмена–Колмогорова, предложена математическая модель, на основе которой рассчитаны следующие параметры надежности локомотивного парка: вероятность того, что имеется n неисправных локомотивов в системе; готовность парка, находящегося в устойчивом состоянии; среднее время до отказа парка; среднее время восстановления; среднее количество резервных локомотивов при отказе рабочего локомотива; среднее количество ремонтируемых локомотивов; ожидаемое число рабочих локомотивов в системе; среднее количество локомотивов в ожидании ремонта; коэффициент использования ремонтного депо. **Практическая значимость:** Смоделирована долгосрочная перспектива готовности локомотивного парка, учитывая восстанавливаемый парк локомотивов с холодным резервом. Модель принимает во внимание случайный отказ локомотива, а также вариации времени ремонта.

Ключевые слова: Коэффициент готовности локомотивного парка, марковский анализ, уравнения Чепмена–Колмогорова, среднее время до отказа парка, среднее время восстановления, среднее количество резервных локомотивов при отказе рабочего локомотива, среднее количество ремонтируемых локомотивов, ожидаемое число рабочих локомотивов в системе.

Введение

В настоящее время парк локомотивов АО «Узбекистон темир йоллари» – «O'zbekiston Temir Yo'llari» (О'ТҮ) превышает 620 единиц, в том числе 62% составляют тепловозы и 38% электровозы. В целях обновления парка подвижного состава и повышения уровня

его готовности за последние 10 лет компанией были приобретены 15 пассажирских, 12 грузопассажирских, 11 грузовых электровозов и 10 пассажирских тепловозов. Готовность парка подвижного состава компании О'ТҮ – важный аспект для клиентов. Для любой железнодорожной компании, состоящей из целого парка локомотивов и нескольких единиц вы-

сокоскоростных электропоездов, прогнозирование и поддержание требуемого уровня готовности парка являются сложной задачей. Стохастический характер технических сбоев и корректирующее обслуживание, их исправляющее, становятся основными проблемами. Если большое количество локомотивов будут выведены из строя из-за сбоя, железнодорожная компания не сможет обеспечить требуемую мощность транспортировки для покрытия запланированных услуг. Для избежания в дальнейшем таких проблем с локомотивным парком компания О'ТУ планирует купить локомотивы для холодного резерва. Представим, что для повышения готовности парка компания О'ТУ сохраняет парк локомотивов в составе двухсот рабочих и трех для холодного резерва в одной из зон их обслуживания. Резервный локомотив доступен в случае, когда один из рабочих локомотивов выйдет из строя. Однако держать запасные локомотивы каждый стоимостью около 2 млн евро неэкономично.

Таким образом, актуальной задачей является моделирование долгосрочной перспективы готовности локомотивного парка с учетом восстанавливаемого парка локомотивов с холодным резервом.

Для решения этой задачи создана математическая модель с использованием метода марковского анализа для представления работы системы. Модель разработана для установления взаимосвязи между готовностью системы, количеством резервных локомотивов холодного резерва, частотой отказов и временем технического обслуживания в депо.

С помощью представленной модели планируется оценить ключевые показатели эффективности системы парка:

- время работоспособного состояния парка;
- среднее время до отказа;
- среднее время восстановления.

Стабильное состояние готовности указывает на долгосрочную вероятность того, что парк будет функционировать в состоянии готовности, в котором имеется достаточное количество

локомотивов, чтобы удовлетворить необходимую транспортную потребность, т.е. когда локомотив выходит из строя, есть готовый к работе резервный локомотив. Среднее время до отказа указывает на среднюю продолжительность времени, в течение которого парк остается в состоянии полной готовности, прежде чем перейдет в состояние неполного режима. Вместе с тем среднее время восстановления показывает среднюю продолжительность времени того, что парк остается в депо, прежде чем перейти в состояние неполной готовности. Особое внимание было уделено оценке влияния запасных локомотивов на среднюю готовность локомотивного парка.

Разработанный алгоритм учитывает размер парка (K), количество запасных локомотивов (S), интенсивность отказов (λ), скорость ремонта (μ), а также количество средств ремонта (R) в качестве входных данных и производит расчет значений ключевых показателей эффективности в качестве выходного результата. Размер входных значений может быть любым произвольным числом. Модель генерирует графики устойчивого состояния готовности в зависимости от количества локомотивов с отказами и количества резервных локомотивов парка.

Описание модели и допущения

Модель должна быть математически обоснованной и компетентной, чтобы учитывать случайный отказ локомотива, а также вариации времени ремонта.

Следующие допущения были использованы для математической постановки задачи:

- 1) парк состоит из идентичных $N = K + S$ локомотивов;
- 2) большинство локомотивов K могут работать одновременно, остальные локомотивы S – для холодного резерва;
- 3) для приемлемого функционирования всей системы должно работать ровно K локомотивов. Когда оно меньше, чем K , парк работает в неполном режиме;

4) каждый локомотив состоит из M различных компонентов, которых может быть довольно много;

5) для упрощения модели рассматривается только один уровень компонента, т. е. локомотив принимается как единый объект;

6) в начале работы (при $t = 0$) предполагается, что все локомотивы новые;

7) локомотив отказывает, если какой-либо один из компонентов M выходит из строя;

8) наработка до отказа и время ремонта локомотивов распределяются по экспоненциальному закону;

9) время работы локомотива распределено экспоненциально с параметрами λ и μ ;

10) время отказа каждого локомотива не зависит от состояния других локомотивов и от времени, проведенного локомотивом в определенном состоянии;

11) после ремонта локомотив становится как новый и переходит в режим ожидания или рабочее состояние;

12) всякий раз, когда один из рабочих локомотивов выходит из строя, его немедленно заменяют резервным, если он есть;

13) переключение из состояния ожидания в рабочее состояние или из ремонта в режим ожидания происходит мгновенно;

14) всякий раз, когда функционирующий локомотив выходит из строя, он немедленно отправляется в ремонтное депо, где производятся ремонтные работы;

15) имеется R идентичных ремонтных депо или ремонтных бригад. Только один ремонтный пункт предназначен для ремонта вышедшего из строя локомотива. Время, необходимое любому ремонтному центру для ремонта любого неисправного компонента, является независимым и имеет экспоненциальное распределение. В дальнейшем будем различать два случая, а именно: $R \leq S$ и $R > S$;

16) услуги по ремонту предоставляются по принципу «первый пришел – первый обслужен»;

17) локомотив, когда его ремонт завершается, отправляется в холодный режим ожидания. Если система не полна, восстановленный локомотив отправляется непосредственно в рабочее состояние, и оно считается новым.

Внешний вид модели показан на рис. 1.

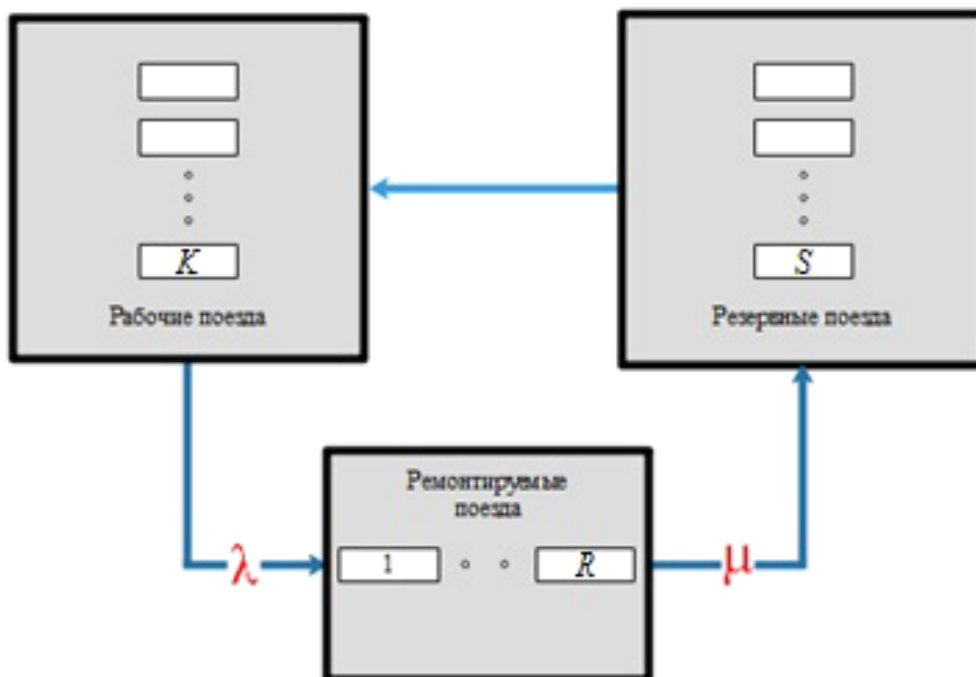


Рис. 1. Вид модели

С течением времени локомотивы будут распределены по схеме в различных пропорциях. В течение заданного времени ремонта, если число отказов ниже среднего, большинство локомотивов будут ждать времени эксплуатации. В других случаях после сбоев, возможно, в связи с тем, что ремонтные работы занимают больше среднего времени, вышедшие из строя локомотивы будут накапливаться в ремонтных цехах, занимая очередь. Но до тех пор, пока не выйдет из строя не более S локомотивов, парк может продолжать работу. Вероятность того, что количество локомотивов в ремонтном цехе не выше, чем в холодном резерве S , является эксплуатационной готовностью.

Наличие парка и соответствующая вероятность количества неисправных локомотивов, которые не могут работать в течение указанного периода, служат показателями эффективности при решении этой задачи. Исходя из приведенных выше предположений, можно разработать метод, в котором используется марковский анализ, точнее марковский процесс представлен как рождение и смерть процесса.

Если общее количество доступных локомотивов холодного резерва равно S , то любое время t , когда локомотивы K работают, локомотивы S будут либо в ремонтных цехах, либо доступны в ждущем режиме. Если не более S локомотивов находятся в ремонтном цехе, то K локомотивов могут продолжать работать. Однако, как только в ремонтный цех придут $S + 1$ локомотивов, для выполнения заданного объема работы будет использоваться меньшее количество локомотивов парка. Это означает, что парк начнет работать ниже требуемого уровня, т. е. система парка будет нахо-

диться в неполном режиме, когда количество работающих локомотивов ниже K .

Система перехода состояния для восстанавливаемой системы локомотивного парка показана на рис. 2. В момент времени $t = 0$, когда парк только начал работу, все локомотивы считаются работоспособными. Числа в кружках обозначают состояния системы, представляющие собой число неисправных локомотивов, которые или ждут технического обслуживания, или обслуживаются в ремонтных цехах. Состояние системы уменьшается на 1, когда неисправный локомотив ремонтируется и становится как новый, и увеличивается на 1 каждый раз, когда рабочий локомотив становится неисправным. В состояниях от 0 до S все локомотивы, которые находятся в режиме ожидания, ждут время эксплуатации и ровно K локомотивов работают на линиях. Состояние системы $S+1$ указывает на то, что парк находится в неполном режиме. Из состояния $S+1$ к состоянию N количество действующих локомотивов будет ниже K . Тогда парк также будет работать в неполном режиме. Состояние парка вернется к норме тогда, когда количество действующих локомотивов восстановится до K .

Используются следующие обозначения: n – количество неисправных локомотивов в системе, $n = 0, 1, \dots, S, S+1, \dots, N = S+K$; t – время; λ_n – интенсивность отказов системы, когда существует n неисправных локомотивов, $0 \leq n \leq N$; μ_n – скорость восстановления системы при наличии n неисправных локомотивов, $1 \leq n \leq N$; $P_n(t)$ – вероятность того, что в момент времени t выйдут из строя n локомотивов, $0 \leq n \leq N$; P_n – вероятность стационарного состояния, $P_n = \lim_{t \rightarrow \infty} P_n(t)$, $0 \leq n \leq N$.

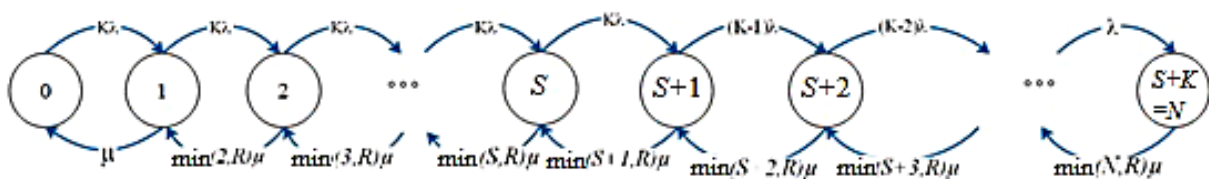


Рис. 2. Диаграммы состояний перехода для восстанавливаемой системы локомотивного парка

Учитывая количество запасных локомотивов в режиме холодного ожидания S , имеем следующее значение средней частоты отказов и скорости ремонта в различных состояниях системы:

$$\lambda_n = \begin{cases} K\lambda, & \text{если } 0 \leq n \leq S, \\ (N-n)\lambda, & \text{если } S \leq n \leq S+K=N, \end{cases}$$

$$\mu_n = \begin{cases} n\mu, & \text{если } n \leq R, \\ R\mu, & \text{если } n \geq R. \end{cases}$$

Ранее допущено, что распределения работоспособного времени локомотива и времени ремонта экспоненциальные и одинаковые для всех локомотивов. Исходя из этого, можно написать:

- вероятностью того, что локомотив, работающий в момент времени t , выйдет из строя в интервале от t до $t+td$, является λtd ;

- вероятностью того, что локомотив, ремонтируемый в момент времени t , будет доступен для работы в интервале от t до $t+td$, является μtd .

Уравнения Чепмена–Колмогорова, определяющие модели, заключаются в следующем: для $R \leq S$

$$\frac{dP_n(t)}{dt} = K\lambda P_{n-1} - (K\lambda + n\mu)P_n + (n+1)\mu P_{n+1} \quad (0 \leq n < R),$$

$$\frac{dP_n(t)}{dt} = K\lambda P_{n-1} - (K\lambda + R\mu)P_n + R\mu P_{n+1} \quad (R \leq n < S),$$

$$\frac{dP_n(t)}{dt} = (N-n+1)\lambda P_{n-1} - [(N-n) + R\mu]P_n + R\mu P_{n+1} \quad (S \leq n \leq N);$$

для $R > S$

$$\frac{dP_n(t)}{dt} = K\lambda P_{n-1} - (K\lambda + n\mu)P_n + (n+1)\mu P_{n+1}$$

$$(0 \leq n < S),$$

$$\frac{dP_n(t)}{dt} = (N-n+1)\lambda P_{n-1} - [(N-n)\lambda + R\mu]P_n + (n+1)\mu P_{n+1}$$

$$(S \leq n < R),$$

$$\frac{dP_n(t)}{dt} = (N-n+1)\lambda P_{n-1} - [(N-n)\lambda + R\mu]P_n + R\mu P_{n+1}$$

$$(R \leq n < N),$$

где $P_{n-1} = P_{N+1} = 0$.

Стационарные решения получаются путем постановки $\frac{dP_n(t)}{dt} = 0$ для каждого из предыдущих уравнений, т. е. $P_n(t) \rightarrow P_n$, когда $t \rightarrow \infty$, $\rho = \frac{\lambda_n}{\mu_n}$:

$$P_n = \frac{K^n}{n!} \rho^n P_0, \quad n \leq \min \{R, S\},$$

$$P_n = \frac{K^n}{R^{n-R} R!} \rho^n P_0, \quad R+1 \leq n \leq S,$$

$$P_n = \frac{K^S K!}{(N-n)! n!} \rho^n P_0, \quad S+1 \leq n \leq R,$$

$$P_n = \frac{K^S}{R^{n-R} R!} \rho^n \frac{K!}{(N-n)!} P_0,$$

$$\max \{R, S\} + 1 \leq n \leq N.$$

Вкратце,

$$\lambda_{n-1} P_{n-1} = \mu_n P_n,$$

$P_n = \frac{\lambda_{n-1} P_{n-1}}{\mu_n}$, значение будет очень полезным в численном вычислении P_n .

Учитывая вышеуказанное, сумму всех P_n можно выразить с помощью P_0 :

$$\sum_{n=0}^N P_n = P_0 \left(1 + \frac{\lambda_0}{\mu_1} + \frac{\lambda_0 \lambda_1}{\mu_1 \mu_2} + \frac{\lambda_0 \lambda_1 \lambda_2}{\mu_1 \mu_2 \mu_3} + \frac{\lambda_0 \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3}{\mu_1 \mu_2 \mu_3 \mu_4} + \dots + \frac{\lambda_0 \lambda_1 \lambda_2 \dots \lambda_{N-1}}{\mu_1 \mu_2 \mu_3 \dots \mu_N} \right) = 1.$$

Ключевые показатели эффективности

Определим различные показатели эффективности, которые имеют значение для оценки характеристик парка:

1. Вероятность того, что имеется n неисправных локомотивов в системе, где $n = 1, \dots, N$ ($N = K + S$).

2. Готовность парка, который находится в устойчивом состоянии. Пока количество неисправных локомотивов в системе K , система работает в полном режиме. Как только количество неисправных локомотивов достигает $N - K + 1$, система начнет работать в неполном режиме. Начнется ремонт неисправных локомотивов поочередно. Как только количество неисправных локомотивов будет ниже уровня $N - K + 1$, система снова начнет работать в полном режиме.

Таким образом, состояние системы изменится с течением времени вверх и вниз. Вероятность того, что система находится в рабочем состоянии в момент времени t , составит

$$P(t) = P_0(t) + P_1(t) + P_2(t) + \dots + P_s(t).$$

Готовность парка в стабильном состоянии определяется следующим образом:

$$P = P_0 + P_1 + P_2 + \dots + P_s,$$

$$P_{\text{стаб}} = P(n \leq S) = \sum_{n=0}^S P_n.$$

Допускается работа системы в неполном режиме, когда число рабочих локомотивов

ниже K . Но в этом случае целевая готовность системы не будет достигнута.

3. Среднее время до отказа парка. Хотя рассматриваемая система является ремонтпригодной, мы по-прежнему заинтересованы в поиске среднего времени до отказа парка. В этом случае, если локомотивы выходят из строя, они проходят техническое обслуживание. Поскольку мы заинтересованы в поиске среднего времени до отказа парка, предположим, что в состоянии $N - K + 1$ или $S + 1$ система переходит в неполный режим работы, т. е. состояния отказа системы рассматриваются как поглощающие состояния. Таким образом, время до поглощения – это время до отказа парка.

В результате примем, что $\mu_{N-K+1} = 0$. Когда система находится в состоянии n ($0 \leq n \leq N - K + 1$), в системе находятся n неисправных компонентов и $N - n$ резервных или активных рабочих компонентов, а частота отказов парка $\lambda_n = K\lambda$.

Если общее количество неисправных локомотивов меньше или равно общему числу ремонтных депо, все неисправные локомотивы ремонтируются, и, таким образом, коэффициент (скорость) ремонта системы составляет $\mu_n = n\mu$ ($1 \leq n \leq R$). Однако, когда $n > R$, μ_n будет постоянным и равным $R\mu_n$, поскольку все ремонтные депо (средства) будут использованы, и некоторые неисправные локомотивы будут ожидать ремонта.

Следующий метод помогает найти распределение среднего времени до отказа парка. Предположим, что начальная вероятность в одном из состояний от «0» до «S» задается вектором

$$a_1 = [P_0 \ P_1 \ P_2 \ P_3 \ \dots \ P_{S-1} \ P_S],$$

b_1 – вектор единичного столбца, обозначаемый как

$$\begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \cdot \\ \cdot \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}.$$

Кроме того, G_1 – матрица генератора переходных процессов, представляющая собой цепь Маркова:

$$G_1 = \begin{bmatrix} \text{состояния} & 0 & 1 & 2 & 3 & \dots & \dots & \dots & S \\ 0 & -K\lambda & K\lambda & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & \mu & -K\lambda - \mu & K\lambda & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 2\mu & -K\lambda - 2\mu & K\lambda & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 3 & 0 & 0 & 3\mu & -K\lambda - 3\mu & K\lambda & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & -K\lambda - \min(R, S - 1)\mu & K\lambda \\ S & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & \dots & \dots & -K\lambda - \min(R, S)\mu \end{bmatrix}$$

Следовательно, среднее время до отказа будет умножением начального вектора вероятностей, обратная матрица по отношению к матрице генератора переходных процессов и единичный векторного столбца:

$$MTTF = [-a_1][G_1]^{-1}[b_1].$$

4. Среднее время восстановления. Указывает среднюю продолжительность времени, в течение которого парк находится в неисправных состояниях, прежде чем перейти в другие состояния. Это среднее время пребывания парка в одном из состояний: $S + 1, S + 2, \dots, K + S$, т. е. это среднее время, в течение которого система переходит из первого состояния неполного рабочего режима в полное рабочее состояние системы. Этот процесс показан в виде марковской цепи (рис. 3).

Для системы, изначально находившейся в состоянии $S + 1$, заданной вектором

$$a_2 = [1, 0, 0, \dots, 0, 0, 0],$$

b_2 – вектор единичного столбца, обозначенный как

$$\begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \dots \\ \dots \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix},$$

G_2 является матрицей генератора переходных процессов

$$G_2 = \begin{bmatrix} \text{состояния} & S+1 & S+2 & S+3 & S+4 & \dots & \dots & N \\ S+1 & -(K-1)\lambda - \min(S+1, R)\mu & (K-1)\lambda & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ S+2 & \min(S+2, R)\mu & -(K-2)\lambda - \min(S+2, R)\mu & (K-2)\lambda & \dots & \dots & \dots & 0 \\ S+3 & 0 & \min(S+3, R)\mu & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \\ S+4 & 0 & 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & -(N-1)\lambda - \min(R, S-1)\mu & \lambda \\ N & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \min(N, R)\mu & -N\lambda - \min(R, S)\mu \end{bmatrix}$$

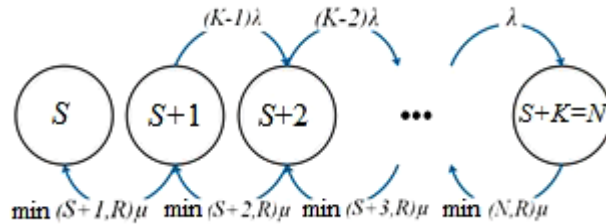


Рис. 3. Диаграммы состояний перехода от полного состояния режима

Таким образом, среднее время восстановления будет произведением исходной вероятности A_2 , обратной матрицы по отношению к матрице генератора переходных процессов и единичным векторным столбцом:

$$MTTR = [-a_2][G_2]^{-1}[b_2].$$

5. Среднее количество резервных локомотивов при отказе рабочего локомотива

$$E[\text{резерв}] = \sum_{n=0}^S (S-n)P_n.$$

6. Среднее количество ремонтируемых локомотивов (в том числе, когда система работает в неполном режиме)

$$E[F] = \sum_{n=0}^R nP_n + \sum_{n=R+1}^{K+S} nP_n.$$

7. Ожидаемое число рабочих локомотивов в системе

$$E[0] = N - \sum_{n=0}^R nP_n - \sum_{n=R+1}^{K+S} nP_n.$$

8. Среднее количество локомотивов в ожидании ремонта

$$E[F_w] = \sum_{n=R+1}^{K+S} (n-R)P_n.$$

9. Коэффициент использования ремонтного депо (ожидаемое число занятых работников)

$$K_n = \frac{\sum_{n=0}^R nP_n + R(\sum_{n=R+1}^N P_n)}{R}.$$

Заключение

В результате исследований получена модель, которая оценивает долгосрочную готовность локомотивного подвижного парка. Разработанная модель оценивает ключевые показатели эффективности: устойчивое состояние готовности, среднее время до отказа и среднее время ремонта системы парка. Модель создана на основе марковского анализа для представления работы системы парка [1–14] путем установления взаимосвязи между готовностью системы и количеством холодного резерва, интенсивностью отказов и скоростью ремонта ремонтного предприятия.

Библиографический список

1. UNIFE World Rail Market Study // Status quo and outlook 2020. – 3rd ed. – Brussels : UNIFE, 2010. – P. 23–24.
2. Marktvolumen im Neu- und Servicegeschäft sowie Perspektiven der Marktentwick – lung bei Infrastruktur und Schienenfahrzeugen // Weltmarkt Bahntechnik, 2009–2014. – Koeln : SCI Verkehr GmbH Publ., 2010. – 250 p.
3. Горский А. В. Методика расчета надежности электроподвижного состава как сложной системы : дис. ... канд. техн. наук, специальность : 05.22.07 / А. В. Горский. – М. : МИИТ, 1968. – 168 с.
4. Годовалый А. Т. Электроподвижной состав. Эксплуатация, надежность и ремонт : учебник для вузов ж.-д. транспорта / А. Т. Годовалый, И. П. Исаев, П. И. Борцов и др. – М. : Транспорт, 1983. – 106 с.
5. Пузанков А. Д. Методы расчета и использования показателей надежности в эксплуатации : учеб.

пособие для вузов ж.-д. транспорта / А. Д. Пузанков. – М. : МИИТ, 2004. – 49 с.

6. Горский А. В. Оптимизация системы ремонта локомотивов / А. В. Горский, А. А. Воробьев. – М. : Транспорт, 1994. – 83 с.

7. Гнеденко Б. В. Математические методы в теории надежности / Б. В. Гнеденко, Ю. К. Беляев, А. Д. Соловьев. – М. : Наука, 1965. – 26 с.

8. Плохих И. В. Совершенствование методики оценки показателей готовности и их анализ для высокоскоростного поезда Velaro Rus – «Сапсан» с учетом опыта России и Германии : дис. ... канд. техн. наук, специальность : 05.22.07 / И. В. Плохих. – М. : МИИТ, 2013. – 217 с.

9. Исаев И. П. Определение эксплуатационных коэффициентов электроподвижного состава с учетом последствия в процессе его функционирования / И. П. Исаев, А. В. Горский, В. А. Козырев // Труды МИИТ. – 1976. – Вып. 524. – С. 66–73.

10. Штраус П. Надежность и техническое обслуживание железнодорожного подвижного состава : отчет о НИР / П. Штраус. – Дрезден : Высшая школа техники и экономики города, 2010. – 91 с.

11. Elsayed A. Reliability engineering / A. Elsayed. – Massachusetts : Addison Wesley Longman, Inc., 1996. – 113 p.

12. Райншке К. Оценка надежности систем с использованием графов / К. Райншке, И. А. Ушаков ; под ред. И. А. Ушакова. – М. : Радио и связь, 1988. – 145 с.

13. Надежность в технике. Планы испытаний для контроля коэффициента готовности. – М. : Стандартинформ, 2010. – 16 с.

14. Дружинин Г. В. Надежность автоматизированных производственных систем. – 4-е изд. / Г. В. Дружинин. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 360 с.

Дата поступления: 23.10.2019

Решение о публикации: 29.10.2019

Контактная информация:

КУВОНДИКОВ Жалолиддин Олимбой угли – аспирант; jaloliddin1690@gmail.com

ЦАПЛИН Алексей Евгеньевич – канд. техн. наук, доцент; tsaplin.alexey@mail.ru

Method of analysis and simulation model of locomotive fleet availability function accounting for cold standby reserve

J. O. Kuvondikov, A. E. Tsaplin

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

For citation: Kuvondikov J. O., Tsaplin A. E. Method of analysis and simulation model of locomotive fleet availability function accounting for cold standby reserve. *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2019, vol. 16, iss. 4, pp. 631–641. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2019-4-631-641

Summary

Objective: Mathematically simulate long-term prospects for readiness of locomotive fleet, accounting for recoverable locomotive fleet with cold reserve. Demonstrate the importance of calculation of availability coefficient for the entire locomotive fleet to exercise transportation capacity requirements to cover planned services. Develop a method for forecasting subsequent behaviour of the entire locomotive fleet. **Methods:** Determination of the locomotive fleet availability coefficient by Markovian analysis. Construction of the Chapman–Kolmogorov differential equation was carried out on the basis of Markovian analysis. **Results:** Using Markovian analysis and Chapman–Kolmogorov equations, a mathematical simulation was proposed to calculate the following locomotive fleet reliability parameters: probability of having n

failed locomotives in the system; availability of fleet in steady-state conditions; mean time to repair the fleet; mean time to restore; average number of reserve locomotives in case of working locomotive failure; average number of locomotives undergoing repairs; expected number of working locomotives in the system; average number of locomotives awaiting repairs; repair depot load factor. **Practical importance:** Long-term prospects for locomotive fleet availability are simulated, accounting for recoverable locomotive fleet with cold standby reserve. The simulation accounts for random locomotive failure and for variations in repair time.

Keywords: Locomotive fleet availability coefficient, Markovian analysis, Chapman–Kolmogorov equations, mean time to fleet, mean time to restore, average number of reserve locomotives in case of working locomotive failure, average number of locomotives undergoing repairs, expected number of working locomotives in the system.

References

1. UNIFE World Rail Market Study. *Status quo and outlook 2020*. 3rd ed. Brussels, UNIFE Publ., 2010, pp. 23–24.
2. *Marktvolumen im Neu- und Servicegeschäft sowie Perspektiven der Marktentwicklung bei Infrastruktur und Schienenfahrzeugen. Weltmarkt Bahntechnik, 2009–2014*. Koeln, SCI Verkehr GmbH Publ., 2010, 250 p.
3. Gorskii A. V. Metodika rascheta nadezhnosti elektropodvizhnogo sostava kak slozhnoi sistemy [Method of calculating reliability of electrically propelled rolling stock as a complex system]. Cand. Sci. Engineering dissertation, specialty: 05.22.07. Moscow, MIIT [Moscow Railway Transport Engineering Institute] Publ., 1968, 168 p. (In Russian)
4. Godovalyi A. T., Isaev I. P., Bortsov P. I. et al. *Elektropodvizhnyi sostav. Eksploatatsiia, nadezhnost' i remont [Electrically propelled vehicles. Operation, reliability and repairs]*. Course book for railway universities. Moscow, Transport Publ., 1983, 106 p. (In Russian)
5. Puzankov A. D. *Metody rascheta i ispol'zovaniia pokazatelei nadezhnosti v eksploatatsii [Methods for calculation and application of reliability indices in operation]*. Course book for railway universities. Moscow, MIIT [Moscow Railway Transport Engineering Institute] Publ., 2004, 49 p. (In Russian)
6. Gorskii A. V. & Vorob'ev A. A. *Optimizatsiia sistemy remonta lokomotivov [Optimisation of the locomotive repair system]*. Moscow, Transport Publ., 1994, 83 p. (In Russian)
7. Gnedenko B. V., Beliaev Iu. K. & Solov'ev A. D. *Matematicheskie metody v teorii nadezhnosti [Mathematical methods in reliability theory]*. Moscow, Nauka Publ., 1965, 26 p. (In Russian)
8. Plokhikh I. V. Sovershenstvovanie metodiki otsenki pokazatelei gotovnosti i ikh analiz dlia vysokoskorostnogo poezda Velaro Rus – “Sapsan” s uchetom opyta Rossii i Germanii [Perfecting the method for evaluation of availability indices and their analysis for the Velaro Rus – Sapsan high-speed train accounting for Russian and German experience]. Cand. Sci. Engineering dissertation, specialty: 05.22.07. Moscow, MIIT [Moscow Railway Transport Engineering Institute] Publ., 2013, 217 p. (In Russian)
9. Isaev I. P., Gorskii A. V. & Kozyrev V. A. Opreделение ekspluatatsionnykh koeffitsientov elektropodvizhnogo sostava s uchetom posledestviia v protsesse ego funktsionirovaniia [Evaluation of service factors of electrically powered rolling stock accounting for aftereffects in the process of its functioning]. *Trudy MIIT [Proceedings of the Moscow Railway Transport Engineering Institute]*, 1976, iss. 524, pp. 66–73. (In Russian)
10. Shtraus P. *Nadezhnost' i tekhnicheskoe obsluzhivanie zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava [Reliability and maintenance of railway rolling stock]*. Research report. Dresden, Vysshiaia shkola tekhniki i ekonomiki goroda Drezdena [Dresden University of Applied Sciences] Publ., 2010, 91 p. (In Russian)
11. Elsayed A. *Reliability engineering*. Massachusetts, Addison Wesley Longman Inc. Publ., 1996, 113 p.
12. Rainshke K. & Ushakov I. A. *Otsenka nadezhnosti sistem s ispol'zovaniem grafom [System reliability assessment with the use of graphs]*. Ed. by A. I. Usha-

kov. Moscow, Radio i sviaz' Publ., 1988, 145 p. (In Russian)

13. *Nadezhnost' v tekhnike. Plany ispytaniy dlia kontrolya koeffitsienta gotovnosti [Industrial product dependability. Test plan to control availability coefficient]*. Moscow, Standartinform Publ., 2010, 16 p. (In Russian)

14. Druzhinin G. V. *Nadezhnost' avtomatizirovannykh proizvodstvennykh sistem [Reliability of automated*

manufacturing systems]. 4th edition. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1986, 360 p. (In Russian)

Received: October 23, 2019

Accepted: October 29, 2019

Author's information:

Jaloliddin O. ugli KUVONDIKOV – Postgraduate Student; jaloliddin1690@gmail.com

Alexey E. TSAPLIN – PhD in Engineering, Associate Professor; tsaplin.alexey@mail.ru

УДК 625.072

Изменение прочностных свойств щебня в процессе абразивного износа

А. Ф. Колос, П. А. Чистяков, Е. Г. Шаврин

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

Для цитирования: Колос А. Ф., Чистяков П. А., Шаврин Е. Г. Измерение прочностных свойств щебня в процессе абразивного износа // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2019. – Т. 16, вып. 4. – С. 642–649. DOI: 10.20295/1815-588X-2019-4-642-649

Аннотация

Цель: Исследование влияния количества смеси очищенного щебня с новым гранитным на его механические параметры (величины потерь массы щебня после испытаний на истираемость в полочном барабане и после испытаний на сопротивление удару на копре), а также окатанности граней зерен щебня на прочностные свойства балласта (удельное зацепление, угол внутреннего трения). **Методы:** Механические характеристики щебня определяли в соответствии с методиками, приведенными в ГОСТ 7392–2014, прочностные свойства балластного слоя – по ГОСТ 12248–2010. **Результаты:** Установлено, что при увеличении содержания очищенного щебня в смеси с новым гранитным щебнем снижаются его механические характеристики. Повышение окатанности зерен щебеночного балласта приводит к понижению его удельного зацепления и практически не влияет на угол внутреннего трения. **Практическая значимость:** Показана необходимость изучения влияния изменения формы зерна (окатанности) на несущую способность балластного слоя для обеспечения его надежной работы на протяжении всего запланированного межремонтного срока.

Ключевые слова: Щебень, балластный слой, удельное зацепление, угол внутреннего трения, трехосное нагружение.

Введение

Стабильность железнодорожного пути в течение всего срока службы зависит не только от надежности земляного полотна, применяемых типов шпал, креплений, рельсов, но и от качества щебеночного балласта. Несущая способность и качество балласта в основном определяются прочностными характеристиками используемого щебня. К ним относятся: удельное зацепление (аналог удельного сцепления у обычных дисперсных грунтов) и угол внутреннего трения. В свою очередь, прочностные характеристики балласта обусловлены его зерновым составом, плотностью,

окатанностью зерен, загрязненностью и другими факторами.

Для обеспечения стабильной и долгосрочной эксплуатации балласта используемый щебень по величине потери массы после испытаний на истираемость в полочном барабане и по величине потери массы после испытаний на сопротивление удару на копре должен соответствовать требованиям ГОСТ 7392–2014 «Щебень из плотных горных пород для балластного слоя железнодорожного пути. Технические условия» [1].

В процессе эксплуатации щебеночный балласт подвергается динамическому воздействию от подвижного состава, соответствен-

но можно предположить, что его прочностные свойства с наработкой тоннажа не остаются постоянными, а изменяются.

Определение физико-механических свойств

Для проверки данной гипотезы были испытаны пробы щебня категории II фракции 25–60 мм по ГОСТ 7392–2014 [1], сформированные из нового и очищенного гранитного щебня (пропущенный тоннаж – 368 млн т брутто), а также их смесей в различном соотношении.

Испытания проводились с использованием полочного барабана БП-700 (КП-123) и копра автоматического ПМА-Ф по методикам, изложенным в ГОСТ 7392–2014 [1].

Результаты испытаний по определению потери массы после испытаний на истираемость в полочном барабане приведены в табл. 1. Их анализ показал, что после пропуска 368 млн т брутто потеря массы после испытаний на истираемость в полочном барабане составила в

среднем 19,8%, т. е. фактически сравнялась с предельно допустимой величиной по ГОСТ 7392–2014 [1], в то же время как у нового гранитного щебня равна 15,2%, что практически на 30% меньше.

Результаты испытаний по определению потери массы щебня после испытаний на сопротивление удару на копре приведены в табл. 2. Их анализ показал, что после пропуска 368 млн т брутто потеря массы щебня после испытаний на сопротивление удару на копре составила в среднем 8,6%, т. е. также существенно приблизилась к предельно допустимой величине, регламентируемой ГОСТ 7392–2014 [1].

Определение прочностных свойств

Исследование влияния окатанности зерен щебня на его прочностные свойства (удельное зацепление и угол внутреннего трения) выполнялось путем трехосного сжатия в камере стабилометра по ГОСТ 12248–2010 [2] при максимально возможной скорости разрушения

ТАБЛИЦА 1. Потеря массы для смесей из нового щебня и очищенного щебнеочистительной машиной RM 80 после испытаний на истираемость в полочном барабане

Проба	Величина потери массы после испытаний на истираемость в полочном барабане, % по массе			Требование ГОСТ 7392–2014 (категория II), %
	Испытание № 1	Испытание № 2	Среднее значение	
Щебень после очистки (пропущенный тоннаж 368 млн т брутто)	20,2	19,4	19,8	от 15,0 до 20,0 вкл.
Смесь из щебня после очистки и нового щебня (70:30% по массе)	17,4	17,2	17,3	
Смесь из щебня после очистки и нового щебня (50:50% по массе)	16,2	16,1	16,1	
Смесь из щебня после очистки и нового щебня (30:70% по массе)	15,4	15,9	15,7	
Новый гранитный щебень категории II фракции 25–60 мм по ГОСТ 7392–2014	15,1	15,3	15,2	

ТАБЛИЦА 2. Потеря массы для смесей из нового щебня и очищенного щебнеочистительной машиной RM 80 после испытаний на сопротивление удару на копре

Проба	Величина потери массы после испытаний на сопротивление удару на копре, % по массе				Требование ГОСТ 7392–2014 (категория II), %
	Испытание № 1	Испытание № 2	Испытание № 3	Среднее значение	
Щебень после очистки (пропущенный тоннаж 368 млн т брутто)	10,3	7,2	8,4	8,6	≤10,5
Смесь из щебня после очистки и нового щебня (70:30 % по массе)	9,3	6,5	6,9	7,6	
Смесь из щебня после очистки и нового щебня (50:50 % по массе)	7,6	6,4	6,4	6,8	
Смесь из щебня после очистки и нового щебня (30:70 % по массе)	5,9	6,0	6,2	6,0	
Новый гранитный щебень категории II фракции 25–60 мм по ГОСТ 7392–2014	4,8	5,8	5,8	5,5	

образца. Испытания проводились в трехосной испытательной системе STX-600 (рис. 1, а) и вакуумном стабилometре конструкции ЛИ-ИЖТа (рис. 1, б). Всестороннее давление на образец задавалось равным 40, 60 и 80 кПа.

Образцы для испытаний изготавливались из гранитного щебня категории II по ГОСТ 7392–2014 [1]. Плотность образцов изменялась в диапазоне 1,57–1,62 г/см³, что в среднем соответствует плотности балластного слоя железнодорожного пути. В образцах использовался новый щебень и тот же щебень, прошедший обработку в полочном барабане.

В табл. 3 приведены сводные данные по определению прочностных свойств нового гранитного щебеночного балласта.

Полученные результаты испытаний совпадают с данными исследований прочностных характеристик щебня как зарубежных, так и отечественных авторов [3–10].

Для оценки степени влияния окатанности зерен щебня на прочностные характеристики балласта новый щебень проходил обработ-

ку в полочном барабане при 100, 200, 500 и 800 оборотах. Из окатанного щебня были изготовлены образцы для испытаний, при этом фракционный состав образцов нового и окатанного щебня был идентичен.

На рис. 2 даны фотографии щебня, как нового, так и обработанного в полочном барабане при количестве оборотов 200 и 800.

В табл. 5 приведены результаты определения прочностных свойств окатанного щебня. Из нее видно, что существует выраженная функциональная зависимость между окатанностью зерен щебня и удельным зацеплением балласта. Четко прослеживается, что по мере приближения зерен щебня к округлой форме зацепление снижается практически до нуля. Если новый щебень из балластного материала характеризуется удельным зацеплением, равным 57 кПа, то для щебня после обработки в полочном барабане при количестве оборотов, равном 800, оно составило 9 кПа, т. е. в 6 раз меньше. В отношении угла внутреннего трения можно сделать вывод, что с увеличением

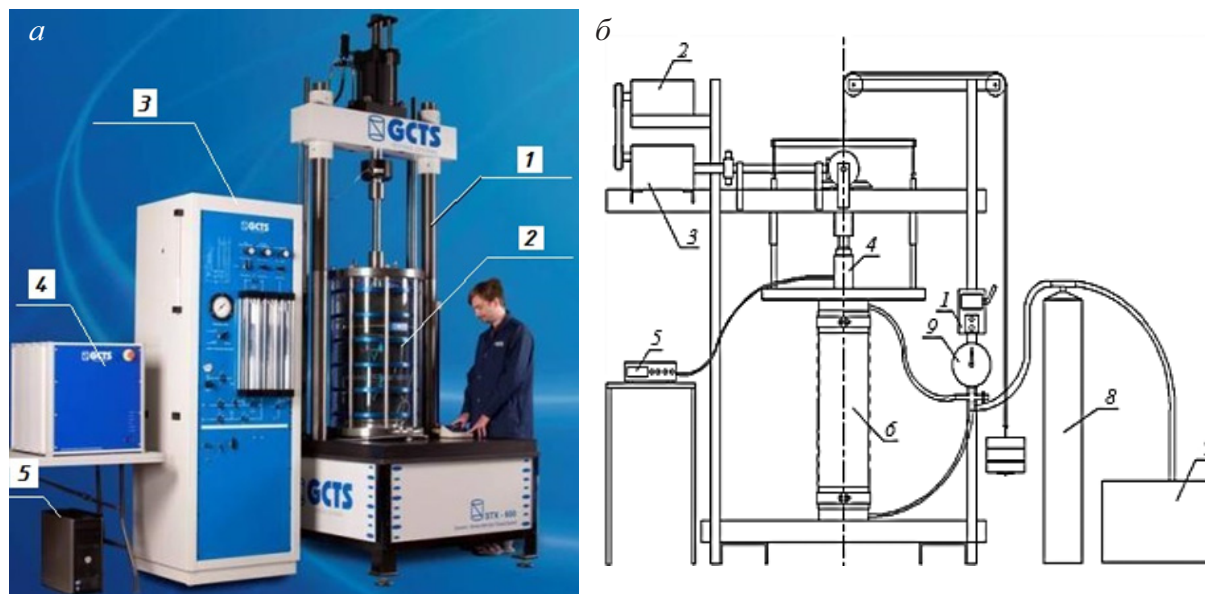


Рис. 1. Принципиальная схема трехосной испытательной системы STX-600 (а):
 1 – силовая рама; 2 – камера стабилометра; 3 – блок контроля всестороннего давления в камере стабилометра; 4 – блок сбора данных; 5 – персональный компьютер с программным обеспечением и конструкция вакуумного стабилометра для испытаний щебня (б):
 1 – пульт управления; 2 – электродвигатель; 3 – редуктор; 4 – динамометр; 5 – цифровой блок;
 б – образец из щебня в оболочке из резины; 7 – насос; 8 – ресивер;
 9 – вакуумметр

ТАБЛИЦА 3. Сводные результаты определения удельного зацепления (C) и угла внутреннего трения (φ) нового щебеночного балласта

Плотность образцов, т/м ³	Прочностные свойства щебня*	
	C , кПа	φ , град.
1,60–1,62	55	52,4
1,59–1,61	58	49,8
1,58–1,62	65	52,6
1,59–1,61	55	52,4
1,59–1,62	59	52,3
1,57–1,60	61	52,8
1,59–1,61	50	50,8
1,58–1,60	55	52,4
Среднее значение	57	51,9
Среднеквадратическое отклонение	4,02	0,93
Коэффициент вариации	0,07	0,02

* Значения удельного зацепления и угла внутреннего трения рассчитаны по результатам трех испытаний при различных всесторонних давлениях.

ТАБЛИЦА 4. Результаты определения удельного зацепления и угла внутреннего трения нового щебня в исследованиях различных авторов

Автор	Плотность щебня, т/м ³	Фракция, мм	Прочностные свойства*	
			С, кПа	φ, град.
B. Indraratna, N. C. Tennakoon, S. Nimbalkar, C. Rujikiatkamjorn [4]	1,43	22,4–50	47	40
B. Indraratna, S. Nimbalkar [5]	15,6	22,4–63	56	44
D. Ionescu [6]	1,56	28,2–75	68	47

* Расчетные значения получены авторами публикации на основании данных, приведенных в указанных исследованиях, при условии, что щебень обладает зацепными свойствами и подчиняется условию прочности Кулона $\tau n = \sigma n \cdot \operatorname{tg} \varphi + c$.

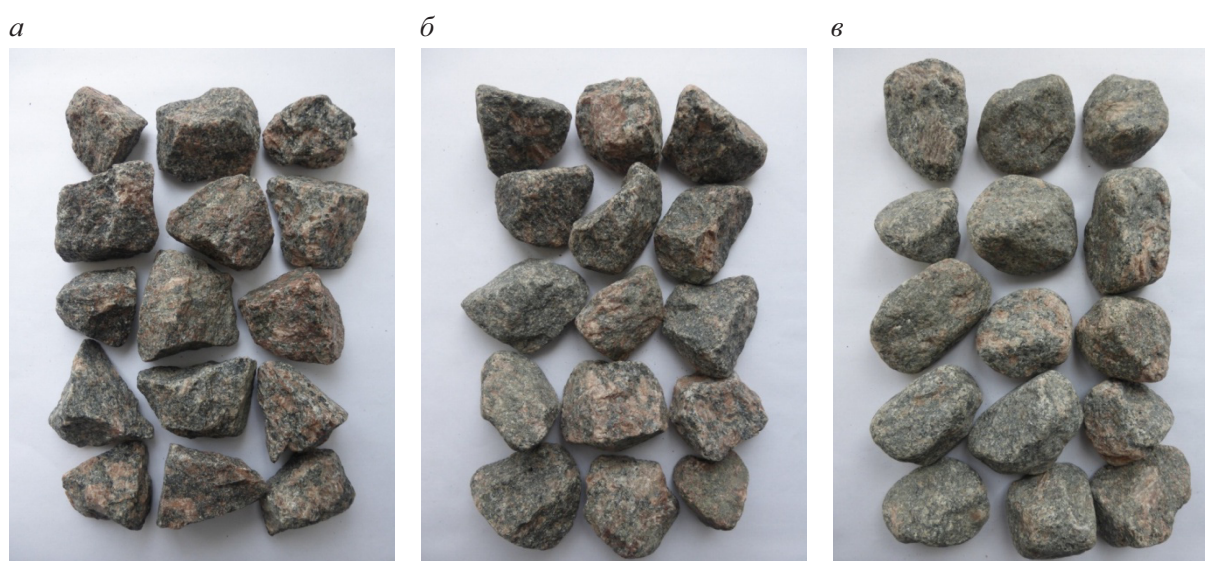


Рис. 2. Фотографии гранитного щебня с различным количеством оборотов окатывания в полочном барабане: *а* – новый; *б*, *в* – обработанный в полочном барабане при 200 (*б*) и 800 (*в*) оборотах окатывания

ТАБЛИЦА 5. Сводные результаты определения удельного зацепления и угла внутреннего трения щебеночного балласта с разной степенью окатанности зерен щебня

Количество оборотов в полочном барабане	Прочностные свойства щебня	
	Удельное зацепление, С, кПа	Угол внутреннего трения, φ, град.
Новый щебень	57	51,9
100	51	50,6
200	46	51,2
500	21	50,7
800	9	55,4

степени окатанности он практически не изменяется.

Полученные результаты однозначно доказывают, что форма зерна щебня, т. е. форма граней: острая, сглаженная, окатанная и т. д., непосредственным образом влияет на прочностные свойства щебеночного балласта, которые будут определять несущую способность балластной призмы. В то же время ГОСТ 7392–2014, устанавливающий основные требования к щебню, применяемому в балластном слое железнодорожного пути, требования к форме граней щебня не предъявляет. Таким образом, учитывая, что в процессе работы щебня в конструкции железнодорожного пути под динамической нагрузкой происходит его абразивный износ, а следовательно, и сглаживание острых граней, возможность повторного использования щебня после очистки должна подтверждаться результатами определения формы зерен на основе классификаций, которые предстоит разработать.

Заключение

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1) чем выше количество очищенного щебня в смеси с новым, тем ниже механические свойства такой смеси (величины потерь массы после испытаний на истираемость и сопротивление удару на копре). Такие низкие значения характеристик приведут к ускорению прироста продуктов собственного дробления по мере наработки тоннажа, и балластный слой перестанет удовлетворять требованиям ГОСТ 7392–2014 еще до наступления момента запланированной следующей очистки;

2) повышение окатанности зерен щебеночного балласта позволит снизить его удельное зацепление и практически не влияет на угол внутреннего трения щебня;

3) в настоящее время на сети железных дорог в основном только 30% нового щебня досыпается в путь после проведения ремонта, оставшиеся 70% – щебень, прошедший

очистку. Поскольку требования к окатанности щебня ничем не регламентируются, вне зависимости от формы зерен все 70% объема щебеночного балласта возвращается в путь. Тем самым невозможно однозначно гарантировать надежную работу балластного слоя с позиции обеспечения его несущей способности на протяжении всего запланированного межремонтного срока.

Библиографический список

1. ГОСТ 7392–2014. Щебень из плотных горных пород для балластного слоя железнодорожного пути. Технические условия. – Введ. 2015-12-01. – М. : Стандартинформ, 2015. – 32 с.
2. ГОСТ 12248–2010. Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости. – Введ. 2012-01-01. – М. : Стандартинформ, 2012. – 82 с.
3. СП 119.13330.2017. Железные дороги колеи 1520 мм. – Актуализ. ред. СНиП 32-01-95. – Введ. 2018-06-13. – М. : Стандартинформ, 2019. – 37 с.
4. Indraratna B. Behaviour of clay-fouled ballast under drained triaxial testing / B. Indraratna, N. C. Tennakoon, S. S. Nimbalkar, C. Rujikiatkamjorn // *Geotechnique : International Journal of soil mechanics*. – 2013. – Vol. 63 (5). – P. 410–419.
5. Indraratna B. Implications of ballast breakage on ballasted railway track based on numerical modelling / B. Indraratna, S. S. Nimbalkar // *13th International Conference of the International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics*. – Sydney, Australia, 2011. – P. 1085–1092.
6. Ionescu D. Evaluation of the engineering behaviour of railway ballast : A thesis submitted in fulfilment of the requirements for the award of the degree D. Sci. in Philosophy / D. Ionescu. – Wollongong : University of Wollongong, 2004. – 440 p.
7. Kolos A. Change of ballast strength properties during particles abrasive wear / A. Kolos, A. Konon, P. Chistyakov // *Procedia Engineering*. – 2017. – Vol. 189. – P. 908–915.
8. Иванов И. П. Определение показателей сопротивления сдвигу грунтов, характеризующих их естественную прочность / И. П. Иванов // *Вестн. Ле-*

нингр. ун-та. Геология, география. – 1975. – № 6. – С. 73–79.

9. Колос А. Ф. Влияние формы зерен щебеночного балласта на его прочностные свойства / А. Ф. Колос, П. А. Чистяков, А. С. Леус, Е. И. Шехтман, В. И. Штыков // Бюл. результатов науч. исследований. – 2017. – Вып. 4. – С. 148–160.

10. Леус А. С. Прочностные свойства щебеночного балласта / А. С. Леус, П. А. Чистяков, Г. В. Осипов, С. А. Клищ, А. Ф. Колос // Транспорт : проблемы, идеи, перспективы : сб. трудов LXXVIII Всерос. науч.-технич. конференции студентов, аспи-

рантов и молодых ученых. – СПб. : ПГУПС, 2018. – С. 16–23.

Дата поступления: 07.10.2019

Решение о публикации: 14.10.2019

Контактная информация:

КОЛОС Алексей Федорович – канд. техн. наук, заведующий кафедрой; kolos2004@inbox.ru

ЧИСТЯКОВ Павел Александрович – аспирант; chistyakov1985@gmail.com

ШАВРИН Евгений Геннадьевич – аспирант; sh192@mail.ru

Change in the strength properties of crushed stone due to abrasive wear

A. F. Kolos, P. A. Chistyakov, E. G. Shavrin

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

For citation: Kolos A. F., Chistyakov P. A., Shavrin E. G. Change in the strength properties of crushed stone due to abrasive wear. *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2019, vol. 16, iss. 4, pp. 642–649. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2019-4-642-649

Summary

Objective: Study of the effect of the amount of reclaimed ballast mixed with the new one on its mechanical properties (the value of crushed stone mass losses after abrasion tests in the abrasion testing machine and after impact resistance tests on the impact machine, as well as the effect of the crushed stone grains roundness on the ballast strength properties (specific cohesion, internal friction degree).

Methods: The mechanical properties of crushed stone were determined in accordance with the methods given in GOST 7392–2014, the strength properties of the ballast layer – according to GOST 12248–2010.

Results: It has been established that with an increase in the content of reclaimed ballast mixed with new granite crushed stone, its mechanical characteristics decrease. An increased roundness of stone bed grains leads to a decrease in its specific cohesion and has practically no impact on the internal friction degree.

Practical importance: The necessity of studying the impact of changing the shape of grain (roundness) on the bearing capacity of the stone bed to ensure its reliable operation throughout the entire planned overhaul period is shown.

Keywords: Crushed stone, stone bed, specific cohesion, internal friction degree, triaxial loading.

References

1. GOST 7392–2014. *Crushed stone of rocks for railway ballast. Specifications*. Introd. 12/1/2015. Moscow, Standartinform Publ., 2015, 32 p. (In Russian)

2. GOST 12248–2010. *Soils. Laboratory methods for determining the strength and strain characteristics*. Introd. 1/1/2012. Moscow, Standartinform Publ., 2012, 82 p. (In Russian)

3. SP 119.13330.2017. *Zheleznye dorogi kolei 1520 mm*. Aktualiz. red. SNiP 32-01-95 [Set of rules 119.13330.2017. 1520 mm gauge railroads. Revised edition of SNiP (Construction rules and regulations) 32-01-95]. Introduced on June 13, 2018. Moscow, Standartinform Publ., 2019, 37 p. (In Russian)
4. Indraratna B., Tennakoon N. C., Nimbalkar S. S. & Rujikiatkamjorn C. Behaviour of clay-fouled ballast under drained triaxial testing. *Geotechnique: International Journal of soil mechanics*, 2013, vol. 63 (5), pp. 410–419.
5. Indraratna B. & Nimbalkar S. S. Implications of ballast breakage on ballasted railway track based on numerical modelling. *13th International Conference of the International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics*. Sydney, Australia, 2011, pp. 1085–1092.
6. Ionescu D. *Evaluation of the engineering behaviour of railway ballast*. A thesis submitted in fulfilment of the requirements for the award of the degree D. Sci. in Philosophy. Wollongong, University of Wollongong Press, 2004, 440 p.
7. Kolos A., Konon A. & Chistyakov P. Change of ballast strength properties during particles abrasive wear. *Procedia Engineering*, 2017, vol. 189, pp. 908–915.
8. Ivanov I. P. Opredeleniye pokazateley soprotivleniya sdvigu gruntov, kharakterizuyushchikh ikh estestvennyuyu prochnost' [Determination of soil shear resistance parameters characterizing its natural strength]. *Vestnik of the Leningrad University. Series 6. Geology, Geography*, 1975, no. 6, pp. 73–79. (In Russian)
9. Kolos A. F., Chistyakov P. A., Leus A. S., Shekhtman E. I. & Shtykov V. I. Vliyaniye formy zeren shchebenochnogo ballasta na ego prochnostnyye svoystva [The influence of the stone bed grain shape on its strength properties]. *Bulletin of scientific research results*, 2017, iss. 4, pp. 148–160. (In Russian)
10. Leus A. S., Chistyakov P. A., Osipov G. V., Klishch S. A. & Kolos A. F. Prochnostnyye svoystva shchebenochnogo ballasta [Stone bed strength properties]. *Transport: problemy, idei, perspektivy*. Sb. trudov LXXVIII Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchennykh [Transport: problems, ideas, prospects. Proceedings of the LXXVIII All-Russian Scientific and Technical Conference of Students, Graduate Students and Young Scientists]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2018, pp. 16–23. (In Russian)

Received: October 07, 2019

Accepted: October 14, 2019

Author's information:

Aleksey F. KOLOS – PhD in Engineering, Head of the Department; kolos2004@inbox.ru

Pavel A. CHISTYAKOV – Postgraduate Student; chistyakov1985@gmail.com

Evgeniy G. SHAVRIN – Postgraduate Student; sh192@mail.ru

УДК 621.313

Анализ напряженно-деформированного состояния подшипника асинхронного электродвигателя

М. А. Шрайбер

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

Для цитирования: Шрайбер М. А. Анализ напряженно-деформированного состояния подшипника асинхронного электродвигателя // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2019. – Т. 16, вып. 4. – С. 650–657. DOI: 10.20295/1815-588X-2019-4-650-657

Аннотация

Цель: Рассмотреть вопрос о повышении надежности тяговых электрических машин переменного тока. Исследовать напряженно-деформированное состояние подшипника асинхронного тягового электродвигателя (АТЭД) тепловоза в эксплуатации. Проанализировать полученные результаты. Дать рекомендации по повышению надежности АТЭД локомотивов. **Методы:** В качестве основного метода исследования и расчета напряженно-деформированного состояния выбран метод конечных элементов, реализуемый в программном пакете SolidWorks 2005. **Результаты:** Охарактеризована необходимость предупреждения внезапных отказов АТЭД тепловозов в эксплуатации. Определены зоны концентрации напряжений в элементах подшипникового узла. Даны рекомендации по совершенствованию конструкции сепаратора подшипника АТЭД. Установлено, что следует совершенствовать систему диагностики АТЭД, а именно внедрять системы вибродиагностики, способных определять скрытые дефекты подшипников на этапе входного контроля при поступлении на текущий ремонт и выходного контроля после сборки при изготовлении и после ремонта. Выявлена необходимость в оборудовании отделений депо, где будут обслуживаться подшипники качения, стендами для проведения виброакустической диагностики. **Практическая значимость:** Показана важность внесения усовершенствований в конструкцию сепаратора АТЭД с учетом возникающих в эксплуатации напряжений. На базе конечно-элементной модели подшипника АТЭД рекомендовано внедрение виброакустической диагностики подшипников качения при поступлении электрической машины в ремонт, а также в качестве этапа выходного контроля. Это позволит уменьшить вероятность возникновения внезапных отказов, связанных с повышенными эксплуатационными нагрузками или нарушениями при сборке и изготовлении подшипников АТЭД. Предложенные методики расчета напряженно-деформированного состояния подшипников качения могут быть применены для практического использования не только подшипниковых узлов АТЭД, но также и для схожих по конструкции подшипников качения (например, буксовых подшипников качения).

Ключевые слова: Асинхронный тяговый электродвигатель, напряженно-деформированное состояние подшипника качения, виброакустическая диагностика подшипников качения.

Введение

В соответствии с документом «Типы и основные параметры локомотивов», утвержденным распоряжением МПС России № 747р от

27.10.2002 г., перспективные тепловозы должны иметь асинхронный тяговый электродвигатель (АТЭД). Это позволит обеспечить более высокую осевую мощность, увеличить скорости движения составов, улучшить энерге-

тические и тяговые характеристики локомотивов.

Особенности конструкции АТЭД тепловозов зависят от условий их эксплуатации в составе колесно-моторного блока. Данные условия и определяют основные требования к конструктивному исполнению, массогабаритным характеристикам АТЭД. К преимуществам АТЭД по сравнению с машинами постоянного тока относятся: снижение затрат на ремонт и техническое обслуживание, уменьшение массы и размеров по сравнению с коллекторными двигателями, более высокие значения коэффициента полезного действия (КПД) и др. Однако по результатам многочисленных исследований наиболее изнашиваемым узлом АТЭД являются подшипники (более 50% всех неисправностей), потому особое внимание следует уделять повышению их надежности [1, 2]. Такое количество отказов подшипниковых узлов АТЭД связано с тем, что они работают в тяжелых условиях (осевые, радиальные нагрузки, динамические воздействия, вибрации, неблагоприятные климатические условия и пр.), причем современный АТЭД должен сохранять свои эксплуатационные параметры и обеспечивать высокую работоспособность в течение всего срока службы.

В зависимости от эксплуатационных воздействий отказы подшипниковых узлов АТЭД можно разделить на постепенные и внезапные. К постепенным отказам будут относиться: износ в результате взаимодействия тел качения, коррозия, проявление усталости металла на рабочих поверхностях внутреннего и наружного колец, а также сепаратора. Внезапные отказы связаны с действием недопустимых нагрузок на элементы подшипникового узла. К ним можно отнести трещины, изломы, сколы, разрывы внутренних и наружных колец подшипников и сепараторов.

Также отказы подшипниковых узлов можно разделить на конструкционные, производственные и эксплуатационные. Конструкционные отказы связаны с ошибками проектирования. Причинами, вызывающими производственные отказы, могут служить нарушения

технологии изготовления, применение материалов, не соответствующих требованиям, и др. Эксплуатационные отказы возникают в результате изменения технического состояния узла или детали локомотива.

С целью выработки рекомендаций по внесению изменений в конструкцию элементов подшипниковых узлов АТЭД нужно исследовать его напряженно-деформированное состояние под действием эксплуатационных факторов. Для этого необходимо построить математическую модель, учитывающую действие рабочих нагрузок и свойства материалов элементов подшипника. Полученная математическая модель позволит оценить возникающие напряжения в деталях подшипников АТЭД и установить зоны, которые предрасположены к развитию дефектов. Также для того, чтобы выявить отказы подшипниковых узлов АТЭД в эксплуатации на стадии зарождения дефекта, следует применять неразрушающие методы контроля, например виброакустическую диагностику. Опираясь на математическое моделирование напряженно-деформированного состояния подшипника АТЭД, можно выработать рекомендации, которые скорректируют технологический процесс виброакустического диагностирования с учетом наиболее часто образующихся дефектов.

Моделирование напряженно-деформированного состояния подшипника АТЭД типа ДАТ-510

Для исследования напряженно-деформированного состояния подшипника качения в качестве объекта моделирования был выбран подшипник АТЭД типа НО-32332 КМ. К одним из наиболее ответственных узлов этого подшипника относится сепаратор, повреждение которого приводит к отказу как всего подшипника, так и самого АТЭД.

При анализе работы подшипниковых узлов АТЭД в эксплуатации было выявлено, что на сепаратор действуют:

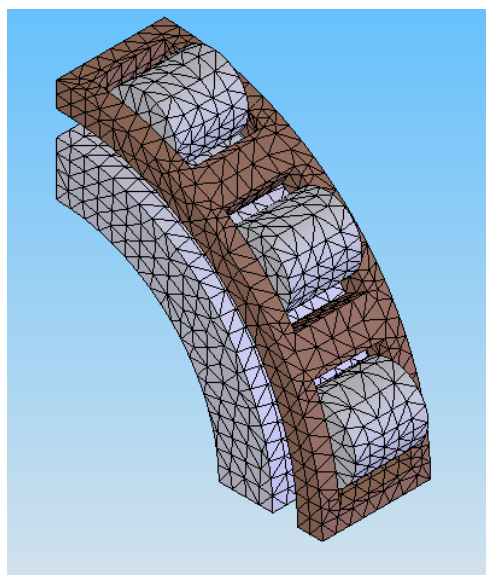
- центробежные силы инерции, возникающие при вращении сепаратора;
- силы надавливания роликов на перемычки сепаратора при перекосе колец подшипника;
- силы взаимодействия между телами качения и сепаратором;
- силы трения при соприкосновении сепаратора и направляющего кольца [3–7].

Для определения напряженно-деформированного состояния подшипника АТЭД был выбран программный пакет SolidWorks 2005, позволяющий реализовать расчет с помощью метода конечных элементов. Используя чертежи и физико-химические свойства материалов, из которых изготовлены узлы подшипника типа НО-32332К2М, была построена твердотельная модель данного подшипника в вышеуказанном программном пакете. После построения сетки конечных элементов для анализа напряженно-деформированного состояния элементов подшипника типа НО-32332К2М на элементы твердотельной модели было задано действие сил, отвечающих эксплуатационным. В качестве расчетного был выбран режим, соответствующий номинальной частоте вращения ротора АТЭД.

Для увеличения скорости расчета было проанализировано напряженно-деформированное состояние сектора подшипника, так как подшипник представляет собой симметричное тело. Результаты расчета представлены на рис. 1 и 2. Из них видно, что максимальные значения напряжений возникают в углах окон сепаратора, в связи с этим можно дать рекомендации по созданию более сглаженных форм окон вновь создаваемых подшипников качения, что позволит несколько снизить напряжения в таких точках, благодаря более равномерному распределению напряжений.

Деформированное состояние сепаратора подшипника НО-32332 К2 М под действием рабочих нагрузок иллюстрирует рис. 3. Наибольшие перемещения также появляются в перемычках сепаратора и углах окон. В случае возникновения дефектов (трещины, сколы и др.) на перемычках и углах окон сепаратора можно спрогнозировать ускоренное разрушение элементов подшипника, ибо данные участки сепаратора связаны с более высокими значениями напряжений. Поэтому при проведении визуального осмотра и диагностики технического состояния подшипникового узла необходимо должное внимание уделять

а



б

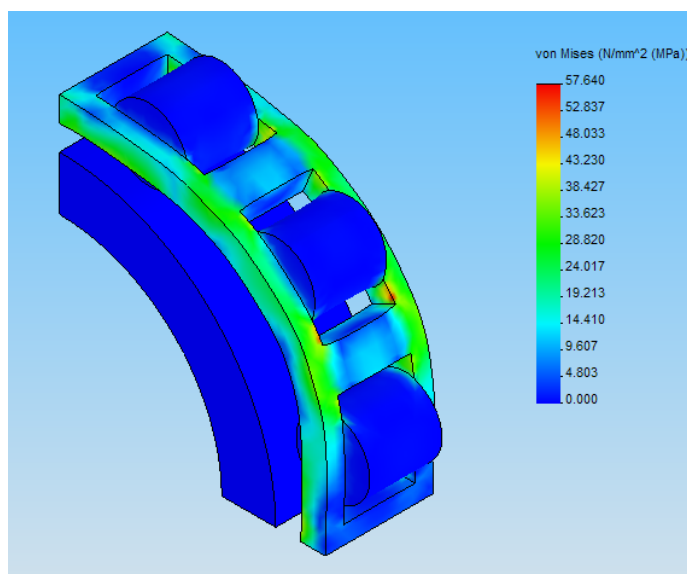


Рис. 1. Сетка конечных элементов (а) и результаты расчета напряженно-деформированного состояния подшипника при номинальной нагрузке (б)

стом ходу при номинальной и наибольшей частотах вращения. Измерение производят на подшипниковых щитах в трех направлениях через 2–3 мин после достижения двигателем требуемых частот вращения. Испытания для двигателей с опорно-осевым подвешиванием проводят в диапазоне частот 10–7000 Гц с виброускорением 120 м/с^2 , для двигателей с опорно-рамным подвешиванием – от 10 до 100 Гц и виброускорением 30 м/с^2 . Продолжительность испытаний – 50 млн циклов.

Однако испытания на вибропрочность в программу приемо-сдаточных испытаний не входят. Поэтому для повышения надежности АТЭД и оценки качества проведения технического обслуживания и ремонта рекомендуется внедрять позицию виброакустического контроля при поступлении электрической машины на текущий ремонт, а также при выходе ее из ремонта. На основании математического моделирования напряженно-деформированного состояния подшипника АТЭД особое внимание следует уделять техническому состоянию сепараторов подшипников качения.

При расчете вибропрочности элементов АТЭД расчетным режимом нужно выбирать движение тепловоза по прямолинейному участку пути с максимальной скоростью. В этом режиме уровень динамического воздействия и частота возмущающих воздействий будут максимальны [10].

В настоящее время отечественными производителями предлагаются различные стенды для проведения виброакустической диагностики подшипников качения. К таким стендам относится, например, стенд «Протон-СПП», предназначенный для корректного выявления дефектов подшипников качения перед их установкой на ремонт. Он позволяет осуществлять автоматическую диагностику технического состояния подшипников различной модификации, регистрировать и анализировать вибросигналы с целью выявления особенностей их технического состояния, хранить базу данных подшипников качения, подбирать аналогичные по геометрическим размерам подшипники с целью замены.

Также можно рассмотреть применение в современных локомотивных депо, обслуживающих АТЭД, системы вибродиагностики подшипников качения КОМПАКС-РПП, которая является модификацией системы компьютерного мониторинга КОМПАКС и предназначена для вибродиагностики подшипников качения. Данная система состоит из диагностической станции (секция пультовая, диагностический контроллер, монитор, клавиатура, блок бесперебойного питания, принтер лазерный), программного обеспечения КОМПАКС-РПП, подшипниковых стандов (приводов обкатки подшипников), комплектов оправок, маркера искрового и комплекта специальных ключей. Диагностическая станция системы подключается к силовой однофазной сети электропитания напряжением $220 \pm 22 \text{ В}$, частотой 50 Гц, потребляемая мощность – не более 200 Вт. Время диагностики подшипника с распечаткой протокола на принтере не превышает 3 мин без учета времени подготовки подшипника, установки на стенд и снятия с него, маркировки, консервации и упаковки.

Современные стенды вибродиагностики могут быть адаптированы для применения на различных предприятиях локомотивного хозяйства.

Заключение

Разработана конечно-элементная модель напряженно-деформированного состояния подшипника качения АТЭД. Получены результаты моделирования фрагмента подшипника и сепаратора АТЭД с величинами напряжений, возникающих под действием рабочих нагрузок. Выработаны рекомендации по внесению изменений в конструкцию сепаратора перспективных АТЭД с целью повышения их надежности в эксплуатации. Даны рекомендации по использованию виброакустической диагностики подшипников АТЭД на стадиях входного и выходного контроля. Предложены типы стандов, рекомендуемых к использованию на предприятиях локомотивного хозяйства.

Библиографический список

1. Андрющенко А. А. Асинхронный тяговый привод локомотивов : учеб. пособие / А. А. Андрющенко, Ю. В. Бабков, А. А. Зарифьян и др. – М. : Учеб.-метод. центр по образованию на ж.-д. транспорте, 2013. – 413 с.

2. Камаев А. А. Конструкция, расчет и проектирование локомотивов : учебник для студентов втузов, обучающихся по специальности «Локомотивостроение» / А. А. Камаев, Н. Г. Апанович, В. А. Камаев и др. – М. : Машиностроение, 1981. – 351 с.

3. Лосев А. В. Исследование работы сепараторов железнодорожных роликовых подшипников при высоких скоростях движения : автореф. дис. ... канд. техн. наук, специальность : 05.22.07 / А. В. Лосев. – М. : МИИТ, 1972. – 21 с.

4. Грищенко А. В. Математическая модель сепаратора подшипника качения локомотивных асинхронных электродвигателей / А. В. Грищенко, А. С. Хрущев, О. Р. Хамидов, М. С. Яшкин // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. – СПб. : ПГУПС, 2014. – Вып. 2. – С. 5–10.

5. Хамидов О. Р. Математическая модель вибро-возмущающих сил локомотивного асинхронного электродвигателя / О. Р. Хамидов, М. Н. Панченко // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. – СПб. : ПГУПС, 2013. – Вып. 4. – С. 60–67.

6. Грищенко А. В. К вопросу методов вибродиагностики асинхронных электродвигателей локомо-

тивов / А. В. Грищенко, О. Р. Хамидов // Материалы II Междунар. практич. конференции «Человек и транспорт», 28–30 июня 2012 г. – СПб. : ПГУПС, 2012. – С. 40–43.

7. Хамидов О. Р. Оценка технического состояния локомотивных асинхронных электродвигателей средствами вибродиагностики : автореф. дис. ... канд. техн. наук, специальность : 05.22.07. – СПб. : ПГУПС, 2014. – 21 с.

8. Грищенко А. В. Повышение эффективности технического обслуживания локомотивов / А. В. Грищенко, В. В. Грачев, В. А. Кручек, М. А. Шрайбер // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. – СПб. : ПГУПС, 2012. – Вып. 4. – С. 93–97.

9. Грищенко А. В. Изменение системы технического обслуживания локомотивов / А. В. Грищенко, В. В. Грачев, Д. Н. Курилкин, М. А. Шрайбер // Наука и образование транспорту. – 2017. – № 1. – С. 25–27.

10. Барков А. В. Вибрационная диагностика электрических машин в установившихся режимах работы : метод. указания / А. В. Барков, Н. А. Баркова, А. А. Борисов. – СПб. : Северо-Запад. учеб. центр, 2006. – 25 с.

Дата поступления: 28.08.2019

Решение о публикации: 03.09.2019

Контактная информация:

ШРАЙБЕР Марина Александровна – канд. техн. наук, доцент; goshapti4ka@yandex.ru

Stress-strain behavior analysis of the roller bearing for asynchronous induction motor**M. A. Shreiber**

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

For citation: Shreiber M.A. Stress-strain behavior analysis of the roller bearing for asynchronous induction motor. *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2019, vol. 16, iss. 4, pp. 650–657. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2019-4-650-657

Summary

Objective: To consider the issue of improving reliability of traction alternating-current machines. To study stress-strain behavior of the roller bearing for asynchronous traction motor (ATED) of a diesel

locomotive in service. To analyze the obtained results. To give recommendations on reliability improvement of ATED locomotives. **Methods:** Finite element method implemented in SolidWorks 2005 software package was chosen as the main method for research and calculation of stress-strain behavior. **Results:** The need for sudden failure prevention of ATED diesel locomotives in operation was defined. Stress concentration zones in elements of the bearing unit were determined. Recommendations on design development of ATED bearing cage were given. The need for improvement of ATED diagnostics system was established. The latter implies the implementation of vibration-based diagnostic systems being able to detect hidden faults of bearings at the stage of initial check during current repairs and maintenance as well as final check after the assembly in the process of production and after the repair. The need for repair and maintenance depot departments to be equipped with stands in order to conduct vibration-based diagnostics of roller bearings was identified. **Practical importance:** The importance of introducing improvements into the construction of ATED bearing cage was shown, taking into account stress occurrence during operation. It is recommended to implement vibroacoustic diagnostics of roller bearings, based on finite element model of ATED bearing, during the repair of an electric machine and as one of the stages of its final check. The above-mentioned will reduce the occurrence of sudden failures connected with heavy service load or troubles with assembly and production of ATED bearings. The introduced calculation procedures for stress-strain behavior of roller bearings can be applied in practice not only for ATED bearing units but also roller bearings similar in design (for instance, axle box bearings).

Keywords: Asynchronous traction motor, stress-strain behavior of roller bearing, vibroacoustic diagnostics of roller bearings.

References

1. Andryushchenko A. A., Babkov Y. V., Zari-fyan A. A. et al. *Asinkhronniy tyagoviy privod lokomotivov* [Asynchronous power actuator of locomotives]. Uchebnoye posobiye [Teaching aid]. Moscow, Uchebno-metodicheskiy tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte [Training and Methodology Centre for Railway Transport] Publ., 2013, 413 p. (In Russian)
2. Kamaev A. A., Apanovich N. G., Kamaev V. A. et al. *Konstruktsiya, raschet i proektirovaniye lokomotivov* [Locomotives: design, calculation and engineering]. Textbook for technical college students of “Locomotive engineering” speciality. Moscow, Mashinostroeniye Publ., 1981, 351 p. (In Russian)
3. Losev A. V. *Issledovaniye raboty separatorov zheleznodorozhnykh rolikovykh podshipnikov pry vysokikh skorostyakh dvizheniya* [Research on performance of spacing cages under high driving speed]. Abstract of Cand. Sci. (Engineering) dissertation, speciality: 05.22.07. Moscow, MIIT [Russian University of Transport] Publ., 1972, 21 p. (In Russian)
4. Grishchenko A. V., Khrushchev A. S., Khamidov O. R. & Yashkin M. S. Matematicheskaya model separatora podshipnika kacheniya lokomotivnykh asinkhronnykh elektrodvigately [Simulation model of a bearing cage of the locomotive induction motor]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg State Transport University]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2014, iss. 2, pp. 5–10. (In Russian)
5. Khamidov O. R. & Panchenko M. N. Matematicheskaya model vibrovozmushchayushchikh sil lokomotivnogo asinkhronnogo elektrodvigatelya [Simulation model of disturbance forces of the locomotive induction motor]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg State Transport University]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2013, iss. 4, pp. 60–67. (In Russian)
6. Grishchenko A. V. & Khamidov O. R. K voprosu metodov vibrodiagnostiki asinkhronnykh elektrodvigately lokomotivov [The methods of vibration-based diagnostics for locomotive induction motors]. *Materialy II Mezhdunarodnoy prakticheskoy konferentsii “Chelovek i transport”* [Proceedings of the 2nd International research and training conference “Human and transport”], June 28–30th, 2012. Saint Petersburg,

PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2012, pp. 40–43. (In Russian)

7. Khamidov O.R. *Otsenka tekhnicheskogo sostoyaniya lokomotivnykh asinkhronnykh elektrodvigatelye sredstvamy vibrodiagnostiky* [Health assessment of the locomotive induction motor by means of vibration-based diagnostics]. Abstract of Cand. Sci. (Engineering) dissertation, speciality: 05.22.07. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2014, 21 p. (In Russian)

8. Grishchenko A.V., Grachev V.V., Kruchek V.A. & Shreiber M.A. *Povysheniye effektivnosti tekhnicheskogo obsluzhivaniya lokomotivov* [The improvement of maintenance operation efficiency of locomotives]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg State Transport University]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2012, iss. 4, pp. 93–97. (In Russian)

9. Grishchenko A.V., Grachev V.V., Kurilkin D.N. & Shreiber M.A. *Izmeneniye sistemy tekhnicheskogo obsluzhivaniya lokomotivov* [Alteration of the locomotive maintenance operation system]. *Nauka i obrazovaniye transport* [Transport Science and Education], 2017, no. 1, pp. 25–27. (In Russian)

10. Barkov A.V., Barkova N.A. & Borisov A.A. *Vibratsionnaya diagnostika elektricheskikh mashin v ustanovivshikhsya rezhimakh raboty* [Vibration-based diagnostics of electrical machinery in steady-state operation]. Guidelines. Saint Petersburg, North-West Training Centre Publ., 2006, 25 p. (In Russian)

Received: August 28, 2019

Accepted: September 03, 2019

Author's information:

Marina A. SHREIBER – PhD in Engineering; Associate Professor; goshapti4ka@yandex.ru

УДК 656.078.1

Методические аспекты выбора местоположения транспортно-логистического кластера с учетом факторов, определяющих потенциал городов

Е. С. Юдникова

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

Для цитирования: Юдникова Е. С. Методические аспекты выбора местоположения транспортно-логистического кластера с учетом факторов, определяющих потенциал городов // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2019. – Т. 16, вып. 4. – С. 658–669. DOI: 10.20295/1815-588X-2019-4-658-669

Аннотация

Цель: Рассмотреть вопрос о необходимости выбора местоположения транспортно-логистического кластера (ТЛК) с учетом социально-экономических и транспортно-логистических факторов, определяющих потенциал городов. Показать экономическую целесообразность использования кластерной концепции в повышении конкурентоспособности региона. Разработать систему показателей, характеризующих социально-экономические и транспортно-логистические факторы потенциала городов, а также предложить методику обоснования выбора местоположения ТЛК с учетом этой системы. **Методы:** Охарактеризованы существующие методы размещения объектов логистической инфраструктуры, что позволило сравнить их возможности, проанализировать имеющиеся недостатки каждого метода, дать их классификацию. **Результаты:** Указано на недостатки методик для определения оптимального месторасположения объектов транспортно-логистической инфраструктуры. Установлена необходимость учета влияния социально-экономических, инфраструктурных, географических факторов, определяющих уровень потенциала места размещения объекта логистической инфраструктуры. В большинстве методик эти факторы учитываются косвенным образом либо не принимаются во внимание. Выявлена необходимость разработки системы показателей, характеризующих социально-экономические и транспортно-логистические факторы потенциала городов в регионе. **Практическая значимость:** Разработаны система первичных и вторичных показателей, характеризующих социально-экономический и транспортно-логистический потенциалы городов, методика определения местоположения регионального ТЛК. Учет социально-экономических и транспортно-логистических факторов, характеризующих потенциал городов, позволит оптимизировать выбор расположения ТЛК с целью повышения конкурентоспособности региона. Методика апробирована в виде расчетов по городам европейской части России.

Ключевые слова: Конкурентоспособность региона, кластерная концепция, региональный кластер, потенциал региона, система показателей уровня потенциала региона.

Введение

Развитие теории пространственной организации экономики и институционального подхода расширяет методологические границы исследования фундаментальной роли регио-

нов в экономическом развитии страны и условий, необходимых для ее реализации [1].

Обеспечение экономического развития и роста регионов является актуальной задачей в любое время. В связи с этим сформировалось направление по обеспечению процессов ста-

бильного развития экономики через создание региональных систем производства в контексте сложной формы организационной структуры. Одной из структур является кластер [2].

Создатель кластерной концепции М. Портер определял кластер как «группу географически соседствующих взаимосвязанных компаний и связанных с ними организаций, действующих в определенной сфере, характеризующихся общностью деятельности и взаимодополняющих друг друга. Географические масштабы кластера могут варьироваться от одного города или региона до страны или даже ряда соседствующих стран» [3].

М. П. Войнаренко обращал внимание на то, что кластер – это территориально-отраслевое добровольное объединение предпринимательских структур, которые тесно сотрудничают с научными учреждениями и органами местной власти с целью повышения конкурентоспособности собственной продукции и экономического роста региона [4].

Первый распределительный центр по модели логистического кластера в Европе был построен в г. Бремен в 1985 г. В настоящее время в Германии находятся более 30 логистических кластеров. Их функционирование привело к снижению общих издержек при перевозках, сокращению времени доставки грузов потребителям, уменьшению совокупных складских запасов предприятий и переключению части грузопотоков с автомобильного транспорта на железнодорожный [5].

Интеграционное и координационное управление в кластере комплексом хозяйственных объектов, объединенных общностью материального и сопутствующих потоков, позволяет получать синергетический эффект как в экономической, так и в социальной сферах деятельности. Эффективное управление логистическими системами на мезоуровне является полигоном для кластеризации хозяйственных объектов в масштабах страны. Синтезируя логистический и кластеризованный подходы к управлению цепями поставок, можно получить наивысший эффект в экономической и социальной сферах региона [5].

Методология эффективности транспортно-логистических кластеров

Проблемам теории развития транспортных систем уделяется внимание различными учеными [6–9]. Перспективным подходом и эффективным решением в области комплексного управления потоками, совершенствования методологии формирования и управления цепями поставок внутри логистической инфраструктуры является создание региональных транспортно-логистических кластеров (ТЛК). Логистический кластер представляет собой систему потоков, постепенно переходящую в систему цепей поставок. В такой системе максимально высокого результата можно достигнуть, применяя передовые логистические технологии.

Логистические кластеры на территории городов с высоким социально-логистическим потенциалом служат интенсивным инструментом развития экономики не только отдельного региона, но и государства в целом, способствуя образованию рынка логистических услуг и отдельных его участников.

Кластеризация региона обеспечивает многообразный социально-экономический эффект: появление производств и формирование всей необходимой инженерной, транспортной, социальной, инновационной инфраструктуры, осуществление научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работ, внедрение их результатов на производстве. Развитие кластеров служит эффективным механизмом в привлечении прямых инвестиций в регионы и активизации внешнеэкономической интеграции. Включение кластеров в глобальные цепочки поставок позволяет повысить уровень национальной технологической базы, обеспечить экономический рост за счет увеличения конкурентоспособности предприятий посредством внедрения передовых технологий и современного оборудования, получения предприятиями кластера доступа к передовым методам управления, специальным знаниям, а также выхода на международные рынки [6].

В концепции кластерной политики Российской Федерации выделено пять типов кластеров, одним из которых является ТЛК.

ТЛК – это межотраслевое добровольное объединение предпринимательских структур, транспортно-логистической инфраструктуры, общественных и других организаций, специализирующихся на перевозке грузов, хранении и грузопереработке, транспортно-экспедиционном, логистическом сервисном обслуживании и управлении товароматериальными и сопутствующими потоками, тесно сотрудничающих с научными, образовательными учреждениями, органами федеральной и региональной власти с целью повышения конкурентоспособности на отечественном и мировом рынках транспортно-логистических услуг.

Структура ТЛК может включать следующие элементы:

- ядро кластера в виде объектов, которые выполняют основную деятельность. Ими могут быть 4PL- и 3PL-провайдеры, крупные железнодорожные компании (филиалы ОАО «РЖД»);
- дополняющие объекты кластера в виде объектов, которые прямо обеспечивают функционирование объектов ядра;
- обслуживающие объекты кластера, прямо не связанные с функционированием объектов «ядра», но необходимые для деятельности ТЛК, в числе которых Центр Фирменного Транспортного Обслуживания ОАО «РЖД», грузовые терминалы, экспедиторы;
- вспомогательные объекты кластера, представленные различными сервисными предприятиями, среди которых образовательные учреждения будут обеспечивать инновационный характер ТЛК [6].

В рамках логистического кластера могут быть реализованы:

- 1) прямые функции за счет деятельности транспортных, экспедиторских компаний, складских комплексов, распределительных центров;
- 2) дополнительные функции посредством участия организаций, производящих упаковку и занимающихся утилизацией отходов;

- 3) обеспечивающие функции за счет дорожно-строительных компаний, сервисных центров, кредитных организаций, страховых компаний;

- 4) технические функции, выполняемые организациями-разработчиками складов, складских процедур и операций, логистических информационных систем и технологий.

Создание регионального ТЛК способствует формированию некоторых преимуществ за счет снижения:

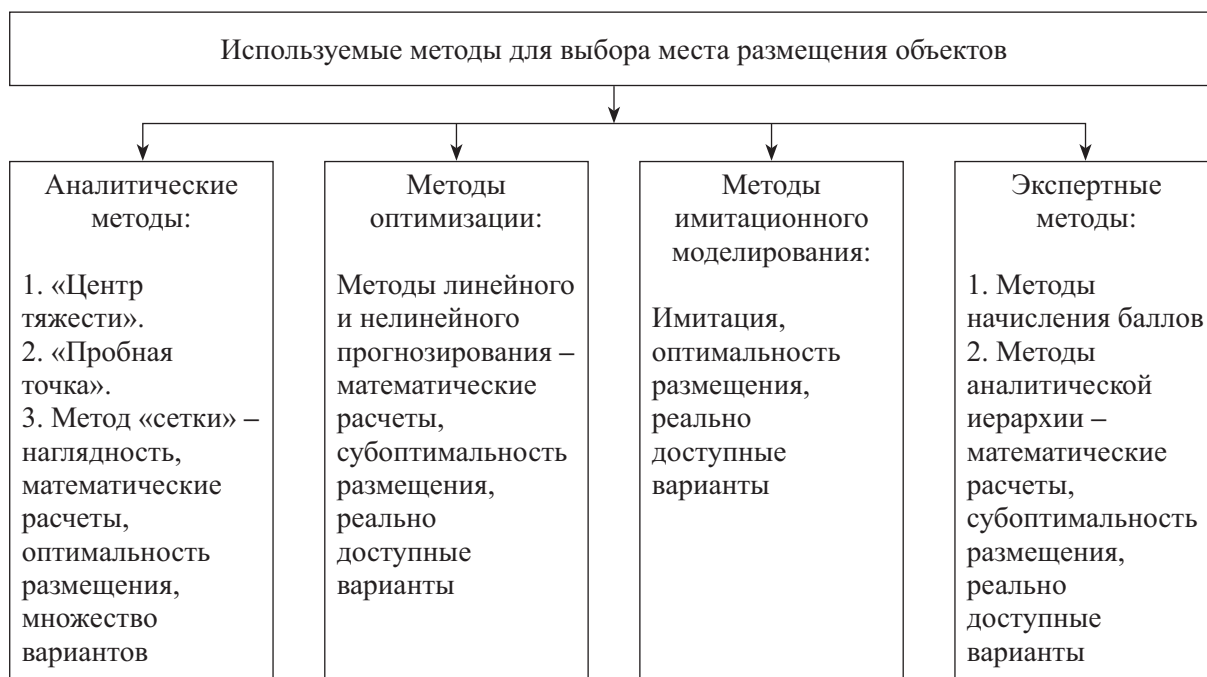
- 1) интервала времени в работе складского комплекса,
- 2) транспортных расходов на основе создания общей инфраструктуры,
- 3) экологических проблем путем решения вопросов ресурсосбережения, на основе повышения
- 4) уровня регионального дохода путем привлечения новых инвесторов, в том числе и иностранных,
- 5) уровня кадрового потенциала региона благодаря переквалификации персонала,
- 6) грузовых потоков на другие виды транспорта из-за усиления их взаимодействия,
- 7) стабилизацию коэффициента неравномерности грузопотока,
- 8) уровня модернизации транспортной инфраструктуры субъекта.

В России на данный момент не создано ни одного крупного ТЛК. В Новосибирской, Самарской, Калужской, Калининградской, Мурманской, Ульяновской областях, Нижнем Новгороде и Приморском крае только планируется создание ТЛК [10, 11].

Эффективность региональных ТЛК обусловливается выбором их местоположения.

Методика выбора места размещения ТЛК с учетом потенциала городов

Изучение основных методов, используемых для размещения объектов логистической инфраструктуры [8], позволило разработать классификацию, представленную на рисунке.



Классификация методов, используемых для выбора местоположения объектов

Для выбора оптимальных методов важен анализ их слабых сторон (табл. 1).

Следует отметить, что рассмотренные выше методы позволяют добиться результатов только в случае, когда необходимо определить месторасположение склада или распределительных центров для конкретного клиента с ограниченным числом известных потребителей и поставщиков.

В то же время влияние социально-экономических, инфраструктурных, географических факторов, которые представляют собой набор показателей, отражающих уровень развития потенциала места размещения объекта логистической инфраструктуры, учитывается в большинстве методик косвенным образом либо не принимается во внимание.

Под потенциалом понимается совокупность средств, условий, необходимых для ведения, поддержания, сохранения чего-нибудь. Понятие «потенциал» города, региона охватывает часть имеющихся ресурсов, которую можно получить с учетом достигнутого уровня развития и целесообразности вовлечения в определенный вид деятельности. Поэтому в

понятие транспортно-логистический «потенциал» города, региона включаются только те ресурсы, наличие которых возможно и эффективно на данном этапе развития и необходимо для достижения поставленной цели – выбора расположения ТЛК.

На основе анализа методов выбора места расположения объектов транспортной инфраструктуры был разработан методологический подход определения местоположения регионального ТЛК.

Методологически целесообразно проведение следующих действий:

1. Разработка системы показателей, характеризующих потенциал функционирования регионального ТЛК в стратегическом аспекте.
2. Определение списка городов, участвующих в выборе местоположения ТЛК в регионе.
3. Оценка потенциала функционирования регионального ТЛК по каждому объекту исследования (городу), согласно предложенной методике балльной оценки.
4. Выбор города, потенциал которого оптимально соответствует требованиям создания на его территории ТЛК.

ТАБЛИЦА 1. Недостатки методов по выбору мест размещения объектов логистической инфраструктуры

Методы	Недостатки методов
Методы «Центр тяжести», «Пробная точка»	1. Расстояние от пункта потребления материального потока до места размещения распределительного центра учитывается по прямой. 2. Минимизация только транспортных расходов из-за учета натуральных параметров (расстояние, объем, время). 3. Учет спроса на продукцию, без размеров предложения
Метод «Сетки» как частный случай метода «Центр тяжести»	1. Отсутствие учета возможных изменений транспортных тарифов, объемов закупаемых и реализуемых грузов, изменения источников поставки и потребления. 2. Линейная зависимость транспортных тарифов от расстояния, что не соответствует практике
Методы линейного программирования на примере транспортной задачи	1. Масштаб решаемых задач и трудность включения в исходные условия данных о постоянных издержках. 2. Оптимальность выбранного варианта ограничена заранее предусмотренным вариантом альтернатив. 3. Неполный учет факторов, определяющих эффективность перевозки (параметры транспортных средств, состояние путей сообщения, режим их загрузки и т. д.). Нет учета экономичного использования энергоресурсов и снижения воздействия на окружающую среду
Имитационное моделирование	Не гарантирует получения оптимального решения
Экспертные методы	1. Возможность субъективной оценки влияния факторов на размещение объектов логистической инфраструктуры, основанной на ощущениях, интуиции и опыте экспертов. 2. Отсутствие учета динамики показателей развития экономики региона и его инфраструктурной оснащенности

5. Определение в границах выбранной территории на основе комплекса методов (аналитических, моделирования) реально доступных мест для размещения ТЛК.

6. Выбор окончательного варианта местоположения ТЛК.

В исследовании были выделены группы факторов, определяющих потенциал городов, влияние которых на макроуровне характеризуется следующими показателями:

1. Социально-экономические факторы, включающие показатели численности населения города, среднедушевых доходов населения, валового регионального продукта (ВРП), оборота розничной торговли, занятости населения. Они рассматриваются как первичные.

2. Инфраструктурные факторы, в составе которых показатели объема оборота грузов и пассажиров на железнодорожном транспорте, плотности железнодорожных путей общего пользования, плотности автомобильных дорог общего пользования. Эти показатели рассматриваются как вторичные.

3. Географические факторы, включающие наличие транспортных коридоров или близость к ним, транспортную доступность с мегаполисами Москва и Санкт-Петербург, расположение относительно внешних границ.

Методика оценки потенциала территории городов для создания ТЛК [12] включает этапы, представленные в табл. 2.

ТАБЛИЦА 2. Методика оценки потенциала городов для создания регионального ТЛК

Этап	Характеристика
1. Отбор первичных и вторичных показателей оценки логистического потенциала	Первичные показатели, характеризующие уровень социально-экономического потенциала: 1) численность населения города, 2) среднемесячные душевые доходы населения, 3) оборот розничной торговли на душу населения, 4) занятость населения, 5) ВРП на душу населения
	Вторичные показатели, характеризующие уровень развития транспортной инфраструктуры в регионе: 1) объем оборота грузов и пассажиров на железнодорожном транспорте, 2) плотность железнодорожных путей общего пользования, 3) плотность автомобильных дорог общего пользования.
2. Ограничение исследования	Отбор городов, имеющих наиболее приоритетное географическое положение, не включая мегаполисы
3. Определение потенциала городов в соответствии с данными по первичным и вторичным показателям	1. Определение весовых значений коэффициентов по первичным и вторичным показателям. 2. Экспертная оценка первичных и вторичных показателей по шестибальной (от 1 до 6) системе для каждой группы городов. 3. Определение уровня потенциала городов: высокий, средний, низкий по группам первичных и вторичных показателей
4. Оценка уровня потенциала городов с учетом данных по первичным и вторичным показателям	Итоговая оценка данных по первичным и вторичным показателям на основе их суммирования с определением уровня потенциала территории

При отборе городов необходимо учитывать количество и классификацию городов по численности населения (табл. 3) [13].

Необходимо определить число групп городов (n), которые будут участвовать в исследовании, по формуле Стерджесса

$$n = 1 + 3,322 \log N,$$

в которой n – число групп, N – число единиц совокупности (в исследовании рассматривались 30 городов европейской части России).

Далее следует рассчитать величину интервала между группами городов следующим образом:

$$i = \frac{(x_{\max} - x_{\min})}{n},$$

где i – величина равного интервала; x_{\max} – наибольшее значение показателя (численность городов; среднедушевые денежные доходы населения, руб. в месяц; оборот розничной торговли на душу населения, млн руб.; уровень участия в рабочей силе, %; ВРП на душу населения, млн руб.); x_{\min} – наименьшее значение соответствующего показателя.

Нижняя граница каждой группы определяется по формуле

$$I = (X_{\min} + i_n).$$

Более детально рассмотрим последовательность действий на третьем и четвертом этапах.

Для получения весовых значений первичных и вторичных показателей был использован метод экспертной оценки с учетом зна-

ТАБЛИЦА 3. Классификация городов по численности населения в РФ

Города	Население, тыс. чел.	Число городов
Крупнейшие	Свыше 1000	15
Крупные	От 250 до 1000	164
Большие	От 100 до 250	90
Средние	От 50 до 100	155
Малые	От 10 до 50	788
	Всего	1212

чимости влияния показателя на потенциал города. В сумме весовые коэффициенты равны единице. Величины коэффициентов по первичным показателям представлены в табл. 4.

По каждому городу экспертным путем определяется балльная оценка (от 1 до 6 баллов) по всем первичным показателям. Затем по каждой группе рассчитывается рейтинговая оценка каждой группы:

$$R = K * B,$$

где R – рейтинговая оценка; K – весовое значение; B – значение, баллы.

На основании полученных рейтинговых оценок первичных показателей по каждому городу находится уровень потенциала: высокий, средний, низкий по показателям численность населения городов, среднедушевые денежные доходы населения, оборот розничной торговли на душу населения, уровень участия в рабочей силе, ВРП на душу населения.

Форма расчетов уровня социально-экономического потенциала городов по первичным показателям приведена в табл. 5.

Затем составляется таблица по всем первичным показателям (табл. 6).

На основании полученных оценок каждому городу присваивается уровень потенциала

ТАБЛИЦА 4. Значения коэффициентов по первичным показателям

Показатель	Весовые значения показателей
Численность населения городов, тыс. чел.	0,1
Среднедушевые денежные доходы населения, руб. в месяц	0,2
Оборот розничной торговли на душу населения, млн руб.	0,2
Уровень участия в рабочей силе, %	0,3
ВРП на душу населения, млн руб.	0,2

ТАБЛИЦА 5. Расчет потенциала городов по первичному показателю «Численность»

Город	Первичный показатель	Весовое значение	Экспертная оценка, балл	Рейтинговая оценка как произведение весового значения на экспертную оценку в баллах	Уровень потенциала
1	2	3	4	5	6

ТАБЛИЦА 6. Оценка логистического потенциала городов по первичным показателям

Города	Оценка						
	численности городского населения, чел.	среднедушевых доходов населения, руб. в месяц	оборота розничной торговли на душу населения, млрд руб.	уровня участия в рабочей силе, %	ВРП на душу населения, млн руб.	Сумма оценок	Уровень потенциала
1	2	3	4	5	6	7	8

с учетом первичных показателей: высокий – от 4,1 до 6; средний – от 2,1 до 4; низкий – от 0,1 до 2.

Затем проводится оценка потенциала городов по вторичным показателям (табл. 7).

Порядок расчетов уровня по вторичным показателям аналогичен расчетам уровня потенциала по первичным показателям. Оценка логистического потенциала городов по вторичным показателям дается по форме табл. 8.

На основании полученных оценок определяется по каждому городу уровень потенциала по вторичным показателям: высокий, средний, низкий.

На четвертом этапе составляется обобщенная таблица по первичным и вторичным показателям (табл. 9). По каждому субъекту определяется окончательный уровень потенциала городов и проводится отбор оптимальных городов.

ТАБЛИЦА 7. Значения коэффициентов по вторичным показателям

Показатели	Весовое значение показателя
Отправление грузов железнодорожным транспортом, млн т	0,3
Отправление пассажиров железнодорожным транспортом, тыс. чел.	0,3
Плотность железнодорожных путей общего пользования, км путей на 10 000 кв. км	0,2
Плотность автомобильных дорог общего пользования, км путей на 10 000 кв. км	0,2

ТАБЛИЦА 8. Логистический потенциал городов по вторичным показателям

Города	Оценка				Сумма оценок	Уровень потенциала
	отправки грузов железнодорожным транспортом, млн т	отправки грузов автомобильным транспортом, млн т	плотности железнодорожных путей на 10 000 км	плотности автомобильных путей на 10 000 км		
1	2	3	4	5	6	7

ТАБЛИЦА 9. Уровень потенциала городов на основе итоговой оценки по первичным и вторичным показателям

Город	Оценка		Итоговая оценка	Уровень потенциала территории
	по первичным показателям	по вторичным показателям		
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>

Методика была разработана на примере городов европейской части России, где расположены Северо-Западный, Центральный и Южные округа, в состав которых входят 520 городов (без мегаполисов).

Из их числа рассматривались 30 (6%) крупных, больших, средних и малых городов в европейской части России, которые могут оцениваться как перспективные территории для формирования ТЛК. Однако расчеты показали, что только 14 городов, среди которых первые позиции занимают Клин – 8,2, Краснодар – 7,3, Белгород – 7,1, Мурманск – 6, имеют высокий уровень потенциала с итоговой оценкой от 5,2 до 8,2, 11 городов характеризуются средним уровнем потенциала с итоговой оценкой от 3,7 до 5,1 [14].

Методически важно при выборе городов для формирования ТЛК учитывать географические факторы, а именно: предпочтительную близость к мегаполисам, наличие международных транспортных коридоров, близость к внешним границам. С их учетом интересно рассмотреть в качестве примера Псковскую область для создания ТЛК.

Хотя расчеты показали, что у Пскова средний уровень потенциала по первичным (кроме ниже среднего показателя по ежемесячным среднедушевым денежным доходам населения) и вторичным показателям составляет 3,7 [14], однако Псковская область имеет значительные преимущества в геополитическом положении. Главная ее особенность – приграничное расположение. Административно область разделена на 24 района, из них 9 приграничных, имеются 14 городов, из которых Псков (208 тыс. населения) и Великие Луки (91 тыс. населения) являются отно-

сительно крупными экономическими центрами.

Псковская область – единственный субъект РФ, у которого есть внешние границы с Беларуссией (305 км), Эстонией (254,4 км), Латвией (274,6 км), а также внутренние границы с Новгородской и Ленинградской областями Северо-Западного экономического района, с Тверской и Смоленской областями Центрального экономического района РФ.

В регионе действуют три таможни: Псковская, Великолукская, Себежская. Через Псков проходит международный транспортный коридор № 9 от границы с Финляндией к Санкт-Петербургу и далее (через Москву и Псков) до границ с Украиной и Беларуссией. Также важным конкурентным преимуществом области является ее расположение между тремя полюсами экономического развития: мегаполисами Москва и Санкт-Петербург, масштабным рынком Европейского Союза.

Заключение

Использование методики оценки потенциала городов с учетом влияния социально-экономических, инфраструктурных и географических факторов для возможности формирования на их территории ТЛК будет способствовать разработке списка перспективных городов, более обоснованному подходу для выбора их местоположения в регионах. Планирование развития кластера вблизи мегаполисов, внешних границ, возможности участия в международных транспортных коридорах обеспечит значительное улучшение уровня развития транспортной инфраструктуры, качества

транспортных услуг и оптимизацию потоков в плотно населенных регионах страны.

Создание ТЛК в перспективных городах регионов позволит превратить их из малоэффективных транспортно-промышленных узлов в важные центры международных транзитных «коридоров», способствуя экономическому процветанию за счет развития в них производства, торговли, международных связей.

Библиографический список

1. Болгова Е. В. Экономические кластеры: институциональная природа и условие эффективности инновационного каркаса региона / Е. В. Болгова // Экономические науки. – 2009. – № 12 (61). – С. 249–252.

2. Кулубеков Р. Р. Институциональный подход в исследование кластера / Р. Р. Кулубеков, Л. Б. Самойлова // Молодой ученый. – 2014. – № 4. – С. 557–561.

3. Портер М. Конкурентная стратегия. Методика анализа отраслей и конкурентов / М. Портер ; пер. с англ. И. Минервин. – М. : Изд-во Альпина Паблишер, 2016. – 456 с.

4. Войнаренко М. П. Кластеры в институциональной экономике = Clusters in the institutional economy : монография / М. П. Войнаренко. – СПб.: АНО «Ин-т проблем эконом. возрождения», 2013. – 494 с.

5. Бывших Е. Ю. Кластерный подход для повышения конкурентоспособности железнодорожного транспорта / Е. Ю. Бывших, Е. С. Юдникова // Системный анализ и логистика. – 2016. – № 2 (13). – С. 40–43.

6. Rodrigue J.-P. The geography of transport systems / J.-P. Rodrigue. – London ; New York : Taylor & Francis e-Library, 2006. – 259 p.

7. Notteboom T. Inland terminals within North American and European supply chains / T. Notteboom // Transport and Communications. Bulletin for Asia and the Pacific. – 2009. – N 78. – P. 19–22.

8. Маликов О. Б. Складская и транспортная логистика в цепях поставок : учеб. пособие / О. Б. Маликов. – СПб. : Питер, 2015. – 400 с.

9. Бывших Е. Ю. Применение кластерного подхода как способ повышения конкурентоспособности железнодорожного транспорта / Е. Ю. Бывших, Е. С. Юдникова // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. – 2016. – № 2 (7). – С. 40–43.

10. Майер А. С. Уровень кластеризации транспортно-логистических услуг в России и Европе / А. С. Майер // Междунар. экон. форум 2013. – URL : <http://be5.biz/ekonomika1/r2013/1696.htm> (дата обращения : 12.09.2019 г.).

11. Покровская О. Д. Роль Новосибирского мультимодального транспортного узла в транспортно-логистическом кластере России / О. Д. Покровская, М. А. Зачешингрива // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. – СПб. : ПГУПС, 2015. – Вып. 3 (44). – С. 85–103.

12. Методы, используемые для определения места расположения склада на обслуживаемой территории. – URL : https://studref.com/476046/ekonomika/metody_ispolzuemye_opredeleniya_mesta_raspolzheniya_sklada_obslyuzhivaemoy_territorii (дата обращения : 12.09.2019 г.).

13. Города России. – URL : https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%93%D0%BE%D1%80%D0%BE%D0%B4%D0%B0_%D0%A0%D0%BE%D8%D1%81%D0%B8%D0%B8 (дата обращения : 12.09.2019 г.).

14. Бывших Е. Ю. Анализ предпосылок создания транспортно-логистического кластера Псковской области / Е. Ю. Бывших, Е. С. Юдникова // Логистика – Евразийский мост : материалы 12-й Междунар. науч.-практич. конференции (18–20 мая 2017 г., Красноярск) : в 2 ч. – Красноярск, 2017. – Ч. 1. – С. 306–310.

Дата поступления: 30.09.2019

Решение о публикации: 07.10.2019

Контактная информация:

ЮДНИКОВА Елена Сергеевна – д-р экон. наук, профессор; elena.judnikova@yandex.ru

Methodological aspects of selection of a logistics cluster location accounting for factors determining city potential

E. S. Iudnikova

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

For citation: Iudnikova E. S. Methodological aspects of selection of a logistic cluster location accounting for factors determining city potential. *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2019, vol. 16, iss. 4, pp. 658–669 (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2019-4-658-669

Summary

Objective: Consider the problem of necessity of selection of a transport and logistics cluster location accounting for social, economic, transport and logistical factors determining city potential. Demonstrate economic expediency of application of cluster conception to increasing competitive advantage of a region. Develop a system of indices characterizing social, economic, transport and logistical factors of cities' potential. Propose a method for justification of selection of a transport and logistics cluster location accounting for this system. **Methods:** Existing methods of locating logistical infrastructure objects are characterized, which allowed for comparison of their capabilities, analysis of shortcomings inherent in each of the methods, and classification of these methods. **Results:** Shortcomings of methods for determination of the best possible location of transport and logistics infrastructure are outlined. The need for accounting for the influence of social, economic, infrastructural and geographical factors which determine the level of potential of a location for a logistical infrastructure object is established. Most existing methods either indirectly accounted for these factors or did not take them into consideration. The need for developing a system of indices characterizing social, economic, transport and logistical factors of potential of cities within a region is established. **Practical importance:** A system of primary and secondary indices characterizing social, economic, transport and logistical potentials of cities, and a method for determining the location of a regional transport and logistics cluster were developed. Accounting for social, economic, transport and logistics factors characterizing cities' potential would allow optimizing the choice of location of a transport and logistics cluster in order to increase a region's competitiveness. The method is tested with calculation for cities of European part of Russia.

Keywords: Competitiveness of a region, cluster conception, regional cluster, region's potential, system of region's potential level indices.

References

1. Bolgova E. V. Ekonomicheskie klastery: institutsional'naya priroda i uslovie effektivnosti innovatsionnogo karkasa regiona [Economic clusters: institutional nature and condition of efficiency of innovative framework of a region]. *Ekonomicheskie nauki [Economic sciences]*, 2009, no. 12 (61), pp. 249–252. (In Russian)
2. Kulubekov R. R. & Samoilova L. B. Institut-sional'nyi podkhod v issledovanii klastera [Institutional approach to cluster studies]. *Molodoi uchenyi [Young researcher]*, 2014, no. 4, pp. 557–561. (In Russian)
3. Porter M. *Konkurentnaia strategii. Metodika analiza otraslei i konkurentov [Competitive strategy. Techniques for analyzing industries and competitors]*. Per. s angl. I. Minervin. Moscow, Al'pina Publisher House, 2016, 456 p. (In Russian)
4. Voinarenko M. P. *Klastery v institutsional'noi ekonomike [Clusters in the institutional economy]*. Monograph. Saint Petersburg, ANO "Institut problem ekonomicheskogo vrozozhdeniia" [Institute for problems of economic renewal] Publ., 2013, 494 p. (In Russian)
5. Byvshikh E. Iu. & Iudnikova E. S. Klasternyi podkhod dlia povysheniia konkurentosposobnosti

zheleznodorozhnogo transporta [Cluster approach to increasing competitiveness of railway transport]. *Sistemnyi analiz i logistika* [Systems analysis and logistics], 2016, no. 2 (13), pp. 40–43. (In Russian)

6. Rodrigue J.-P. *The geography of transport systems*. London and New York, Taylor & Francis e-Library Press, 2006, 259 p.

7. Notteboom T. Inland terminals within North American and European supply chains. *Transport and Communications. Bulletin for Asia and the Pacific*, 2009, no. 78, pp. 19–22.

8. Malikov O. B. *Skladskaiia i transportnaia logistika v tsepiakh postavok* [Warehousing and transportation logistics in delivery chains]. Study guide. Saint Petersburg, Piter Publ., 2015, 400 p. (In Russian)

9. Byvshikh E. Iu. & Iudnikova E. S. Primeni-
nie klasterного podkhoda kak sposob povysheniia konkurentosposobnosti zheleznodorozhnogo transporta [Application of cluster approach as a method for increasing competitiveness of rail transport]. *Transport Aziatsko-Tikhookeanskogo regiona* [Transport of the Asia-Pacific region], 2016, no. 2 (7), pp. 40–43. (In Russian)

10. Maier A. S. Uroven' klasterizatsii transportno-logisticheskikh uslug v Rossii i Evrope [Level of clusterization of transport and logistics services in Russia and Europe]. *Mezhdunarodnyi ekonomicheskii forum 2013* [International Economic Forum 2013]. Available at: <http://be5.biz/ekonomika1/r2013/1696.htm> (accessed: 12.09.2019). (In Russian)

11. Pokrovskaia O. D. & Zacheshingriva M. A. Rol' Novosibirskogo mul'timodal'nogo transportnogo uzla v transportno-logisticheskom klasterе Rossii [The role of the Novosibirsk multi-modal hub in Russia's transport

and logistics cluster]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putei soobshcheniia* [Proceedings of Petersburg Transport University]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2015, iss. 3 (44), pp. 85–103. (In Russian)

12. *Metody, ispol'zuemye dlia opredeleniia mesta raspolozheniia sklada na obsluzhivaemoi territorii* [Methods used for determination of location of a warehouse in the service area]. Available at: https://studref.com/476046/ekonomika/metody_ispolzuemye_opredeleniya_mesta_raspolozheniya_sklada_obslyuzhivae-moy_territorii (accessed: 12.09.2019). (In Russian)

13. *Goroda Rossii* [Russia's cities]. Available at: https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%93%D0%BE%D1%80%D0%BE%D0%B4%D0%B0_%D0%A0%D0%BE%D81%D1%81%D0%B8%D0%B8 (accessed: 12.09.2019). (In Russian)

14. Byvshikh E. Iu. & Iudnikova E. S. Analiz predposylok sozdaniia transportno-logisticheskogo klastera Pskovskoi oblasti [Analysis of preconditions for setting up a transport and logistics cluster in Pskov Region]. *Logistika – Evraziiskii most. Materialy 12-oi Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Logistics – Eurasian bridge. Proceedings of the 12th International research and engineering conference]. Krasnoyarsk, May 18–20, 2017. 2 pt. Krasnoyarsk, 2017, pt 1, pp. 306–310. (In Russian)

Received: September 30, 2019

Accepted: October 07, 2019

Author's information:

Elena S. IUDNIKOVA – D. Sci. in Economy, Professor; elena.judnikova@yandex.ru



УДК 5 52 528.489

Определение коэффициента рефракции на коротких расстояниях

Ю. В. Лобанова, М. Я. Брынь, Д. А. Афонин

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

Для цитирования: Лобанова Ю. В., Брынь М. Я., Афонин Д. А. Определение коэффициента рефракции на коротких расстояниях // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2019. – Т. 16, вып. 4. – С. 670–676. DOI: 10.20295/1815-588X-2019-4-670-676

Аннотация

Цель: Вывести формулы определения коэффициента рефракции путем геодезических измерений, используя разные аргументы. Привести результаты экспериментальных исследований дневного хода коэффициента рефракции, вычислить значения коэффициента рефракции по предложенным формулам. **Методы:** Проанализированы полученные материалы. Выведены формулы расчета коэффициента рефракции с помощью измерений и построения его дневного хода при разных углах наклона. **Результаты:** Определены величины дневного хода коэффициента рефракции, вычислены значения коэффициента рефракции по приведенным формулам и проанализированы результаты. **Практическая значимость:** Выявленная проблема зависимости влияния вертикальной рефракции при изменении углов наклона показывает необходимость изучения влияния вертикальной рефракции, которое связано с изменением углов наклона и расстояний. На основе построенных зависимостей влияния вертикальной рефракции на результаты тригонометрического нивелирования можно выбрать максимально благоприятные внешние условия проведения геодезических измерений для повышения их точности.

Ключевые слова: Вертикальная рефракция, коэффициент рефракции, тригонометрическое нивелирование, электронный тахеометр, окружающая среда.

При внедрении в геодезическое производство электронные тахеометры стали основными приборами для геодезического сопровождения при строительстве инженерно-технических сооружений таких как мосты, тоннели, дороги и др. При всех достоинствах использования этих приборов при выполнении работ (оперативность, высокая точность, универсальность и др.) их применение ограничено для решения ряда инженерных задач,

связанных с тригонометрическим нивелированием из-за влияния вертикальной рефракции. Необходимость определения коэффициента рефракции обусловлено тем, что в серии приборов, поставляемых на территорию России, обычно его устанавливают равным 0,14 или 0,13, который может быть изменен исполнителем.

Способы определения вертикальной рефракции по результатам геодезических изме-

рений не всегда относятся к наиболее совершенным, однако являются самыми многочисленными. Чтобы повысить точность геодезических измерений, следует совершенствовать способы определения поправки за рефракцию [1–8].

К геодезическим способам определения и учета вертикальной рефракции относятся те, в которых применяются геодезические приборы. Наибольшее количество работ по измерению вертикальной рефракции приходится на XX в. [9–14].

Расстояние от электронного тахеометра до визирной цели на строительной площадке редко превышает 300 м, поэтому исследование рефракции на короткие расстояния – задача актуальная.

При одностороннем тригонометрическом нивелировании превышения h между пунктами вычисляются по формуле [15]

$$h = d \cdot \operatorname{ctg} z + i - l + f, \quad (1)$$

в которой d – горизонтальное проложение между пунктами, z – зенитное расстояние, i – высота прибора, l – высота визирной цели, f – поправка за совместное влияние кривизны Земли и рефракцию.

Поправка f рассчитывается следующим образом [3]:

$$f = \frac{1-k}{2R} \cdot d^2.$$

Здесь R – радиус Земли, k – коэффициент рефракции, который находится так [7]:

$$k = \frac{R}{R_c},$$

где R_c – радиус световой кривой.

В данной статье выводятся формулы определения коэффициента рефракции путем геодезических измерений, используя разные аргументы.

Рассмотрим различные пути получения коэффициента рефракции на основе геомет-

рического и тригонометрического нивелирования.

По результатам одностороннего тригонометрического нивелирования на эталонном вертикальном базисе

Из формулы (1) легко получить выражение, в котором

$$k = 1 - \frac{2R}{d^2} (h - d \cdot \operatorname{ctg} z - i + l). \quad (2)$$

Допустим, что измерения электронным тахеометром выполняются на отражательные пленки (ОП), поэтому примем, что $l = 0$. Подставив в формулу (2) вместо h значение превышения, определенного из геометрического нивелирования $h_{\text{теор}}$, получим

$$k = 1 - \frac{2R}{d} \left(\frac{h_{\text{теор}}}{d} - \operatorname{ctg} z - \frac{i}{d} \right). \quad (3)$$

По разностям измеренных и истинных зенитных расстояний

Для выявления величины и характера влияния вертикальной рефракции на измеренные зенитные расстояния необходимо знать их теоретические значения, которые можно рассчитать по (1) при $l = 0$:

$$\operatorname{ctg} z_{\text{теор}} = \frac{h_{\text{теор}} - i}{d} - \frac{d}{2R}.$$

Для вычисления коэффициента рефракции найдем, что $\Delta z = z_{\text{изм}} - z_{\text{теор}}$. Считая, что влияние рефракции можно, с одной стороны, определить по формуле из [7] $r = \frac{d \cdot \Delta z}{\rho''}$, а с

другой – $r = \frac{k \cdot d^2}{2R}$, получим $\frac{d \cdot \Delta z}{\rho''} = \frac{k \cdot d^2}{2R}$.

И окончательно будем иметь

$$k = \frac{2R \cdot \Delta z}{d \cdot \rho''}. \quad (4)$$

По вычисленным и известным превышениям

Если принять значение превышения из геометрического нивелирования ($h_{\text{теор}}$) за истинное и связать его с превышением из тригонометрического нивелирования ($h_{\text{триг.н}}$) без учета поправки за кривизну Земли, то

$$h_{\text{теор}} = h_{\text{триг.н}} - \frac{k \cdot d^2}{2R}.$$

Окончательно k равно

$$k = -\frac{2R(h_{\text{теор}} - h_{\text{триг.н}})}{d^2} = \frac{2R \cdot \Delta h}{d^2}, \quad (5)$$

где $\Delta h = h_{\text{триг.н}} - h_{\text{теор}}$.

Полевые экспериментальные исследования производились днем 20 апреля 2019 г. Территория обследования представляла собой строительную площадку, визирный луч проходил частично над строительным забором в равнинной местности, подстилающей поверхностью

которой служил асфальт. Превышение между точками 3 и 0 (см. рисунок) определялось геометрическим нивелированием цифровым нивелиром Trimble DiNi 0.3 со средней квадратической погрешностью (СКП) измерения превышений 0,3 мм/км. Точка A зафиксирована на здании (наклеена ОП). Отвесные расстояния были измерены электронным тахеометром с насадкой, при этом передача отметки на ось тахеометра выполнялась с помощью цифрового нивелира. СКП измерения превышения т. 0 – т. A принята равной $m = 1,4$ мм.

Определение зенитных расстояний и наклонных расстояний выполнялось электронным тахеометром Leica Viva TS 16 M R500 с СКП измерения углов $1''$ и точностью измерения расстояний $\pm (2 \text{ мм} + 2 \cdot 10^{-6} \cdot D)$, где D – расстояние от прибора до объекта.

Эксперименты выполнялись с 15 ч 10 мин до 17 ч 40 мин (всего выполнено 8 циклов измерений) при перепаде температуры в 3° (от $+9$ до $+12^\circ \text{C}$). Давление оставалось постоянным (764 мм рт. ст.), а сила ветра постоянно менялась. В таблице представлены величины

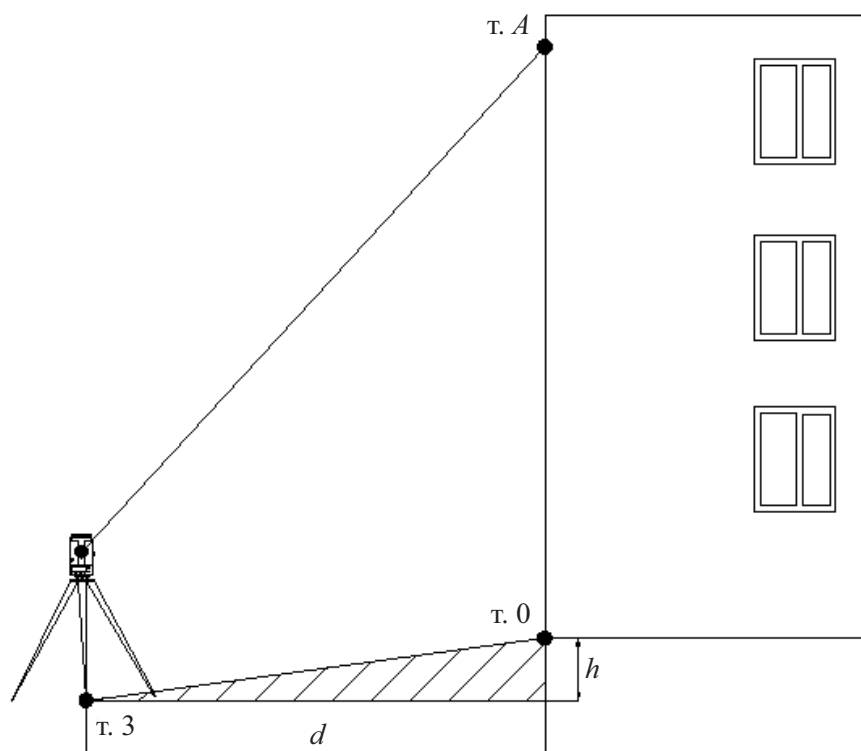


Схема проведения эксперимента

Изменения коэффициентов рефракции

№	Время измерений	$\Delta z''$	Δh , мм	k	$k(z)$	$k(h)$
1	15:10	1,3	– 1,0	0,51	0,49	0,48
2	15:50	1,8	– 0,7	0,67	0,68	0,63
3	16:10	2,8	0,2	1,08	1,06	1,04
4	16:20	1,8	– 0,7	0,67	0,68	0,63
5	16:40	0,8	– 1,5	0,30	0,30	0,26
6	17:00	0,8	– 1,4	0,30	0,30	0,27
7	17:20	2,3	– 0,4	0,82	0,87	0,78
8	17:40	1,3	– 1,1	0,49	0,49	0,46

$\Delta z = z_{\text{измер}} - z_{\text{теор}}$ и $\Delta h = h_{\text{триг.н}} - h_{\text{теор}}$, а результаты значений коэффициентов рефракции получены по различным формулам: по (3) – величины k , по (4) – $k(z)$ и по (5) – $k(h)$.

Проанализировав полученные результаты, можно сделать следующие выводы:

– коэффициенты рефракции, вычисленные по формулам (3)–(5), практически совпадают, и, значит, все формулы корректны и могут применяться как независимые, так и взаимозаменяемые;

– коэффициенты рефракции в период проведения эксперимента менялись в пределах от +0,26 до +1,08 и прослеживается такая закономерность: все значения положительные и не был зафиксирован момент перехода коэффициента рефракции через 0 (момент смены знака).

Библиографический список

1. Богомолова Н. Н. Априорная оценка точности подземной геодезической мониторинговой сети / Н. Н. Богомолова, М. Я. Брынть // Проектирование развития региональной сети железных дорог : сб. науч. трудов / под ред. В. С. Шверцфельда. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2015. – Вып. 3. – С. 59–64.

2. Дементьев В. Е. Исследование вертикальной рефракции на горизонтальных трассах в аридной

зоне / В. Е. Дементьев // Геодезия и картография. – 2014. – № 2. – С. 57–64.

3. Дрок М. К. К вопросу о поправке в превышения за совместное влияние кривизны Земли и вертикальной рефракции при геодезическом нивелировании на малые расстояния / М. К. Дрок // Науч. зап. Львов. политехн. ин-та. Сер. Геодезическая. – 1962. – Вып. 82, № 7. – С. 3–30.

4. Меркушева В. С. Методы оптимального программирования : учеб. пособие / В. С. Меркушева, Н. Н. Богомолова. – СПб. : ПГУПС, 2016. – 42 р.

5. Коугия В. А. Научное сопровождение геодезических работ при строительстве второй очереди Ленинградской АЭС / В. А. Коугия, М. Я. Брынть, А. А. Никитчин и др. // Новые технологии при недропользовании : сб. науч. трудов / отв. ред. М. Г. Муштафин. – СПб. : Горный ун-т, 2016. – С. 44–45.

6. Никонов А. В. Особенности применения современных геодезических приборов при наблюдении за осадками и деформациями зданий и сооружений объектов энергетики / А. В. Никонов // Вестн. СГГА. – 2013. – Вып. 4 (24). – С. 12–18.

7. Островский А. Л. Теория и практика флюктуационного метода определения вертикальной рефракции / А. Л. Островский, А. И. Мороз // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2000. – № 3 – С. 11–29.

8. Уставич Г. А. Разработка и совершенствование технологии инженерно-геодезического нивелирования тригонометрическим способом / Г. А. Уставич, М. Е. Рахымбердина, А. В. Никонов, С. А. Бабасов // Геодезия и картография. – 2013. – № 6. – С. 17–22.

9. Канашин Н. В. Современные методы геодезического мониторинга деформаций объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта / Н. В. Канашин, А. А. Никитчин, Н. Н. Богомолова // Путь XXI века : сб. науч. трудов III Международ. науч.-практич. конференции, посвященной 205-летию создания Института Корпуса инженеров путей сообщения, 20 февраля 2015 г., Санкт-Петербург / под ред. Л. С. Блажко. – СПб. : ПГУПС, 2015. – С. 181–185.

10. Вшивкова О. В. О комплексном подходе к решению рефракционной проблемы / О. В. Вшивкова // Изв. вузов. Сер. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2010. – № 3. – С. 3–9.

11. Изотов А. А. Исследование земной рефракции и методов геодезического нивелирования / А. А. Изотов, Л. П. Пеллинен // Труды ЦНИГАиК. – М. : ЦНИГАиК, 1955. – № 102. – 175 с.

12. Брынъ М. Я. Исследование деформаций земляного полотна при тяжеловесном движении поездов / М. Я. Брынъ, Н. Н. Богомолова, Д. А. Афонин, А. А. Никитчин, А. В. Романов // Путь и путевое хозяйство. – М. : Изд-во «Российские железные дороги», 2018. – № 12. – С. 19–21.

13. Мозжухин О. А. К анализу путей развития проблемы учета рефракции в нивелировании /

О. А. Мозжухин // Геодезия и картография. – 1994. – № 11. – С. 16–19.

14. Сухарев И. И. Применение ГИС для анализа изменения отметок земной поверхности центральной части Санкт-Петербурга с 1872 г. / И. И. Сухарев, А. А. Никитчин // Транспорт : проблемы, идеи, перспективы : сб. трудов LXXVI Всерос. науч.-технич. конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – СПб. : ПГУПС, 2016. – С. 345–349.

15. Карлсон А. А. О классификации точного нивелирования короткими лучами / А. А. Карлсон // Геодезия и картография. – 1993. – № 6. – С. 11–13.

Дата поступления: 25.11.2019

Решение о публикации: 29.11.2019

Контактная информация:

ЛОБАНОВА Юлия Васильевна – ст. преподаватель; lobanowa_@mail.ru

БРЫНЬ Михаил Ярославович – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой; 3046921@mail.ru

АФОНИН Дмитрий Андреевич – канд. техн. наук, доцент; afonin83@yandex.ru

Determining the refractive index at short distances

Yu. V. Lobanova, M. Ya. Bryn', D. A. Afonin

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

For citation: Lobanova Yu. V., Bryn' M. Ya., Afonin D. A. Determining the refractive index at short distances. *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2019, vol. 16, iss. 4, pp. 670–676. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2019-4-670-676

Summary

Objective: To derive formulas for determining the refractive index by geodetic measurements using different arguments. To present the results of experimental studies of the refractive index daily course, to calculate the refractive index values by the proposed formulas. **Methods:** The obtained materials have been analyzed. The formulas for calculating the refractive index using the measurements and plotting its daily course at different inclinations have been derived. **Results:** The daily course values of the refractive index have been determined, the values of the refractive index have been calculated by the proposed formulas, and the results have been analyzed. **Practical importance:** The revealed problem

of the dependence of the effect of vertical refraction with a change in the inclinations shows the need to study the effect of vertical refraction, which is associated with a change in the inclinations and distances. Based on the plotted dependences of the effect of vertical refraction on the results of trigonometric leveling, it is possible to choose the most favorable external conditions for geodetic measurements to increase their accuracy.

Keywords: Vertical refraction, refractive index, trigonometric leveling, electronic total station, environment.

References

1. Bogomolova N.N. & Bryn' M. Ya. Apriornaya otsenka tochnosti podzemnoy geodezicheskoy monitoringovoy seti [A priori estimation of the accuracy of the underground geodetic monitoring network]. *Proyektirovaniye razvitiya regional'noy seti zheleznykh dorog*. Sb. nauch. trudov [Designing the development of a regional railway network. Scientific proceedings]. Ed. by V.S. Shvertsfel'd. Khabarovsk, Far Eastern State Transport University Publ., 2015, iss. 3, pp. 59–64. (In Russian)
2. Dement'yev V.E. Issledovaniye vertikal'noy refraktsii na gorizontalnykh trassakh v aridnoy zone [Investigation of vertical refraction on horizontal routes in the turbulent zone]. *Geodesy and Cartography*, 2014, no. 2, pp. 57–64. (In Russian)
3. Drok M.K. K voprosu o popravke v prevysheniya za sovместnoye vliyaniye krivizny Zemli i vertikal'noy refraktsii pri geodezicheskom nivelirovani na малыye rasstoyaniya [About correction for excess for the combined influence of the Earth's curvature and vertical refraction during geodesic leveling over short distances]. *Scientific articles Lviv Polytechnic National University. Series Geodesy*, 1962, iss. 82, no. 7, pp. 3–30. (In Russian)
4. Merkusheva V.S. & Bogomolova N.N. *Metody optimal'nogo programmirovaniya [Optimal programming methods]*. Ucheb. posobiye [Training manual]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2016, 42 p. (In Russian)
5. Kougiya V.A., Bryn' M. Ya., Nikitchin A.A. et al. Nauchnoye soprovozhdeniye geodezicheskikh rabot pri stroitel'stve vtoroy ocheredi Leningradskoy AES [Scientific support of geodetic works during the construction of the Leningrad Phase II nuclear power plant]. *Novyye tekhnologii pri nedropol'zovanii*. Sb. nauch. trudov [New technologies for subsoil use. Scientific proceedings]. Chief editor: M.G. Mustafin. Saint Petersburg, Saint Petersburg Mining University Publ., 2016, pp. 44–45. (In Russian)
6. Nikonov A.V. Osobennosti primeneniya sovremennykh geodezicheskikh priborov pri nablyudenii za osadkami i deformatsiyami zdaniy i sooruzheniy ob'yektov energetiki [Features of the use of modern geodetic instruments for monitoring precipitation and deformation of buildings and structures of power generating facilities]. *Bulletin of the Siberian State Geodetic Academy*, 2013, iss. 4 (24), pp. 12–18. (In Russian)
7. Ostrovskiy A.L. & Moroz A.I. Teoriya i praktika fluktuatsionnogo metoda opredeleniya vertikal'noy refraktsii [Theory and practice of the fluctuation-based method for determining vertical refraction]. *Izvestiya vuzov [Proceedings of the Higher Educational Institutions], Geodesy and Aerophotosurveying*, 2000, no. 3, pp. 11–29. (In Russian)
8. Ustavich G.A., Rakhymberdina M.E., Nikonov A.V. & Babasov S.A. Razrabotka i sovershenstvovaniye tekhnologii inzhenerno-geodezicheskogo nivelirovaniya trigonometricheskim sposobom [Development and improvement of the engineering and geodetic leveling technology using the trigonometric method]. *Geodesy and Cartography*, 2013, no. 6, pp. 17–22. (In Russian)
9. Kanashin N.V., Nikitchin A.A. & Bogomolova N.N. Sovremennyye metody geodezicheskogo monitoringa deformatsiy ob'yektov infrastruktury zheleznodorozhnogo transporta [Modern methods of geodetic monitoring of deformations in railway infrastructure facilities]. *Put' XXI veka*. Sb. nauch. trudov III Mezhdunar. nauch.-praktich. konferentsii, posvyashchennoy 205-letiyu sozdaniya Instituta Korpusa inzhenerov putey soobshcheniya [The Way of the 21st Century. Scientific proceedings of the III International scientific and practical conference dedicated to the 205th anniversary of the Institute of the Corps of Railway Engineers]. February 20, 2015, St. Petersburg.

Ed. by L. S. Blazhko. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2015, pp. 181–185. (In Russian)

10. Vshivkova O. V. O kompleksnom podkhode k resheniyu refraktsionnoy problemy [About the integrated approach to the refraction problem]. *Izvestiya vuzov [Proceedings of the Higher Educational Institutions]. Series Geodesy and Aerophotosurveying*, 2010, no. 3, pp. 3–9. (In Russian)

11. Izotov A. A. & Pellinen L. P. Issledovaniye zemnoy refraktsii i metodov geodezicheskogo nivelirovaniya [Study of terrestrial refraction and methods of geodetic leveling]. *Proceedings of TsNIIGAiK [Central Research Institute of Geodesy, Aerial Surveying, and Cartography]*. Moscow, TsNIIGAiK [Central Research Institute of Geodesy, Aerial Surveying, and Cartography] Publ., 1955, no. 102, 175 p. (In Russian)

12. Bryn' M. Ya., Bogomolova N. N., Afonin D. A., Nikitchin A. A. & Romanov A. V. Issledovaniye deformatsiy zemlyanogo polotna pri tyazhelovesnom dvizhenii poyezdov [Study of roadbed deformations in heavy train traffic]. *Railway Track and Facilities*. Moscow, Russian Railways Publ., 2018, no. 12, pp. 19–21. (In Russian)

13. Mozhukhin O. A. K analizu putey razvitiya problemy ucheta refraktsii v nivelirovanii [About the analysis of the development paths of the problem of accounting for refraction in leveling]. *Geodesy and Cartography*, 1994, no. 11, pp. 16–19. (In Russian)

14. Sukharev I. I. & Nikitchin A. A. Primeneniye GIS dlya analiza izmeneniya otmetok zemnoy poverkhnosti tsentral'noy chasti Sankt-Peterburga s 1872 g. [The use of GIS for the analysis of changes in the earth's surface elevations in the central part of St. Petersburg since 1872]. *Transport: problemy, idei, perspektivy*. Sb. trudov LXXVI Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh [Transport: problems, ideas, prospects. Proceedings of the LXXVI All-Russian Scientific and Technical Conference of Students, Graduate Students and Young Scientists]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2016, pp. 345–349. (In Russian)

15. Karlson A. A. O klassifikatsii tochnogo nivelirovaniya korotkimi luchami [On the classification of precise leveling by short rays]. *Geodesy and Cartography*, 1993, no. 6, pp. 11–13. (In Russian)

Received: November 25, 2019

Accepted: November 29, 2019

Author's information:

Yulia V. LOBANOVA – Senior Lecturer;
lobanowa_@mail.ru

Mikhail Ya. BRYN' – D. Sci. in Engineering, Head of the Chair, Professor; 3046921@mail.ru

Dmitry A. AFONIN – PhD in Engineering, Associate Professor; afonin83@yandex.ru

УДК 004.8

Определение протокола информационного обмена прикладного уровня на основе классификации сетевых пакетов с применением нейронных сетей и алгоритмов нечеткой логики в системах анализа трафика

Р. Н. Ермаков¹, А. О. Кравцов², А. А. Привалов², Н. П. Заугольный¹,
Е. В. Скуднева²

¹ АО «НИИ «Масштаб», Российская Федерация, 194100, Санкт-Петербург, ул. Кантемировская, 5, лит. А

² Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Ермаков Р. Н., Кравцов А. О., Привалов А. А., Заугольный Н. П., Скуднева Е. В. Определение протокола информационного обмена прикладного уровня на основе классификации сетевых пакетов с применением нейронных сетей и алгоритмов нечеткой логики в системах анализа трафика // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2019. – Т. 16, вып. 4. – С. 677–690. DOI: 10.20295/1815-588X-2019-3-677-690

Аннотация

Цель: Рассмотреть вопросы, связанные с эффективным распознаванием сетевых протоколов в высокоскоростных системах анализа трафика, в максимальной степени обеспечивающим высокую верность классификации и обобщение на новых пакетных данных. Разработать двухступенчатую схему классификации сетевых протоколов с уменьшением размерности факторного пространства с применением многомодельного подхода, в котором задействованы методы машинного обучения и алгоритмы нечеткой логики. На основе двух предложенных способов показать обоснованность предлагаемого подхода. Сформулировать задачи, являющиеся развитием этого подхода. **Методы:** Используются в процедурах предобработки исходных данных сетевых пакетов теория нечетких множеств и алгоритмы нечеткой логики. Применяются следующие методы: классификация на основе искусственных нейронных сетей, а именно с применением логистической регрессии, а также задействованием алгоритма нечеткого вывода Мамдани. **Результаты:** Разработан алгоритм определения сетевых протоколов прикладного уровня, в максимальной степени обеспечивающий выполнение требований, предъявляемых к современным высокоскоростным системам анализа трафика. Приведены результаты практических экспериментов (тестирования), показывающие возможность эффективной классификации сетевых протоколов информационного обмена посредством описанного подхода. Предложены новые задачи, позволяющие реализовать построение надежного высокоскоростного классификатора сетевых протоколов информационного обмена в подсистемах углубленного анализа сетевого трафика в межсетевых экранах и системах обнаружения вторжений. **Практическая значимость:** Сформулированная и решенная задача обеспечивает возможность надежного распознавания сетевых приложений прикладного уровня, что, в свою очередь, способствует эффективному выявлению сетевых угроз.

Ключевые слова: Обнаружение сетевых протоколов, глубокий анализ пакетов, теория нечетких множеств, нечеткая логика, искусственные нейронные сети, анализ сетевого трафика.

Введение

В связи с продолжающейся в России программой импортозамещения, в том числе с повсеместным переходом государственных предприятий на использование отечественных процессоров, таких как «Эльбрус» [1], наблюдается тенденция отказов в государственном секторе от:

1) применения современных импортных Deep Packet Inspection (Глубокий анализ пакетов – DPI) – систем соответствующих библиотек от лидеров мировой индустрии (Cisco и др.);

2) известных открытых решений, таких как nDPI.

Это обусловлено тем, что нет полной уверенности в том, во-первых, что такое ресурсопотребляемое программное обеспечение (ПО) будет установлено без излишних сложностей, во-вторых, что будет должным образом выполняться весь заявленный функционал. В соответствии с вышеизложенным считаем, что собственная разработка тех или иных функциональных элементов DPI-системы, в том числе и глубокого анализатора сетевых пакетов, и доведение таких элементов до промышленного уровня являются значимым направлением развития межсетевого экранирования в аспекте нужд отечественных потребителей [2].

В данной работе описан начальный этап проектирования классификатора сетевых пакетов (КСП) приложений прикладного уровня с применением элементов искусственного интеллекта (нейронные сети [3, 4] и алгоритмы fuzzy logic [5–9]). Рассматриваются основные методы DPI и особое внимание уделяется поведенческому анализу сетевого трафика, как наиболее востребованному способу в условиях преобладания зашифрованного трафика.

Проектирование и разработка КСП

Они состоят из следующих основных этапов: 1) мониторинг и сбор пакетной статистической информации наиболее известных

и часто встречающихся протоколов сетевого трафика; 2) предобработка входного трафика; 3) выбор подходящей архитектуры нейронной сети, проведение тестовых проверок, выбранных нейросетевых решений, разработка и тестирование программной реализации КСП.

Наполнение созданного нейросетевого КСП классифицирующими моделями предусмотрено на стадии после разработки КСП.

Рассмотрим этапы построения нейросетевого КСП более подробно.

Этап 1. Мониторинг и сбор пакетной статистической информации наиболее известных и часто встречающихся протоколов сетевого трафика (TLSv1, TLSv1.2, SSHv2, HTTP, FTP и др.) с использованием ПО Wireshark [10]. Для выполнения данного этапа требовалось решить ряд подзадач:

а) выбор входных наиболее подходящих предикторов для построения модели классификации сетевых пакетов;

б) формирование первичных репрезентативных выборок (DUMP в Wireshark-формате) с пакетной информацией по указанным выше протоколам с использованием ПО Wireshark (объем трафика примерно 1 Гб);

в) автоматическое формирование вторичных выборок для анализа.

Этап 2. Выделение наиболее подходящих признаков для построения классификации сетевых пакетов является сложной задачей. С учетом данных, полученных из исследований [11, 12], был выделен следующий набор признаков:

– EtherType (тип стандарта протокола Ethernet);

– Source IP Address (IP-адрес отправителя);

– Destination IP Address (IP-адрес получателя);

– Multicast (принимает значение 1, если multicast, в противном случае – 0);

– IP Protocol (тип транспортного уровня);

– PacketLength (длина сетевого пакета в байтах);

– SourcePort (порт [TCP/UDP] отправителя);

– DestinationPort (порт [TCP/UDP] получателя);

– hex_length (количество байт в строковом контенте [часть payload] протокола верхнего уровня);

– payload_hex (передаваемая строка в контенте протокола верхнего уровня [часть payload]).

Также был включен дополнительный параметр – маркировка класса *payload type*, чтобы иметь возможность обучения моделей классификации сетевых пакетов по схеме с учителем.

Предобработка первичной пакетной информации состоит из трех последовательно выполняющихся блоков, которые представлены на рис. 1.

В первом блоке предобработки задействован такой функционал:

- проверка payload на предмет зашифрованной контентной информации (потребовало реализации отдельного специального технологического ПО на языке Python);

- обработка payload для лучшего визуального восприятия и возможности эвристического (поведенческого) анализа;

- разделение полученных классифицируемых сетевых пакетов на однородные группы (A, B, C, D) на основе значений некоторых входных признаков (тип стандарта протокола Ethernet, Multicast и тип транспортного уровня), а также формирование тестовых и тренировочных наборов.

Тестовый плоский файл в csv-формате с пакетной статистической информацией может иметь содержание, как показано в табл. 1.

Разделение классифицируемых сетевых пакетов по принадлежности к известным протоколам (DHCPv6, DNS, FTP, HTTP и др.) на 4 группы (A, B, C, D) производится на основе следующих логических правил:

1) IF (EtherType==IPv4) AND (Multicast==0) AND (IP_PROTO==TCP) THEN GROUP = A;

2) IF (EtherType==IPv4) AND (Multicast==0) AND (IP_PROTO==UDP) THEN GROUP = B;

3) IF (EtherType==IPv4) AND (Multicast==1) AND (IP_PROTO==UDP) THEN GROUP = C;

4) IF (EtherType==IPv6) AND (Multicast==1) AND (IP_PROTO==UDP) THEN GROUP = D.

Таким образом, произошло такое распределение классифицируемых протоколов первой фазы реализации по группам:

группа A (TLSv1, TLSv1.2, TCP, SSHv2, HTTP),

группа B (UDP, STUN, QUIC, NBNS, DNS, BROWSER),

группа C (SSDP, MDNS, LLMNR),

группа D (SSDP, MDNS, LLMNR, DHCP v6).

Попавшие в одну группу протоколы будем считать во многом схожими, а общую выборку в группе – однородной.

На современном этапе развития математического моделирования принято считать, что репрезентативные исходные наборы данных во многом обеспечивают конечный успех всего моделирования – получение адекватных моделей. Как правило, проводятся статистические проверки исходных данных, выявляются и исключаются из тренировочных выборок

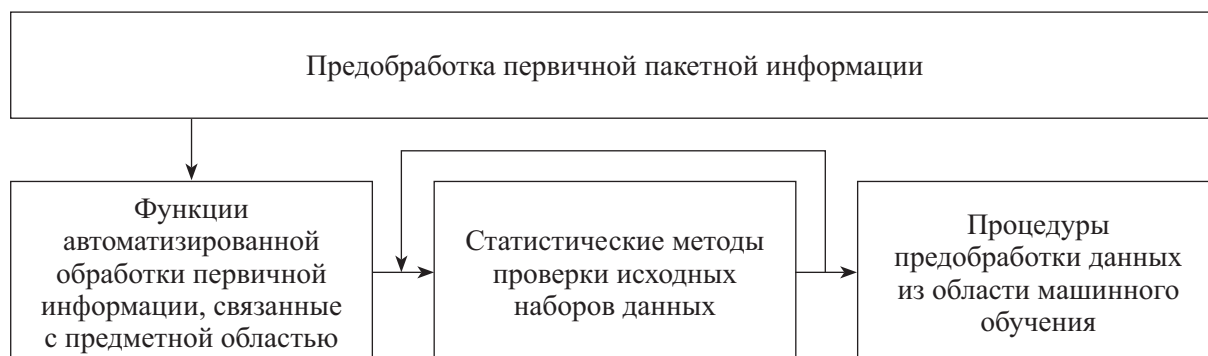


Рис. 1. Интеллектуальная автоматизированная предобработка первичных пакетных данных

ТАБЛИЦА 1. Представление варианта последовательности пакетов в сетевом трафике

№	Ether- net Type	Source IP Address	Destination IP Address	Mul- ticast	IP proto	Packet length	Src port	Dst port	Type proto	Hex length	Hex stream
0	0x800	172.16.0.1	172.16.0.10	0	6	73	53986	21	FTP	7	504153
1	0x800	172.16.0.1	172.16.0.10	0	6	72	53986	21	FTP	6	4c4953
2	0x800	172.16.0.1	172.16.0.10	0	6	90	53986	21	FTP	24	504f52
3	0x800	192.168.10.3	192.168.10.8	0	6	91	443	61983	TLSv1	37	150301
4	0x800	13.79.241.1	192.168.10.1	0	6	459	443	61867	TLSv1	405	170303
5	0x800	192.168.10.3	192.168.10.8	0	6	91	443	61986	TLSv1	37	150301
6	0x800	94.100.181.5	192.168.10.5	0	6	491	443	61662	TLSv1	437	170301
7	0x800	192.168.10.3	192.168.10.8	0	6	199	443	61993	TLSv1	145	170303
8	0x800	192.168.10.3	192.168.10.8	0	6	113	62544	443	TLSv1	59	170303
9	0x800	192.168.10.1	13.79.241.1	0	6	267	61988	443	TLSv1.2	213	d2a6ea
10	0x800	13.79.241.1	192.168.10.1	0	6	571	443	61990	TLSv1.2	517	6edb93
11	0x800	13.79.241.1	192.168.10.1	0	6	731	443	61988	TLSv1.2	677	170303
12	0x800	192.168.10.7	40.115.1.4	0	6	305	61991	443	TLSv1.2	251	170303

сильно зашумленные или избыточные исходные данные.

В методах машинного обучения, как правило, используются следующие процедуры предобработки данных:

1) обработка категориальных данных;

2) масштабирование признаков, которое включает в себя приведение разных признаков к одинаковой шкале (на практике существуют два общих подхода к приведению различных признаков к одинаковой шкале:

– нормализация,

– стандартизация (использовалась в данной работе);

3) отбор содержательных признаков.

Этап 3. Делается попытка перехода от простого логического КСП на правилах, главными недостатками которого являются трудоемкость и рутинность формирования правил, к современному высокотехнологичному нейросетевому классификатору, базирующемуся на методах машинного обучения и интеллектуальной обработке данных. В настоящее время идея совместного использования нейросетевого подхода классификации сетевых пакетов и DPI, NTA обсуждается в [13].

Следует отметить, что ряд входных признаков из числа выделенных и представленных выше являются категориальными. Учитывая значительное количество анализируемых данных, для оптимизации вычислений требуется использовать декомпозицию (свертку). Для этой цели специалисты машинного обучения часто применяют линейный дискриминантный анализ (LDA) [14]. В настоящей работе для такой цели используются модели на основе логических правил и алгоритмов нечеткой логики (fuzzy logic, применялся алгоритм нечеткого вывода Мамдани [15–19]), что позволяет пользоваться накопленными знаниями об объекте исследования, например RFC-описаниями сетевых протоколов.

Алгоритм нечеткого вывода Мамдани

Этот алгоритм был задействован в общей схеме классификации сетевых пакетов. Рассмотрим основные особенности данного алгоритма.

Целевой функцией будем считать выполнение такого отображения своих входов (вектор X) в выход Y , которое обеспечивало бы как можно более точную аппроксимацию реальной системы, например в смысле средней абсолютной погрешности. Указанное отображение предполагает существование некоторой геометрической поверхности, которую принято называть поверхностью отображения в пространстве, задаваемым декартовым произведением $X \times Y$ [20].

Алгоритм Мамдани представляет собой множество правил, где каждое правило задает в указанном пространстве некоторую нечеткую точку. На основе множества нечетких точек формируется нечеткий график, механизм интерполяции между точками, который зависит от используемого аппарата нечеткой логики.

Формально алгоритм Мамдани может быть определен следующим образом:

- формирование базы правил систем нечеткого вывода;
- фазификация входных переменных;
- агрегирование подусловий в нечетких правилах продукций, при этом для нахождения степени истинности каждого из правил нечетких продукций проводятся парные нечеткие логические операции, те правила, степень истинности которых отлична от нуля, считаются активными и используются для дальнейших расчетов;
- активизация подзаклучений в нечетких правилах продукций, которую также часто называют выводом на правилах, выполняется с использованием операторами нечеткой импликации, например, если вывод следует осуществлять в соответствии с правилом: ЕСЛИ $(x = A1)$ ТО $(y = B1)$; применяя импликацию Мамдани, можно определить активизированную функцию принадлежности импликации $A \rightarrow B$, которая представляет собой некоторое нечеткое отношение

$$R : \mu_R(x, y) = \text{MIN}(\mu_A(x), \mu_B(y)),$$

$$R : A \rightarrow B$$

на декартово произведение $X \times Y$;

• аккумуляция заключений (процесс определения общего вывода) нечетких правил продукций наиболее часто выполняется так, как показано на следующем примере, пусть дана нечеткая модель с базой правил вида

$$R1 : \text{ЕСЛИ}(x = A1) \text{ТО}(y = B1),$$

$$R2 : \text{ЕСЛИ}(x = A2) \text{ТО}(y = B2).$$

При этом требуется определить результирующую функцию принадлежности $\mu_{\text{res}}(y)$ вывода из всей базы правил, тогда все правила, входящие в базу, можно объединить в одно составное правило:

$$R : \text{ЕСЛИ}(x = A1) \text{ТО}(y = B1)$$

ИЛИ

$$\text{ЕСЛИ}(x = A2) \text{ТО}(y = B2).$$

Это означает, что правило R состоит из двух простых правил $R1$ и $R2$, объединенных логической связкой ИЛИ, которое может быть представлено и так:

$$R = R1 \cup R2.$$

Поскольку каждое правило представляет собой нечеткое отношение двух аргументов (импликацию), результирующее отношение R можно найти с использованием одной из s -норм, например оператора MAX , его функцию принадлежности $\mu_R(x, y)$ можно получить на основе функций принадлежности составляющих его отношений (импликаций) по формуле

$$\mu_R(x, y) = \text{MAX}(\mu_{R1}(x, y), \mu_{R2}(x, y));$$

• дефазификация входных переменных, которая, как правило, задействует популярный метод центра тяжести, однако мы применили также очень эффективный метод дефазификации, называемый методом высот

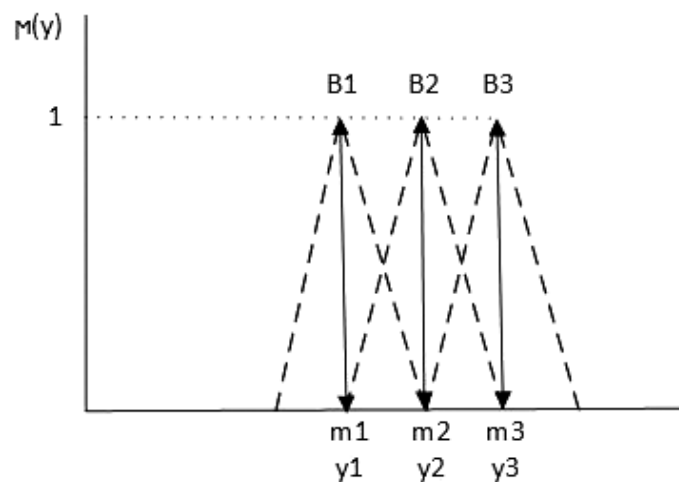


Рис. 2. Замена нечетких множеств B_j одноэлементными множествами (синглтонами)

(рис. 2), расчеты по которому производятся по уравнению

$$y^* = \frac{\sum_{j=1}^m y_j \mu_{\beta_j^*}(y)}{\sum_{j=1}^m \mu_{\beta_j^*}(y)},$$

где m – число правил.

Структурная схема алгоритма классификации сетевых пакетов

На принадлежность протоколам TLSv1 и TLSv1.2 она представлена на рис. 3, где входные показатели X1–X11 характеризуют:

X1 – номер порта [TCP/UDP] отправителя;

X2 – номер порта [TCP/UDP] получателя;

X3 – значение первого байта в строковом контенте (часть payload) протокола верхнего уровня;

X4 – степень принадлежности малому значению длины пакета (нечеткому множеству);

X5 – степень принадлежности большому значению длины пакета (нечеткому множеству);

X6 – степень принадлежности среднему значению длины пакета (нечеткому множеству);

X7 – степень принадлежности малому значению номера порта [TCP/UDP] отправителя (нечеткому множеству);

X8 – степень принадлежности большому значению номера порта [TCP/UDP] отправителя (нечеткому множеству);

X9 – степень принадлежности малому значению номера порта [TCP/UDP] получателя (нечеткому множеству);

X10 – степень принадлежности большому значению номера порта [TCP/UDP] получателя (нечеткому множеству);

X11 – принадлежность определенному в RFC интервалу целых чисел ContentType для протоколов TLSv1 и TLSv1.2.

Обозначим результирующий показатель:

Y1 – вероятность принадлежности к классу TLSv1;

Y2 – вероятность принадлежности к классу TLSv1.2;

Y3 – код внутреннего состояния наиболее вероятного класса.

В первой ступени расчетов, например в блоке проверки несоответствия используемых номеров портов требованиям RFC, на основе несложных логических правил проверяются номера портов для исследуемых протоколов TLSv1 и TLSv1.2, как правило, для передающей и принимающей сторон используется порт 443.

Таким образом, был построен двухступенчатый нейронечеткий алгоритм классифика-

Структурная схема алгоритма классификации сетевых пакетов прикладного уровня на принадлежность протоколам информационного обмена (TLSv1 И TLSv1.2)

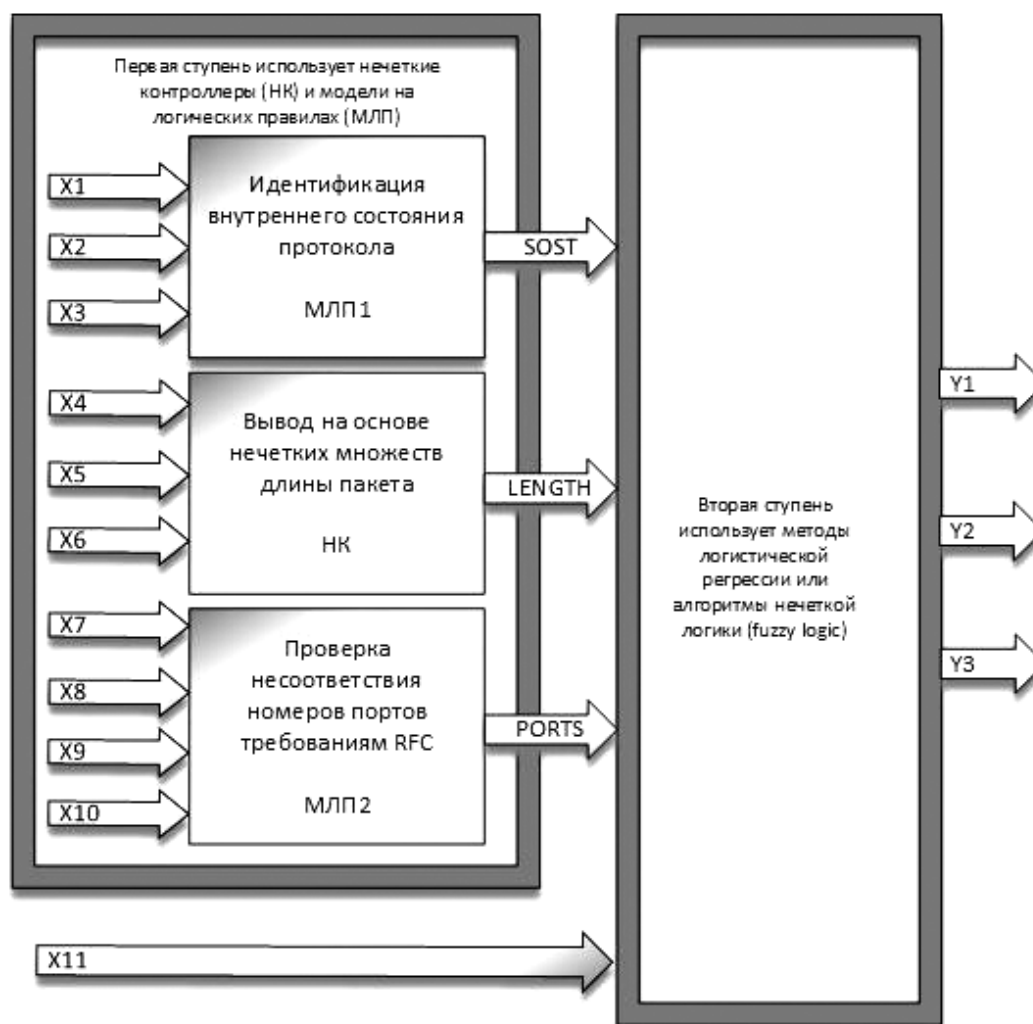


Рис. 3. Структурная схема двухступенчатого алгоритма классификации сетевых пакетов

ции сетевых пакетов прикладного уровня на предмет принадлежности протоколам TLSv1 и TLSv1.2. Не следует забывать, что наиболее эффективное применение логистической регрессии возможно при слабой зависимости (корреляции) между входными признаками. В табл. 2 представлены результаты расчетов коэффициентов парной корреляции входных признаков модели второй ступени. Для подобных расчетов, как правило, используются различные математические пакеты. В работе применялся IBM SPSS Statistics 19, с

подробным описанием можно ознакомиться в [21].

Таким образом, становится очевидно, что входные признаки для модели второй ступени являются независимыми и могут эффективно использоваться в модели на основе логистической регрессии [22].

Вместе с тем интерес представляет значимость входных синтетических признаков, поступающих на вторую ступень расчетов. Используя количество ошибок классификации, в которой применяется каждый из входных

ТАБЛИЦА 2. Результаты расчетов коэффициентов парной корреляции

Коэффициенты	PORTS	X11	LENGTH	SOST
PORTS	1	0,211	0,11	0,073
X11	0,211	1	0,397	0,176
LENGTH	0,11	0,397	1	0,188
SOST	0,073	0,176	0,188	1

признаков в отдельности, а также метод анализа иерархий [23, 24] и наши экспертные знания о сетевых протоколах прикладного уровня, были определены весовые коэффициенты для признаков модели второй степени по степени значимости для протоколов TLSv1 и TLSv1.2:

$$W_{\text{PORTS}} = 0,1267; W_{\text{X11}} = 0,566;$$

$$W_{\text{LENGTH}} = 0,0398; W_{\text{SOST}} = 0,2674.$$

Таким образом, наиболее значимым признаком модели второй степени расчетов является принадлежность определенному в RFC интервалу целых чисел ContentType для исследуемых протоколов TLSv1 и TLSv1.2. На втором месте определяемое в МЛП1 внутреннее состояние протокола. Следует также отметить высокую полезность итогового внутрен-

него состояния исследуемых протоколов – Y3. Данный результирующий показатель очень полезен для дальнейшей оптимизации созданного КСП прикладного уровня, о чем свидетельствуют результаты проведенных тестов (табл. 3).

Вторая степень алгоритма производит расчеты с использованием искусственных нейронных сетей (ИНС).

Тестирование КСП прикладного уровня

Оно проводилось с помощью специально разработанного на языке программирования C/C++ программного модуля, который может использоваться в межсетевых экранах, DPI-системах, COB и др., для операционных си-

ТАБЛИЦА 3. Результаты тестирования программного модуля

Тестовая выборка	Не TLSv1 и TLSv1.2		TLSv1		TLSv1.2		Общий результат тестирования	
	Логист. регрессия	НМ	Логист. регрессия	НМ	Логист. регрессия	НМ	Логист. регрессия	НМ
Количество пакетов	881	881	104	104	269	269	1254	1254
Ложное срабатыв.	5	5	75	17	10	18	90	40
Верность, %	99	99	28	84	96	93	93	97

Примечание. Синим обозначен требуемый результат, зеленым – средний, красным – неудовлетворительный.

стем LINUX и операционных систем линейки Windows.

Результаты тестирования представлены в табл. 3.

В табл. 4 приведены характеристики применяемой при проведенном тестировании аппаратной платформы, в табл. 5 – результаты вычислительной производительности вариантов моделей на второй ступени расчетов.

Основные преимущества созданного решения:

- высокая вычислительная производительность классификации с использованием ИНС и алгоритмов нечеткой логики;

- возможность применения параллельных вычислений;

- высокая верность классификации;

- совместимость с доверенными аппаратными платформами, такими, как Эльбрус, и переносимость на различные операционные системы.

На рис. 4 представлена компонентная структура в DPI-системе потенциально возможного межсетевого экрана.

Далее планируется совершенствовать построенный КСП путем его наполнения классифицирующими моделями. Еще одной важной количественной характеристикой КСП является-

ТАБЛИЦА 4. Характеристики используемой аппаратной платформы

Ресурсы	Аппаратная платформа
Центральный процессор	Intel Core i5-6400 2,7 ГГц
Оперативная память	8 Гб
Установленное ПО	ОС MS Windows 10 Pro 64 бит

ТАБЛИЦА 5. Результаты вычислительной производительности

Метод	Логистическая регрессия	С использованием нечетких множеств
Среднее время классификации пакета, мс	0,657097	0,658692

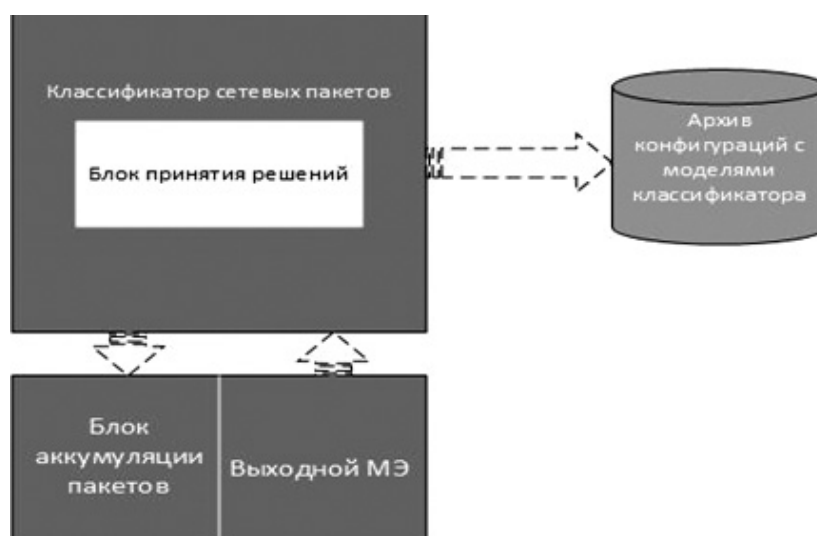


Рис. 4. Компонентная структура в DPI-системе потенциально возможного межсетевого экрана

ся число распознаваемых протоколов и сетевых приложений. Наиболее известные системы DPI способны детектировать до 6000 протоколов и приложений. OpenSource-решения в среднем обеспечивают классификацию до 200 протоколов и приложений.

Заключение

Представленная в работе методика предобработки первичных пакетных данных и построения классифицирующих нейросетевых моделей иллюстрирует развитие систем анализа трафика, в частности, в отечественном межсетевом экранировании в условиях действия программ импортозамещения.

Применение нового подхода к анализу сетевого трафика, в основе которого лежит использование алгоритмов машинного обучения, алгоритмов нечеткой логики и интеллектуальной обработки данных, позволяет классифицировать сетевые пакеты приложений прикладного уровня [25].

Существует перспектива появления нейросетевого КСП промышленного уровня с показателями, не уступающими известным DPI-решениям, но работающего на совершенно другом уровне.

Парадигма нейросетевого КСП и архитектура платформы «Эльбрус» основаны на параллельных вычислениях, что позволит получить наиболее высокую производительность на доверенной аппаратной платформе. Создаваемый КСП обеспечит возможности оперативного реагирования на различные сетевые угрозы (COB, IPS/IDS, SAEM).

Библиографический список

1. Бычков И. Н. Доверенная программно-аппаратная платформа «Эльбрус». Отечественное решение для АСУ ТП КВО / И. Н. Бычков, В. И. Глухов, К. А. Трушкин // ИСУП. – 2002. – № 1 (49). – 824 с.

2. Евглевская Н. В. Методика комплексной оценки информационной безопасности инфокоммуни-

кационных сетей единого диспетчерского центра управления перевозками Октябрьской железной дороги ОАО «РЖД» / Н. В. Евглевская // Междунар. науч.-технич. и науч.-метод. конференция «Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании»: сб. науч. статей: в 2 т. / под ред. С. В. Бачевского, сост. А. Г. Владыко, Е. А. Аникевич, Л. М. Минаков. – СПб.: Изд-во С.-Петерб. гос. ун-та телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, 2015. – С. 1193–1197.

3. Rumelhart D. E. Learning representations by backpropagating error / D. E. Rumelhart, G. E. Hinton, R. J. Williams // LETTERS TO NATURE. – 1986. – Vol. 323. – P. 533–536.

4. Bishop C. M. Neural networks for pattern recognition / C. M. Bishop. – Birmingham, UK: Department of Computer Science and Applied Mathematics Aston University, 1995. – 479 p.

5. Zadeh L. A. Fuzzy sets / L. A. Zadeh // Information and Control. – 1965. – Vol. 8 (3). – P. 338–353.

6. Zadeh L. A. Fuzzy algorithms / L. A. Zadeh // Information and Control. – 1965. – Vol. 12 (2). – P. 94–102.

7. Jager R. Fuzzy logic in control: Thesis Technische Universiteit Delft / R. Jager. – Delft: Technische Universiteit, 1995. – 313 p.

8. Wang Y. On fuzzy multiattribute decision-making models and methods with incomplete preference information / Y. Wang // Fuzzy Sets and System. – 2005. – Vol. 151. – P. 285–301.

9. Ермаков Р. Н. Прогнозирование лояльности клиента к услуге широкополосного доступа в интернет с использованием алгоритмов нечеткой логики / Р. Н. Ермаков // Экономика и качество систем связи. – 2019. – № 2 (12). – С. 31–49.

10. Sanders C. C. Practical packet analysis. – 2nd ed. / C. C. Sanders. – San Francisco, CA 94103: No Starch Press Inc., 2011.

11. Елагин В. С. Эффективность DPI-системы для идентификации трафика и обеспечения качества обслуживания ОТТ-сервисов / В. С. Елагин, А. А. Зарубин, А. В. Онуфриенко // Научно-технические исследования в космических исследованиях Земли. – 2018. – Т. 10, № 3. – С. 40–53.

12. Бабенко Г. В. Анализ современных угроз информации, возникающих при сетевом взаимодействии / Г. В. Бабенко // Вестн. АГТУ. Сер. Управление,

вычислительная техника и информатика. – 2010. – № 2. – URL : <http://www.cosmos.ru/earth/trudi/1-28.pdf> (дата обращения : 15.11.2019 г.).

13. Lim Y. Internet traffic classification demystified : On the sources of the discriminative power / Y. Lim, H. Kim, J. Jeong, C. Kim, T. Kwon, Y. Choi. – 2010. – URL : http://conferences.sigcomm.org/co-next/2010/CoNEXT_papers/09-Lim.pdf (дата обращения : 15.11.2019 г.).

14. Евглевская Н. В. Марковская модель конфликта автоматизированных систем обработки информации и управления с системой деструктивных воздействий нарушителя / Н. В. Евглевская, А. А. Привалов, Е. В. Скуднева // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. – СПб. : ПГУПС, 2015. – Т. 15, вып. 1. – С. 78–84.

15. Izenman A. J. Linear discriminant analysis. Modern Multivariate Statistical Techniques / A. J. Izenman. – New York : Springer Textsin Statistics, 2013. – 733 p.

16. Mamdani E. H. An experiment in linguistic synthesis thesis with a fuzzy logic controller / E. H. Mamdani, S. Assilian // International Journal of Man-Machine Studies. – 1975. – Vol. 7, N 1. – P. 1–13.

17. Mamdani E. H. Advances in the linguistic synthesis of fuzzy controllers / E. H. Mamdani // International Journal of Man-Machine Studies. – 1976. – Vol. 8. – P. 669–678.

18. Ageev S. A. Method of operational monitoring of technical condition of multiservice communication network on the basis of hierarchical fuzzy inference / S. A. Ageev, A. A. Gladkikh, D. V. Mishin, A. A. Privolov // Fuzzy technologies in the industry. Proceedings of the II International Scientific and Practical Conference. – 2018. – P. 211–221.

19. Mamdani E. H. Applications of fuzzy logic to approximate reasoning using linguistic synthesis / E. H. Mamdani // IEEE Transactions on Computers. – 1977. – Vol. 26, N 12. – P. 1182–1191.

20. Пегат А. Нечеткое моделирование и управление / А. Пегат ; пер. с англ. А. Г. Подвесовского, Ю. И. Тюменцова. – М. : БИНОМ. Лаборатория зна-

ний, 2009. – 698 с. – (Адаптивные и интеллектуальные системы).

21. Наследов А. SPSS 19 : профессиональный статистический анализ данных / А. Наследов. – СПб. : Питер, 2011. – 400 с.

22. Kornienko A. A. Methodology of conflict detection and resolution in cyber attacks protection software on railway transport / A. A. Kornienko, M. A. Polyanichko // Интеллектуальные технологии на транспорте. – 2015. – № 1. – С. 18–21.

23. Саати Т. Л. Взаимодействие в иерархических системах / Т. Л. Саати // Техническая кибернетика. – 1979. – № 1. – С. 68–84.

24. Кравцов А. О. Методика выбора приоритетных элементов информационно-телекоммуникационной системы, функционирующей в условиях применения организованным нарушителем таргетированных атак / А. О. Кравцов, А. А. Привалов // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. – СПб. : ПГУПС, 2017. – Т. 14, вып. 1. – С. 137–148.

25. Канаев А. К. Имитационная модель процесса контроля состояния и управления доменами сети CarrierEthernet / А. К. Канаев, Э. В. Логин // Интернет вещей и 5g (in thiten 2017) : 3-я Междунар. науч.-технич. конференция студентов, аспирантов и молодых ученых / под ред. А. Е. Кучерявого. – СПб. : Гос. ун-т телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, 2017. – С. 21–27.

Дата поступления: 08.10.2019

Решение о публикации: 14.10.2019

Контактная информация:

ЕРМАКОВ Роман Николаевич – канд. биол. наук, ведущий инженер; romul151925@mail.ru
КРАВЦОВ Антон Олегович – аспирант; kravcovanton@mail.ru

ПРИВАЛОВ Андрей Андреевич – д-р воен. наук, профессор; arivalov@inbox.ru

ЗАУГОЛЬНЫЙ Николай Петрович – менеджер; nkzgn@gmail.com

СКУДНЕВА Екатерина Валентиновна – ст. преподаватель; skykatty@gmail.com

Attribution of application-level data communications protocol on the basis of classification of network packets using neural networks and fuzzy-logic algorithms in traffic analysis systems

R. N. Ermakov¹, A. O. Kravtsov², A. A. Privalov², N. P. Zaugol'nyi¹, E. V. Skudneva²

¹ JSC Research Institute "Masshtab", 5, lit. A, Kantemirovskaya ul., Saint Petersburg, 194100, Russian Federation

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

For citation: Ermakov R. N., Kravtsov A. O., Privalov A. A., Zaugol'nyi N. P., Skudneva E. V. Attribution of application-level data communications protocol on the basis of classification of network packets using neural networks and fuzzy-logic algorithms in traffic analysis systems. *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2019, vol. 16, iss. 4, pp. 677–690. (In Russian)
DOI: 10.20295/1815-588X-2019-3-677-690

Summary

Objective: Consider issues related to efficient recognizing of network protocols in high-speed traffic analysis systems ensuring highest possible classification correctness and generalization for new data packets. Develop two-level circuit for attribution of network protocols with reduction of dimensionality of factor space with application of multi-model approach deploying machine learning and fuzzy-logic algorithms. Demonstrate feasibility of the proposed approach on the basis of two proposed methods. Formulate problems constituting its development. **Methods:** Fuzzy sets theory and fuzzy logic algorithms are used in pre-processing network packets' input data. Classification on the basis of artificial neural networks is applied, specifically using logistic regression and involving Mamdani fuzzy-inference algorithm. **Results:** An algorithm for attribution of application-level network protocols was developed, ensuring highest possible degree of fulfillment of requirements for modern high-speed traffic analysis systems. Results of practical experiments (testing) are outlined, indicating possibility of efficient attribution of network data communications protocols by the approach described. New problems are proposed allowing implementation of designing a reliable high-speed data exchange network protocol classifier in network traffic deep analysis subsystems in network firewalls and intruder detection systems. **Practical importance:** Formulated and solved problem ensures reliable detection of application-level network application which in its turn contributes to efficient identification of network threats.

Keywords: Network protocol detection, deep analysis of packets, fuzzy sets theory, fuzzy logic, artificial neural networks, network traffic analysis.

References

1. Bychkov I. N., Glukhov V. I. & Trushkin K. A. Doverennaiia programmno-apparatnaia platforma "El'brus". Otechestvennoe reshenie dlia ASU TP KVO [Elbrus proxy hardware and software platform. Russian solution for industrial control system for boiler associated equipment]. *ISUP [Informatization and Control Systems]*, 2002, no. 1 (49), 824 p. (In Russian)

2. Evglevskaia N. V. Metodika kompleksnoi otsenki informatsionnoi bezopasnosti infokommunikatsionnykh setei edinogo dispetcherskogo tsentra upravleniia perezovkami Oktiabr'skoi zheleznoi dorogi OAO "RZhD" [Method for total evaluation of information security of information and communication networks of the centralized traffic control centre of the Oktyabrskaya railway of the Russian Railways JSC]. *Mezhdunarodnaia nauchno-tekhnicheskaya i nauchno-me-*

- tochieskaia konferentsiia "Aktual'nye problemy infotelekkommunikatsii v nauke i obrazovanii"*. Sbornik nauchnykh statei [International research, technology and methodological conference "Current problems of infotelecommunications in science and education". Coll. papers]. 2 vols. Ed. by S. V. Bachevskii. Saint Petersburg, Sankt-Peterburgskii gosudarstvennyi universitet telekkommunikatsii im. prof. M. A. Bonch-Bruevicha [Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications] Publ., 2015, pp. 1193–1197. (In Russian)
3. Rumelhart D. E., Hinton G. E. & Williams R. J. Learning representations by backpropagating error. *LETTERS TO NATURE*, 1986, vol. 323, pp. 533–536.
4. Bishop C. M. *Neural networks for pattern recognition*. Birmingham, UK, Department of Computer Science and Applied Mathematics Aston University Publ., 1995, 479 p.
5. Zadeh L. A. Fuzzy sets. *Information and Control*, 1965, vol. 8 (3), pp. 338–353.
6. Zadeh L. A. Fuzzy algorithms. *Information and Control*, 1965, vol. 12 (2), pp. 94–102.
7. Jager R. *Fuzzy logic in control*. Thesis, Technische Universitet Delft. Delft, Technische Universitet Publ., 1995, 313 p.
8. Wang Y. On fuzzy multiattribute decision-making models and methods with incomplete preference information. *Fuzzy Sets and System*, 2005, vol. 151, pp. 285–301.
9. Ermakov R. N. Prognozirovanie loial'nosti klienta k usluge shirokopolosnogo dostupa v internet s ispol'zovaniem algoritmov nechetkoi logiki [Forecasting client loyalty for broadband internet access service using fuzzy logic algorithms]. *Ekonomika i kachestvo sistem svyazi [Economy and quality of communication systems]*, 2019, no. 2 (12), pp. 31–49. (In Russian)
10. Sanders C. C. *Practical packet analysis*. 2nd ed. San Francisco, CA 94103, N Starch Press Inc., 2011.
11. Elagin V. S., Zarubin A. A. & Onufrienko A. V. Effektivnost' DPI-sistemy dlia identifikatsii trafika i obespecheniia kachestva obsluzhivaniia OTT-servisov [Efficiency of DPI-system for identification of traffic and ensuring service quality of customer care]. *Naukoemkie tekhnologii v kosmicheskikh issledovaniiaakh Zemli [High-end technologies in space research of the Earth]*, 2018, vol. 10, no. 3, pp. 40–53. (In Russian)
12. Babenko G. V. Analiz sovremennykh ugroz informatsii, vznikaiushchikh pri setevom vzaimodeistvii [Analysis of modern information threats occurring in networking]. *Vestnik AGTU. Seriya Upravlenie, vychislitel'naia tekhnika i informatika [Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series Management, Computer Science and Informatics]*, 2010, no. 2. Available at: <http://www.cosmos.ru/earth/trudi/1-28.pdf>. (accessed: 15.11.2019). (In Russian)
13. Lim Y., Kim H., Jeong J., Kim C., Kwon T. & Choi Y. *Internet traffic classification demystified: On the sources of the discriminative power*. Available at: http://conferences.sigcomm.org/co-next/2010/CoNEXT_papers/09-Lim.pdf (accessed: 15.11.2019).
14. Evglevskaia N. V., Privalov A. A. & Skudneva E. V. Markovskaia model' konflikta avtomatizirovannykh sistem obrabotki informatsii i upravleniia s sistemoi destruktivnykh vozdeistvii narushitelia [Markovian model of conflict of automated data processing and control systems with a violator's ravages system]. *Izvestiia Peterburgskogo universiteta putei soobshcheniia [Proceedings of Petersburg Transport University]*. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2015, vol. 15, iss. 1, pp. 78–84. (In Russian)
15. Izenman A. J. *Linear discriminant analysis. Modern multivariate statistical techniques*. New York, Springer Texts in Statistics Publ., 2013, 733 p.
16. Mamdani E. H. & Assilian S. An experiment in linguistic synthesis thesis with a fuzzy logic controller. *International Journal of Man-Machine Studies*, 1975, vol. 7, no. 1, pp. 1–13.
17. Mamdani E. H. Advances in the linguistic synthesis of fuzzy controllers. *International Journal of Man-Machine Studies*, 1976, vol. 8, pp. 669–678.
18. Ageev S. A., Gladkikh A. A., Mishin D. V. & Privalov A. A. Method of operational monitoring of technical condition of multiservice communication network on the basis of hierarchical fuzzy inference/fuzzy technologies in the industry. *Proceedings of the II International Scientific and Practical Conference*, 2018, pp. 211–221.
19. Mamdani E. H. Applications of fuzzy logic to approximate reasoning using linguistic synthesis. *IEEE Transactions on Computers*, 1997, vol. 26, no. 12, pp. 1182–1191.

20. Piegat A. *Nechetkoe modelirovanie i upravlenie* [Fuzzy modeling and control]. Per. s angl. A. G. Podvesovskii and Iu. V. Tiumentsev. Moscow, BINOM – Laboratoriia znaniia Publ., 2009, 698 p. (In Russian)
21. Nasledov A. *SPSS 19: professional'nyi statisticheskii analiz dannykh* [SPSS 19: professional statistical data analysis]. Saint Petersburg, Piter Publ., 2011, 400 p. (In Russian)
22. Kornienko A. A. & Polyanichko M. A. Methodology of conflict detection and resolution in cyber attacks protection software on railway transport. *Intel'ktual'nye tekhnologii na transporte* [Intelligent systems in transport], 2015, no. 1, pp. 18–21.
23. Saati T. L. Vzaimodeistvie v ierarkhicheskikh sistemakh [Interoperability in hierarchical systems]. *Tekhnicheskaja kibernetika* [Technical cybernetics], 1979, no.1, pp. 68–84. (In Russian)
24. Kravtsov A. O. & Privalov A. A. Metodika vybora prioritnykh elementov informatsionno-telekommunikatsionnoi sistemy, funktsioniruiushchei v usloviakh primeniia organizovannym narushitelem targetirovannykh atak [Method for selecting priority elements of information and telecommunications system functioning under conditions of applying targeted attacks by an organized violator]. *Izvestiia Peterburgskogo universiteta putei soobshcheniia* [Proceedings of Petersburg Transport University]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2017, vol. 14, iss. 1, pp. 137–148. (In Russian)
25. Kanaev A. K. & Login E. V. Imitatsionnaia model' protsessa kontroliia sostoiianiia upravleniia domeni seti CarrierEthernet. Internet veshchei i 5g (in thiten 2017) [Simulation model of the process of control monitoring and domain management in CarrierEthernet network. Internet of things and 5G (in thiten 2017)]. *3-ia Mezhdunarodnaia nauchno-tekhnicheskaja konferentsiia studentov, aspirantov i molodykh uchenykh* [3rd International research and engineering conference of students, PhD students and young researchers]. Ed. by A. E. Kucheriavii. Saint Petersburg, Sankt-Peterburgskii gosudarstvennyi universitet telekommunikatsii im. prof. M. A. Bonch-Bruevicha [Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications] Publ., 2017, pp. 21–27. (In Russian)

Received: October 08, 2019

Accepted: October 14, 2019

Author's information:

Roman N. ERMAKOV – PhD in Biology, Lead Engineer; romul151925@mail.ru

Anton O. KRAVTSOV – Postgraduate Student; kravcovanton@mail.ru

Andrey A. PRIVALOV – D. Sci. in Military, Professor; aprivalov@inbox.ru

Nikolai P. ZAUGOL'NYI – Manager; nkzgl@gmail.com

Ekaterina V. SKUDNEVA – Senior Lecturer; skykatty@gmail.com

СОДЕРЖАНИЕ ЖУРНАЛА «ИЗВЕСТИЯ ПГУПС» ЗА 2019 ГОД

ПРОБЛЕМАТИКА ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

- Нестерова Н. С., Анисимов Вл. А.* Формирование множества возможных стратегий этапного изменения облика и мощности объектов мультимодальной транспортной сети 16, 3 329–338
- Никифорова Г. И.* Взаимодействие железнодорожного и морского транспорта в логистической цепи доставки внешнеторгового грузопотока 16, 3 339–346
- Плеханов П. А.* Риск-ориентированный подход к обеспечению транспортной безопасности как части комплексной безопасности железнодорожного транспорта 16, 4 539–551
- Покровская О. Д., Титова Т. С.* Инструментарий логистического нормирования для проведения аудита транспортно-складских систем 16, 2 175–190
- Покровская О. Д., Титова Т. С.* Категория «идеальный терминал» как способ комплексной оценки логистического объекта 16, 3 347–360
- Числов О. Н., Богачев В. А., Егорова И. Н., Богачев Т. В.* Трансчерноморская высокоскоростная пассажирская магистраль как инновационный проект развития транспортной системы юга России 16, 1 7–17

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ – ТРАНСПОРТУ

- Абдуллаев Б. А.* Влияние солнечной радиации на теплопритоки рефрижераторных вагонов и контейнеров 16, 1 18–24
- Абдуллаев Ж. Я.* Особенности определения пропускной способности двухпутных участков 16, 3 361–371
- Агунов А. В., Каверин В. В., Макарова Е. И., Ролле И. А.* Разработка универсального комплекса для исследования работы подвески с активными элементами двухосной тележки подвижного состава 16, 1 25–30
- Адылходжаев А. И., Шаумаров С. С., Мухаммадиев Н. Р.* Аналитическое и экспериментальное исследование структурной организации теплоизоляционно-конструктивных строительных материалов для железнодорожных зданий и сооружений 16, 2 220–229

<i>Антонов А. Ю.</i> О внесении изменений в расчетные формулы методики оценки воздействия подвижного состава на путь по условию обеспечения его надежности	16, 1	31–36
<i>Афанасьев Е. В., Битюцкий Н. А., Цыганская Л. В., Исполова Е. А., Филиппова И. О.</i> Обновление парка вагонов-хопперов для перевозки технического углерода	16, 1	37–50
<i>Баева И. А.</i> Методика расчета системы тягового электроснабжения постоянного тока 3,0 кВ при введении устройств регулирования напряжения	16, 1	51–58
<i>Белозерова И. Г.</i> Моделирование планируемой погрузки по различным сценариям	16, 3	372–379
<i>Болотин В. А., Кравченко М., Янковская Н. Г.</i> К вопросу применения съемных кузовов вагонов для доставки сезонных насыпных грузов	16, 4	552–561
<i>Бурков А. Т., Жемчугов В. Г.</i> Показатели эксплуатационной надежности системы тягового электроснабжения постоянного тока с продольной питающей линией высокого напряжения	16, 3	380–390
<i>Ватулин Я. С., Потахов Д. А.</i> Моделирование взаимодействия элементов опорного контура железнодорожного грузоподъемного крана с грунтовой опорной поверхностью	16, 1	59–67
<i>Викулов И. П., Назирхонов Т. М.</i> Сравнительный анализ технических характеристик электровозов серий «O'Z-ELR» и «O'zbekiston»	16, 1	68–76
<i>Вилков В. Б., Дергачев А. И., Черных А. К., Кравцов А. О.</i> Об одном подходе к созданию информационно-безопасных систем связи	16, 2	292–300
<i>Воробьев А. А., Бунькова Т. Г., Соболев А. А.</i> К вопросу об оптимальном соотношении твердости пары «колесо–рельс»	16, 1	77–86
<i>Воробьев А. А., Жуков Д. А., Лукьяненко К. Л., Кулик В. И., Нилов А. С.</i> Применение композиционных материалов в тормозных системах высокоэнергетичных составов железнодорожного транспорта	16, 3	391–400
<i>Гасюк А. С., Оганьян Э. С.</i> Расчетно-экспериментальные методы оценки ресурса базовых частей подвижного состава	16, 2	285–291
<i>Грошев В. А.</i> К вопросу моделирования технологических процессов на станциях	16, 1	87–94

<i>Дворкин П. В., Курилкин Д. Н.</i> Анализ теплового состояния тяговых электродвигателей по данным микропроцессорной системы управления тепловоза	16, 3	401–409
<i>Иванов В. Г., Черников Н. А., Твардовская Н. В.</i> Интенсивность расчетных дождей и анализ соотношения объемов дождевой и производственной сточной воды для железнодорожных станций Сибирского и Дальневосточного регионов России	16, 1	95–104
<i>Ким К. К., Иванов С. Н., Хисматулин М. И.</i> Преимущества применения устройств транспортирования и нагрева жидких рабочих сред в различных отраслях промышленности	16, 4	573–583
<i>Ким К. К., Крон И. Р.</i> Исследование устойчивости капсулы пассажирского трубопроводного транспорта в установившемся режиме при возмущениях продольной координаты	16, 4	584–591
<i>Ким К. К., Крон И. Р., Ватулин Я. С., Ватулина Е. Я.</i> Разработка метода по уменьшению лобового аэродинамического сопротивления капсулы трубопроводного транспорта	16, 2	263–267
<i>Киселев А. А., Блажко Л. С., Гапоненко А. С., Романов А. В.</i> Влияние геометрических параметров железнодорожного пути на величину эквивалентной коничности колесной пары	16, 2	202–211
<i>Киселев И. Г., Кузнецников Н. С., Ковалева П. А.</i> Применение тепловых аккумуляторов на объектах стационарной теплоэнергетики железнодорожного транспорта	16, 3	410–418
<i>Колос А. Ф., Чистяков П. А., Шаврин Е. Г.</i> Изменение прочностных свойств щебня в процессе абразивного износа	16, 4	642–649
<i>Комовкина Н. С., Половинко Л. А., Попадюк А. Ю.</i> Обоснование строительства дополнительных путей на станциях для отстоя на них избытка порожних вагонов или отставленных от движения составов поездов	16, 3	419–426
<i>Кротов С. В., Кононов Д. П., Соколов А. А.</i> Влияние трения на контактно-усталостную долговечность образцов из рельсовой и колесной сталей	16, 2	212–219
<i>Кувондигов Ж. О., Цаплин А. Е.</i> Методика анализа и математическая модель функции готовности локомотивного парка с учетом холодного резерва	16, 4	631–641
<i>Мартыненко Л. В., Соснов Н. Ю.</i> Лазерный профилометр поверхности катания как универсальное средство измерения профиля колесной пары при тревожных показаниях комплекса технических измерений	16, 3	427–438

<i>Назаров И. В., Артамонов Е. И., Ковязин А. Л.</i> Разработка метода ресурсных испытаний тормозной системы тележки	16, 2	230–240
<i>Орлова А. М., Рудакова Е. А., Шевченко Д. В., Гусев А. В., Попович С. И., Савушкин Р. А.</i> Анализ методик расчета горизонтальной жесткости пружин рессорного подвешивания грузовых вагонов	16, 2	191–201
<i>Савоськин А. Н., Ромен Ю. С., Васильев А. П.</i> Характеристики упруго-фрикционных комплектов рессорного подвешивания	16, 2	275–284
<i>Самошкин С. Л., Макаров А. Н., Хоменко А. А., Семенов П. Ю.</i> Экспериментальное исследование прочности кронштейнов крепления генератора к раме вагона	16, 1	105–117
<i>Сатторов С. Б., Котенко А. Г., Белозеров В. Л.</i> Вопросы развития железнодорожной линии Ахангаран–Тукимачи–Сырдарьинская	16, 3	439–448
<i>Сергеева Т. Г.</i> Совершенствование управления парком частных вагонов	16, 3	449–454
<i>Сковородников Е. И., Анисимов А. С., Минаков В. А., Чернышков И. В.</i> Аналитическая оценка экологической безопасности тепловозных дизелей	16, 1	118–129
<i>Смирнов В. И., Видюшенков С. А., Кухарева А. С.</i> Динамические особенности скатывания вагонов с сортировочной горки	16, 2	241–250
<i>Сугоровский А. В.</i> Развитие железнодорожной инфраструктуры станций в связи с реализацией инвестиционного проекта создания Северного широтного хода	16, 4	602–610
<i>Сухов Ф. И., Попов В. Г., Боландова Ю. К., Асманкин Е. Г.</i> Управление безопасностью и культура безопасности на транспорте	16, 4	611–619
<i>Тонкова М. Л.</i> Инновационные технологии коммерческого осмотра поездов и вагонов	16, 1	130–138
<i>Туранов Х. Т., Рузметов Я. О., Якушев А. В.</i> О деформируемом состоянии механической системы «груз–вагон–крепление»	16, 3	455–468
<i>Федоров И. В., Воробьев А. А., Самаркина И. К., Конограй О. А., Бунькова Т. Г.</i> Исследование напряженного состояния в контакте «колесо–рельс» при наличии выщербины	16, 4	562–572

<i>Фоменко В. Н., Шварц М. А.</i> Динамическое описание температурного режима ствола шахтной вентиляции метрополитена	16, 1	139–148
<i>Хамидов О. Р.</i> Диагностирование и моделирование несимметричных режимов асинхронных тяговых электродвигателей локомотивов с применением искусственных нейронных сетей	16, 2	251–262
<i>Хамидов О. Р.</i> Разработка нейросетевой модели для диагностики состояния локомотивного асинхронного электродвигателя	16, 4	620–630
<i>Цаплин А. Е., Васильев В. А., Фомин С. А.</i> Совершенствование контроля узлов механической части электрического подвижного состава применением интеллектуальной системы тепловизионного контроля	16, 2	268–274
<i>Шрайбер М. А.</i> Диагностика теплового состояния якоря тягового электродвигателя постоянного тока	16, 3	469–477
<i>Шрайбер М. А.</i> Анализ напряженно-деформированного состояния подшипника асинхронного электродвигателя	16, 4	650–657
<i>Юдникова Е. С.</i> Методические аспекты выбора местоположения транспортно-логистического кластера с учетом факторов, определяющих потенциал городов	16, 4	658–669
<i>Якушев А. Я., Назирхонов Т. М., Викулов И. П., Марков К. В.</i> Определение основных параметров асинхронного тягового электродвигателя	16, 4	592–601
<i>Якушев А. Я., Назирхонов Т. М., Кувондинов Ж. О., Раджибаев Д. О.</i> Влияние системы безопасности высокоскоростного электропоезда «Afrosiyob» на условия эксплуатации	16, 3	478–488
ОБЩЕТЕХНИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ		
<i>Адылходжаев А. И., Кадыров И. А., Умаров К. С., Назаров А. А.</i> К вопросу механоактивации цеолитсодержащих пород	16, 3	489–498
<i>Гребенников Н. В.</i> Математическая модель для анализа электромагнитных процессов в реактивных индукторных машинах с сильным взаимным влиянием фаз противоположностей	16, 2	315–321
<i>Елизарьев А. Н., Ахтямов Р. Г., Киселева М. А., Тараканов Д. А., Тараканов Дм. А., Яковлев Д. О., Михайлов П. А.</i> Развитие методических основ оценки возникновения эффекта BLEVE при авариях на объектах хранения топлив	16, 1	157–167

<i>Ермаков Р. Н., Кравцов А. О., Привалов А. А., Заугольный Н. П., Скуднева Е. В.</i> Определение протокола информационного обмена прикладного уровня на основе классификации сетевых пакетов с применением нейронных сетей и алгоритмов нечеткой логики в системах анализа трафика	16, 4	677–690
<i>Кахаров З. В., Эшонов Ф. Ф., Козлов И. С.</i> Определение величин энергетических констант материалов при дроблении твердых тел	16, 3	499–504
<i>Лобанова Ю. В., Брынь М. Я., Афонин Д. А.</i> Определение коэффициента рефракции на коротких расстояниях	16, 4	670–676
<i>Микони С. В., Бураков Д. П.</i> Отладка типовых одномерных функций полезности в модели многомерной полезности	16, 2	301–314
<i>Никитченко А. А., Шевченко Д. В., Дубинский В. А.</i> Расчет силовых характеристик фрикционного поглощающего аппарата с применением метода конечных элементов	16, 3	505–514
<i>Сафонова Т. Ю., Зубков А. Н.</i> Особенности построения перспективы объекта на наклонной и вертикальной картинах	16, 1	149–156
<i>Степанов С. И., Митрофанова И. В.</i> Повышение энергетической эффективности систем снабжения промышленных предприятий сжатым воздухом	16, 3	515–522
<i>Штыков В. И., Пономарёв А. Б.</i> Гидравлический расчет бесполостных дрен треугольного поперечного сечения при переходном режиме	16, 3	523–532