

Вестник

Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта

Научно-технический журнал

Периодичность: 6 номеров в год

Издается с января 1942 г.

ISSN 2223 – 9731, индекс 70116

Международный редакционный совет

В. В. Степов (председатель, канд. экон. наук, АО «ВНИИЖТ», Москва, Россия),

В. Е. Фортон (д-р физ.-мат. наук, проф., академик РАН, Москва, Россия),

Б. М. Лапидус (д-р экон. наук, проф., ОАО «РЖД», Москва, Россия),

К. Эсвельд (проф. железнодорожной инженерии, Технологический университет

Делфта, Зальтбommel, Нидерланды),

И. Г. Горячева (д-р физ.-мат. наук, проф., академик РАН, Институт проблем механики

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

С. Куммер (д-р экономики, проф., Венский экономический университет, Институт

транспорта и логистики, Вена, Австрия),

Н. А. Махутов (д-р техн. наук, проф.,

член-корреспондент РАН, Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН,

Москва, Россия),

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

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

В. Ф. Ушклов (д-р техн. наук, член-корреспондент НАН, Институт технической

механики НАН, Днепр, Украина),

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

Г. С. Фокс-Рабинович (д-р техн. наук,

Университет Макмастера, Гамильтон, Канада),

Б. А. Левин (д-р техн. наук, проф., МИИТ, Москва, Россия),

В. И. Сенько (д-р техн. наук, проф., Белорусский государственный университет

транспорта, Гомель, Республика Беларусь),

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

Д. А. Мачерет (д-р экон. наук, проф., АО «ВНИИЖТ», Москва, Россия),

Б. Е. Дынькин (д-р техн. наук, проф., РГУПС, Ростов-на-Дону, Россия),

Е. Н. Розенберг (д-р техн. наук, проф., ОАО «НИИАС», Москва, Россия),

А. В. Смольянинов (д-р техн. наук, проф., УрГУПС, Екатеринбург, Россия),

Ли Сюэвей (д-р наук, проф., Пекин, Китайская Народная Республика)

Редакционная коллегия

А. Б. Косарев (председатель, д-р техн. наук, проф.),

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

Ж. Е. Бедова (секретарь),

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

Н. Ф. Сирин (д-р техн. наук, доцент),

Д. В. Ермоленко (д-р техн. наук, доцент),

Г. В. Гогричиани (д-р техн. наук),

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

А. Я. Коган (д-р техн. наук, проф.),

В. А. Ивницкий (д-р техн. наук, д-р физ.-мат. наук, проф.),

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

Е. А. Макарова (д-р экон. наук),

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

Е. А. Шур (д-р техн. наук, проф.),

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

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

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

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

© «Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта» («Вестник ВНИИЖТ»), Москва, 2017

Вестник

Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта

Вестник ВНИИЖТ | Том 76, 5/2017

DOI: <http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2017-76-5>

СОДЕРЖАНИЕ

Стратегическое прогнозирование состояния сложной производственной системы — железнодорожный транспорт

Е. А. Сотников, К. П. Шенфельд 255–265

Новый алгоритм автоматизации электроснабжения тяговой сети переменного тока с постом секционирования на выключателях

Л. А. Герман, А. Ю. Попов, А. В. Саморуков, Д. В. Ишкин, Д. В. Якунин, К. С. Субханвердиев 266–272

Исследование влияния параметров сервисного обслуживания на степень удовлетворенности пассажиров на базе применения аппарата нейронных сетей

С. С. Пастухов, К. В. Стельмашенко 273–280

Опыт использования сейсмической регистрации вибраций от поездов для оценки состояния конструкций зданий и сооружений

Н. К. Капустян, Г. Н. Антоновская, И. М. Басакина 281–287

Методика оценки работоспособности противоюзных устройств

И. А. Жаров, А. А. Алексеев 288–293

Учет энергии на подстанциях переменного тока при протекании по контактной сети транзитных токов

В. М. Варенцов, А. И. Бурьяноватый, М. А. Иванов 294–300

Результаты испытаний по показателю внешнего шума электровозов на стоянке

М. Ю. Носков, М. М. Гиншпарг, Н. С. Нестеров 301–305

Разработка алгоритма по определению коэффициента теплопередачи кузова изотермического транспортного средства на основе результатов анализа происходящих в нем теплообменных процессов

А. А. Голубин, С. Н. Науменко 306–311

Моделирование вибродемпфирующих свойств упруговязкопластических слоев земляного полотна. Постановка задачи 2

В. М. Бельков 312–320

Свидетельство о регистрации

ПИ № ФС77-35600 от 17.03.2009.

Мнение редакции может не совпадать с мнением авторов статей.

Редакция не несет ответственности

за содержание рекламных материалов.

Адрес учредителя, издателя, редакции

журнала «Вестник ВНИИЖТ»:

129626, Москва, 3-я Мытищинская ул., 10.

Тел. (499) 260-43-19.

Цена свободная.

Главный редактор — Ж. Е. Бедова.

Подписано к печати 27.10.2017.

Дата выхода в свет 03.11.2017.

Формат бумаги 60×90 1/8.

Офсетная печать. Усл. печ. л. 8,5.

Тираж 600 экз. Заказ 1432.

Верстка — ООО «ИПП «КУНА».

Отпечатано в ООО «Типография Парадиз»,

143090, Московская обл.,

г. Краснознаменск, ул. Парковая, д. 2а.

Тел. (495) 775-24-10.

Vestnik VNIIZhT

Vestnik of the Railway Research Institute
Vol. 76, 5/2017

DOI: <http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2017-76-5>

Contents

Strategic forecasting of complex production system — railway transport

by E. A. Sotnikov, K. P. Shenfeld 255–265

A new algorithm for automating power supply of an AC traction network with a sectioning points on switches

by L. A. German, A. Yu. Popov, A. V. Samorukov, D. V. Ishkin, D. V. Yakunin, K. S. Subkhanverdiev 266–272

Investigation of the impact of service parameters on the degree of passenger satisfaction based on the application of the apparatus of neural networks

by S. S. Pastukhov, K. V. Stel'mashenko 273–280

Experience in the use of seismic recording of vibrations from trains to evaluate the condition of buildings and structures

by N. K. Kapustyan, G. N. Antonovskaya, I. M. Basakina 281–287

Method for evaluating the performance of antiskid devices

by I. A. Zharov, A. A. Alekseev 288–293

Energy accounting in AC substations in case of transit currents flowing through the contact network

by V. M. Varentsov, A. I. Bur'yanovaty, M. A. Ivanov 294–300

Results of tests on the indicator of external noise of electric locomotives in the standing time

by M. Yu. Noskov, M. M. Ginchparg, N. S. Nesterov 301–305

Development of an algorithm for determining the heat transfer coefficient of the body of an isothermal vehicle based on the results of analysis of the heat exchange processes occurring in it

by A. A. Golubin, S. N. Naumenko 306–311

Modelling of vibration-damping properties of elastic-viscoplastic layers of the roadbed. Problem statement 2

by V. M. Bel'kov 312–320

Editorial Board:

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

Georgy V. Gogrichiani
(Dr. Sci. (Eng.)),
Alexander V. Kotelnikov
(Dr. Sci. (Eng.), Prof.),
Alexander Ya. Kogan
(Dr. Sci. (Eng.), Prof.),
Victor A. Ivnit'skiy
(Dr. Sci. (Eng.), Dr. Sci. (Phys. and Math.), Prof.),
Vladislav A. Kuchumov
(Dr. Sci. (Eng.), Prof.),

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

Scientific Editors — D. V. Ermolenko, D. A. Macheret, Yu. S. Romen

Editor-in-Chief: Joan E. Bedova
E-mail: journal@vniizht.ru
Layout & Design: OOO "IPP "KUNA".
Passed for printing 27.10.2017
Format 60×90 1/8. Circulation 600 copies

Editorial office: 10, 3rd Mytischinskaya,
129626 Moscow, Russian Federation
Tel.: +7 (499) 260 4319
Print: "Printing-office Paradiz LTD".
info@paradiz.ru

Vestnik VNIIZhT
is published six times per year
First published in 1942
ISSN 2223 – 9731

A peer reviewed scientific and technological journal

Publisher:

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

International Advisory Board:

Victor V. Stepov,

Cand. Sci. (Econ.), General Director of JSC "VNIIZhT",
Master's degree in business administration (MBA)
in Stockholm School of Economics, Moscow,
Russian Federation

Vladimir E. Fortov,

Dr. Sci. (Phys. and Math.), Professor, Academician of the
Russian Academy of Sciences (RAS), Director of United High
Temperature Institute of RAS, Moscow, Russian Federation

Boris M. Lapidus,

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

Coenraad Esveld,

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

Irina G. Goryacheva,

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

Sebastian Kummer,

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

Nikolay A. Makhutov,

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

Vladimir I. Kolesnikov,

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

Victor F. Ushkalov,

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

Konstantin P. Shenfeld,

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

Herman S. Fox-Rabinovich,

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

Boris A. Levin,

Dr. Sci. (Eng.), Professor, rector of the Moscow State
University of Railway Engineering (MIIT),
Moscow, Russian Federation

Li Xuewei,

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

Benjamin I. Senco,

Dr. Sci. (Eng.), Professor, rector of the Belorussian State
University of Transport, Gomel, Republic of Belarus

Oleg N. Nazarov,

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

Dmitriy A. Macheret,

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

Boris E. Dynkin,

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

Efim N. Rozenberg,

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

Alexander V. Smolyaninov,

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

© JSC Railway Research Institute, Moscow 2017

Стратегическое прогнозирование состояния сложной производственной системы — железнодорожный транспорт

Е. А. СОТНИКОВ, К. П. ШЕНФЕЛЬД

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

Аннотация. Рассмотрены условия и методика разработки стратегического прогноза технико-экономического состояния мирового и российского железнодорожного транспорта на период 30–50 лет и более. Выполнен анализ изменения состояния инфраструктуры, подвижного состава, организации движения поездов и маневровой работы, характера управления перевозочным процессом с 1825 г. по настоящее время. Установлено, что многие количественные и качественные показатели их технико-технологического состояния улучшились за этот период в разы и на порядки. Это позволило железнодорожному транспорту обеспечить высокий уровень конкурентоспособности в транспортной системе мира, в том числе и в нашей стране, несмотря на появление все новых видов транспорта. В то же время некоторые такие показатели в настоящее время близки к максимально возможному и не смогут в перспективе так же быстро расти. Принято положение, что при разработке стратегических прогнозов технико-технологического состояния сложных (больших) производственных систем необходимо определить важнейшие параметры, которые в перспективе могут улучшаться в разы и на порядки, что позволит в рассматриваемой сложной системе достигнуть существенного снижения расходов, сохранить и даже повысить свою конкурентоспособность. Определены основные тренды развития железных дорог на стратегический перспективный период с учетом опоры развития их технико-технологического состояния на достижения фундаментальной и отраслевой науки. Эти тренды учитывают как известные решения, например, высокоскоростные специализированные пассажирские магистрали, так и новые. Реализация предложений позволит железным дорогам достигнуть снижения удельных расходов (на единицу транспортной продукции), сохранить и приумножить свою конкурентоспособность на постоянно развивающемся транспортном рынке.

Ключевые слова: железнодорожный транспорт; стратегический прогноз; 30–50 лет; технико-технологические решения; достижения научно-технического прогресса; основные тренды развития

Понятие стратегического прогноза. Возможны различные виды прогнозов развития сложных (больших) производственных систем, к которым, несомненно, относится железнодорожный транспорт как самостоятельная транспортная система. Традиционно используются следующие виды прогнозов: оперативный — до 1 месяца, краткосрочный — до 1 года, среднесрочный — от 1 до 5 лет, долгосрочный — от 5 до 15 лет, дальнесрочный — более 15 лет.

В ОАО «РЖД» в целом для системы постоянно выполняются все указанные виды прогнозов. Ежемесячно разрабатываются оперативные прогнозы хода перевозочного процесса в виде месячных технических норм эксплуатационной работы. Месячные планы своей деятельности разрабатывают и все самостоятельные подразделения компании. То же относится и к годовым планам, являющимся по существу краткосрочными прогнозами. В компании разрабатываются также среднесрочные и долгосрочные прогнозы. Так, периодически актуализируется Генеральная схема развития сети железных дорог ОАО «РЖД» на период 5–10 лет и более [1, 2]. На период 15 лет разрабатывается Стратегия научно-технологического развития холдинга «Российские железные дороги» («Белая книга»). Все эти документы имеют важнейшее значение для организации как оперативной работы по перевозкам грузов и пассажиров, так и для технико-технологического развития компании.

Для указанных видов прогнозов характерным является использование в качестве основы прогнозирования в основном хорошо известных технических и технологических решений. Это могут быть, например, уже используемые решения. Так, в Генеральной схеме развития сети железных дорог для различных полигонов предусматривается переход от однопутных к двухпутным линиям, электрификация участков и целых направлений, развитие станций и др. Возможно включение в рассматриваемые виды прогнозов и таких решений, которые на сети ОАО «РЖД» еще не используются, но их научно-техническая разработка в основном завершена, или подобные решения известны из мировой практики, например, строительство высокоскоростных специализированных пассажирских магистралей (ВСМ).

Однако для повышения обоснованности среднесрочных и долгосрочных прогнозов целесообразно выполнять дальнесрочные прогнозы на период более 15 лет, и в их числе прогнозы на значительно более длительные периоды, а именно на период 30–50 лет.

■ E-mail: press@vniizht.ru (К. П. Шенфельд)

Именно такие виды прогнозов, назовем их стратегическими, и рассматриваются в настоящей статье.

Особенности стратегического прогноза. Принципиальным отличием стратегического прогноза от других их видов является повышенный уровень неопределенности использования различных технологических решений, которые будут применяться через 30–50 лет. Например, 50 лет назад, т. е. в 1970-е гг. никто не мог представить бурного развития в настоящее время технологий Интернета или принципиального изменения требований к решению экологических вопросов.

Наиболее сложно предсказать базисные макроэволюции (классификация [3]), которые становятся основой революционных переворотов технико-технологического состояния сложной системы.

Для отечественного железнодорожного транспорта, несомненно являющегося сложной системой, в этой части хорошим примером является принятие в 1950-х гг. решения о генеральном плане электрификации железных дорог на основе стратегических прогнозов развития тяги. С тех пор прошло более 60 лет, и мы хорошо видим все положительные результаты этого решения для отрасли и страны в целом. И наоборот, недооценка прогнозов, выполненных в 1970–80-х гг. о необходимости строительства в стране ВСМ, привела к глубокому отставанию нашей страны в этой области от мирового уровня. То есть важна не только разработка прогноза, но и своевременная его реализация.

Еще древнегреческий философ Аристотель говорил, что благо везде и повсюду зависит от соблюдения двух условий: первого — правильно установленной конечной цели и второго — отыскания соответствующих средств, ведущих к конечной цели. Прогноз в различных его видах, в том числе и стратегический, и есть первое условие достижения «блага». Сегодня это первое условие Аристотеля получило название «целевое состояние».

Для определения в стратегическом прогнозе целевого состояния сложной системы требуется выполнение глубокого анализа возможных макро- и микроизобретений и новаций [3], которые могут быть использованы на железнодорожном транспорте для повышения его эффективности и конкурентоспособности. При этом, конечно, надо хорошо понимать потребности железных дорог в инновациях.

Определение основных трендов развития железных дорог. Чтобы заглянуть далеко вперед, надо хорошо понимать, что было в прошлом, каковы тренды развития отрасли, включая мировой уровень, и где мы находимся в настоящий, исходный для стратегического прогноза период. В табл. 1 приведено изменение основных характеристик технико-технологического состояния мирового железнодорожного транспорта в развитых странах более чем за 190 лет его функ-

ционирования с 1825 г. и по настоящее время по четырем составляющим: инфраструктура (путь), подвижной состав, организация движения поездов и маневровой работы, характер управления перевозочным процессом. Данные представлены для начального и современного состояния, а также некоторого промежуточного состояния, технико-технологические характеристики которого достигались в основном в 1900–1960 гг.

Из данных табл. 1 хорошо видно, насколько кардинальные изменения произошли в техническом и технологическом отношении на железных дорогах мира. Именно поэтому железнодорожный транспорт остался до настоящего времени во многих странах (США, России, Германии, Франции, Китая, Индии, Японии и др.), по существу, основным видом коммуникации, несмотря на бурное развитие авиации, автотранспорта и трубопроводов. Этому железным дорогам удалось достигнуть благодаря тому, что они активно впитывали все основные достижения научно-технического прогресса. При этом для железных дорог характерно, что научные достижения по многим отраслям науки и техники могут использоваться для инновационного совершенствования подвижного состава, инфраструктуры, средств управления. Сегодня — это новые материалы, нанотехнологии, вычислительная техника, цифровая связь и многое другое.

Из анализа данных табл. 1 следует важнейший вывод о том, что железные дороги способны в полной мере соответствовать современным требованиям, предъявляемым к транспортным средствам, при условии эффективного использования достижений научно-технического прогресса.

В стратегическом прогнозе будем исходить из условия, что железные дороги мира и нашей страны будут в полной мере опираться в своем развитии на достижения фундаментальной и отраслевой науки, а их технико-технологическое состояние будет в перспективе изменяться так же энергично, как это имело место за более чем 190 лет функционирования с 1825 по 2017 г.

Отметим прежде всего, что многие количественные и качественные показатели технико-технологического состояния железных дорог изменились за этот период в разы и на порядки [4]. Так, максимальная скорость в пассажирском движении возросла с 60 до 350 км/ч, или в 5,8 раза, осевая нагрузка — с 8 до 40 т/ось, или в 5 раз и т. д. В результате пропускная и провозная способность участков, производительность сортировочных станций, сила тяги локомотивов, грузоподъемность вагона и другие основные характеристики эффективной работы железнодорожного транспорта увеличились в десятки раз.

По нашему мнению, именно возможность значительного (в разы и на порядки) улучшения важнейших

Таблица 1

Изменение технико-технологического состояния
железнодорожного транспорта в развитых странах мира

Table 1

Change in the technical and technological state
of railway transport in developed countries

Инфраструктура (путь)	Подвижной состав	Организация движения и маневровой работы	Характер управления перевозочным процессом
1825 г.			
– чугунные рельсы, 25 кг/м; – деревянные шпалы; – звеньевой путь; – ручной ремонт пути	– паровая тяга; – 2-осные вагоны; – осевая нагрузка 8 т/ось; – ручное торможение; – винтовая сцепка; – $v \leq 60$ км/ч	– телеграфная связь; – семафоры; – выполнение маневров осаживанием; – ручной перевод стрелок	– управление отдельными линиями, движение вагонов только по «своим» линиям; – график движения поездов
1900–1950 гг.			
– стальные рельсы, 40–50 кг/м; – железобетонные шпалы; – рельсовые плети; – отдельные путевые машины	– электрическая и тепловозная тяга; – 4-осные цельнометаллические вагоны; – осевая нагрузка 25 т/ось; – пневматические автотормоза; – автосцепка; – специализация вагонов; – контейнеризация; – $v \leq 200$ км/ч	– жезловая система; – полу- и автоблокировка; – светофоры; – ЭЦ, ДЦ; – диспетчерское управление на участках; – радиосвязь; – сортировочные горки	– взаимодействие между линиями; – централизация управления вагонным парком, план формирования поездов; – доставка грузов «точно в срок»; – управление национальными сетями железных дорог
2017 г.			
– закаленные рельсы из легированных сталей, 70–75 кг/м; – шлифовка рельсов; – плиточное, монолитное основание; – рельсовые плети неограниченной длины; – межремонтный ресурс до 1 млрд т; – механизированный ремонт; – автоматизация диагностики	– линии ВСМ, $v = 350\text{--}400$ км/ч, рекорд — 574 км/ч; – асинхронный привод; – использование алюминия, новых материалов, нанотехнологии; – цельнокатанные колеса; – электропневматические тормоза; – жесткое сцепное устройство; – осевая нагрузка до 40 т/ось; – тяжеловесное движение, масса поезда до 48 тыс. т, рекорд — 99 тыс. т; – газотурбовозы; – эксплуатационно-ремонтные комплексы с автоматической диагностикой	– интервальное регулирование движения поездов; – диспетчерские центры управления перевозками (ЦУП) на крупных полигонах (до 56 тыс. км); – оптоволоконные цифровые линии связи; – мощные системы передачи данных (СПД); – автоматизация сортировочной работы; – сортировочные станции с местными парками; – параллельный роспуск составов	– интеграция национальных сетей железных дорог (Сев. Америка, Европа, СНГ); – международные транспортные коридоры; – мировая контейнерная сеть; – межгосударственные информационные центры, единые базы данных, информационные технологии; – глубокая специализация подвижного состава; – логистическое управление перевозками, мультимодальные перевозки, контейнерные перевозки

показателей сложных производственных систем на основе реализации достижений научно-технического прогресса является важнейшим условием жизнеспособности таких систем.

В то же время не все показатели могут постоянно значительно улучшаться. Для традиционных железных дорог некоторые показатели сегодня близки к максимально возможному уровню, например, максимальная скорость. Известно, что при скорости более 300 км/ч воздушное сопротивление движению наземного транспорта быстро растет пропорционально квадрату скорости и дальнейший ее рост требует больших затрат энергии. Поэтому сегодня возникла идея поме-

стить подвижной состав в трубу с низким давлением в ней воздуха, но это уже не железнодорожный транспорт, а скорее возможный его конкурент.

В стратегическом прогнозе требуется определить, какие основные параметры и показатели, изменяясь именно в разы и на порядки, позволят железнодорожному транспорту сохранить или даже расширить свои возможности по эффективной перевозке грузов и пассажиров.

Роль железных дорог в мировом транспортном рынке. Благодаря своему инновационному развитию в настоящее время железные дороги мира занимают существенную нишу на высококонкурентном транс-

портном рынке. На рис. 1 показан рост перевозок грузов (в млрд т·км) за 190 лет существования железных дорог и изменение их доли в мировом грузообороте всех видов транспорта (оценочные данные [5–9]). В отдельные исторически краткосрочные периоды в некоторых странах грузооборот железных дорог снижался. Так, в странах Западной Европы это имело место в 1960–80-е гг. Но в это же время быстро увеличивался грузооборот железных дорог СССР и стран Восточной Европы. В 1990-е гг. снижался грузооборот железных дорог США и России. Но в этот период существенно возрастал грузооборот железных дорог Китая. В результате мировой грузооборот железных дорог мира практически непрерывно увеличивался на протяжении всего рассматриваемого периода, что и отражено на рис. 1.

Отметим, что снижение доли грузооборота железных дорог в 1920–30-е гг. и особенно после 1945 г. происходило в первую очередь за счет развития автомобильного и трубопроводного транспорта.

Укажем на достигнутое высокое абсолютное значение грузооборота железных дорог мира, составляющее более 10 000 млрд т·км/год. При численности населения Земли ~ 7 млрд чел. на одного жителя приходится перевозочная работа железных дорог, равная примерно 1,43 тыс. т·км в год, или 3,9 т·км в сутки. То есть для обеспечения современного уровня жизни человечества железные дороги должны ежедневно обеспечить в среднем для каждого жителя Земли перемещение 4-х тонн различных грузов на расстояние 1 км. Для группы наиболее развитых стран этот показатель равен 14,2 т·км/сут, а для России с ее огромными континентальными расстояниями — 42,0 т·км/сут.

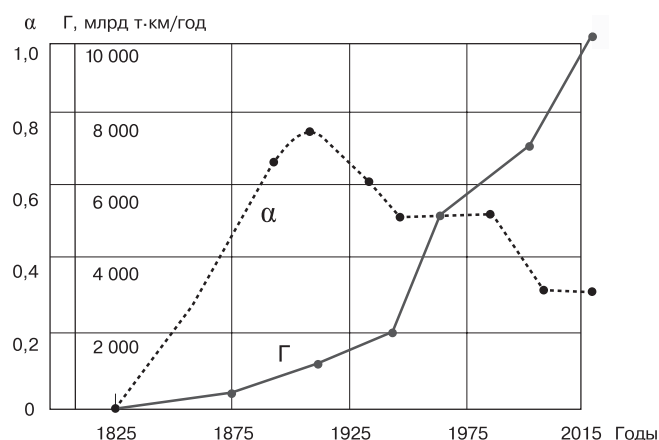


Рис. 1. Изменение объемов перевозочной работы (млрд т·км/год) на железных дорогах мира (Г) и их доли в мировом грузообороте всех видов внутреннего транспорта (α) в 1825–2016 гг. (оценочные данные)

Fig. 1. Change in the volume of transportation (billion t·km/year) on the world's railways (Г) and their share in the world freight turnover of all types of inland transport (α) in 1825–2016 (estimated data)

Ввиду неполноты статистических материалов дать оценку динамики изменения перевозочной пассажирской работы достаточно сложно. Тем не менее общая работа всех видов мирового транспорта (включая городской) в 2016 г. может быть оценена величиной порядка 19000 млрд пассажиро·км, в том числе 2680 млрд пассажиро·км приходится на железные дороги мира [10–14]. Доля российского транспортного комплекса, т. е. общая работа всех видов транспорта, составила 550 млрд пассажиро·км, или 2,9%, при этом Российские железные дороги выполнили 124,5 млрд пассажиро·км. Известно, что подлинной революцией в железнодорожных пассажирских перевозках стала реализация высокоскоростного движения поездов на ВСМ со скоростями в настоящее время до 350 км/ч. На рис. 2 представлена динамика изменения протяженности высокоскоростных магистралей с 1964 г. по настоящее время (данные И. П. Киселева). При этом при длине ВСМ, равной 3 % от общей протяженности мировой сети железных дорог, на них выполняется около 12 % перевозочной работы пассажиров, т. е. ежегодно примерно 300 млрд пассажиро·км (оценочные данные). Роль ВСМ будет и в дальнейшем возрастать.

В целом в настоящее время позиции железнодорожного транспорта на мировом транспортном рынке характеризуются в развитых странах достаточно высоким технико-технологическим уровнем, в основном соответствующим современному уровню развития науки и техники, предоставлением широкого спектра услуг потребителям по перевозке пассажиров и грузов, высокой долей перевозочной работы среди всех видов транспорта и большими размерами абсолютных значений грузооборота и пассажирооборота.

Перспективный объем перевозок. Определим теперь перспективы дальнейшей работы и развития железнодорожного транспорта. Решение этого вопроса необходимо начать с рассмотрения грузовой базы и потребностей населения в перевозках. То есть надо определить характер изменения объемов перевозок грузов и пассажиров на период перспективного прогноза 30–50 лет и более. Этот вопрос далеко не праздный. Если для частного бизнеса, особенно малого и среднего, такой период прогноза не представляет интереса, то для определения государственной транспортной политики, а также перспектив развития отдельных транспортных отраслей, в том числе железных дорог, такой прогноз необходим. Он должен использоваться и при разработке длительно действующей законодательной базы, связанной с комплексным развитием различных видов транспорта.

Главный вопрос определения грузовой базы мирового железнодорожного транспорта в стратегическом прогнозе связан с проблемой продолжительности периода сохранения современного промышленного и экономического уклада жизни человечества, когда

значительную долю в грузовых перевозках железных дорог составляют уголь и нефтяные грузы. Например, на Российских железных дорогах эта доля достигает 45 %. Период массовых перевозок таких грузов теоретически может быть очень большим, поскольку разведанных запасов угля хватит примерно на 500 лет, а нефти — на много десятилетий, причем находятся все новые ее месторождения и методы добычи. Это, однако, не значит, что обеспечение человечества энергией будет долго основано на использовании невозобновляемых природных источников — углеводородов. Постоянно расширяется получение энергии за счет солнечных и ветровых электростанций. К сожалению, атомные электростанции, на которые возлагалось так много надежд, оказались небезопасными. Однако есть большие надежды на получение электроэнергии за счет термоядерного синтеза. Предсказать, когда это случится, сегодня невозможно, но это обязательно осуществится. То же и с топливом для автомобилей, самолетов и другой техники, работающей в настоящее время с использованием двигателей внутреннего сгорания на бензине, мазуте, керосине. Простой переход на электромобили ничего не решает, так как потребуются значительно увеличить выработку электроэнергии на современных электростанциях, в том числе работающих на угле и мазуте. Но возможно использование на транспорте в качестве топлива водорода, и тогда структура перевозимых по железным дорогам грузов может существенно измениться. Однако даже при полном решении научно-технических задач перехода на возобновляемые источники энергии потребуются десятилетия для создания соответствующей инфраструктуры и парка подвижного состава.

Поэтому можно ожидать, что в ближайшие 20–30 лет высокая доля угля и нефти в перевозках железных дорог сохранится. Далее возможно их постепенное снижение.

Но у мирового, в том числе и российского, железнодорожного транспорта есть огромные резервы роста перевозок других грузов. Рассмотрим некоторые факторы, влияющие на увеличение мирового объема перевозок грузов.

Во-первых, население Земли и многих стран, в том числе и России, будет увеличиваться. Необходимо обеспечение каждого человека жильем, питанием, одеждой, транспортом и другими продуктами и услугами, что достигается развитием материального производства. И ресурсы (сырьевые, сельскохозяйственные, строительные и др.) для этого на ближайшие 100 лет имеются. По прогнозам к 2050 г. мировое население составит 10 млрд чел., т. е. численность населения увеличится на 3 млрд чел. Снижение роста народонаселения в отдельные исторически короткие периоды на этот процесс не влияет. Как уже говорилось, на одного жителя Земли приходится в настоящее время примерно 1,43 тыс. т·км в год

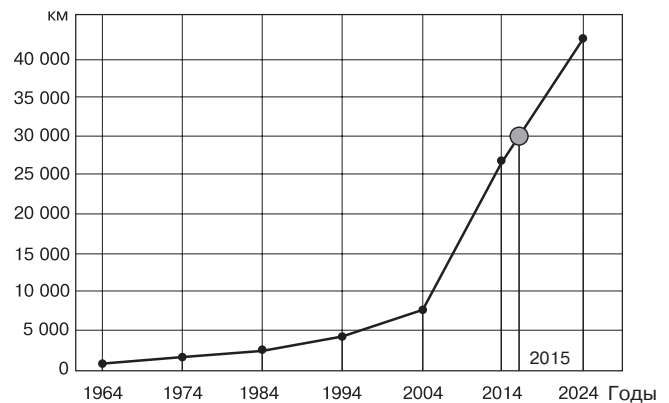


Рис. 2. Динамика развития сети ВСМ в мире с 1964 г., км
Fig. 2. Dynamics of the HS line network development in the world since 1964, km

перевозочной работы железных дорог. То есть прирост населения Земли на каждый 1 млрд чел. означает необходимость прироста перевозочной работы железных дорог, равной 1430 млрд т·км. Но это при условии сохранения среднего жизненного уровня. В развитых странах перевозочная работа железных дорог в 3,6 раза превышает среднемировой уровень. Поэтому при достижении уровня жизни развитых стран можно ожидать увеличения перевозочной работы не менее чем до $1430 \times 3,6 = 5148$ млрд т·км на каждый 1 млрд чел.

При этом, конечно, должны учитываться экологические вопросы, которые могут быть решены на основе инновационного развития, подобно, например, созданию линий ВСМ для освоения междугородных пассажирских перевозок.

По критерию соблюдения экологических требований необходимо обеспечивать снижение воздействия транспорта на окружающую среду даже при увеличении объемов перевозок. При строительстве линий ВСМ как раз это и достигается. Так, подсчитано, что создание сети ВСМ в Европе обеспечило сокращение выбросов углерода в атмосферу ежегодно на 15 млн т за счет переключения на ВСМ возросшего пассажиропотока с авиации, автотранспорта и обычных железных дорог. В грузовом движении снижение удельных энергетических затрат на 1 т·км и, соответственно, снижение вредных выбросов в атмосферу достигается за счет повышения массы поездов, снижения тары вагонов и многих других мер.

Рост населения Земли непосредственно влияет на объем транзитных перевозок грузов по Российским железным дорогам, что должно учитываться в стратегическом прогнозе.

Во-вторых, растет количество и разнообразие сельскохозяйственных и промышленных, потребляемых населением продуктов, что вызывает необходимость увеличения перевозок самых различных групп грузов.

Таблица 2
Потребительские оценки мест, занимаемых различными видами транспорта

Table 2
Consumer estimates of places occupied by various modes of transport

Вид транспорта	Занимаемые места по потребительским оценкам		
	Качество обслуживания	Безопасность	Экологичность
Железнодорожный	2	1	1
Автомобильный	1	3	3
Внутренний водный	3	2	2

Так, сегодня Единая тарифно-статистическая номенклатура грузов, перевозимых железными дорогами России, насчитывает более 10 тыс. наименований. С развитием общества, повышением уровня жизни населения такая номенклатура будет расширяться, будут увеличиваться и объемы перевозок.

В-третьих, железные дороги имеют ряд важных преимуществ по сравнению с другими видами наземного транспорта. Это, прежде всего, себестоимость, которая составляет в России на 10 приведенных т·км для железнодорожного транспорта примерно 3,9 руб., речного — 4,5 руб., автомобильного — 66 руб. Железнодорожный транспорт, как известно, является одним из наиболее экологичных видов транспорта. Так, удельные выбросы окиси углерода (СО), определяемые в граммах на 1 т·км, меньше только на морском транспорте (не считая трубопроводного), имеют место низкие удельные выбросы и по другим вредным веществам. Железные дороги отличаются высоким уровнем безопасности. По производительности труда железнодорожный транспорт опережает автомобильный в 9–10 раз. Эти данные говорят о большом потенциале переключения перевозок грузов на железные дороги с других видов транспорта.

На хорошие перспективы общего роста перевозок и преимущества железнодорожного транспорта указывают оценки транспортных экспертов.

Так, в ежегодных опросах французского бюро Norton Rose Fulbright [4], в которых участвуют сотни специалистов транспортного сектора, 82 % опрошенных прогнозируют увеличение перевозок в будущем, 75 % оценивают ситуацию на транспорте как благоприятную. На основе данных различных экономических изданий в табл. 2 приведены потребительские оценки мест, занимаемых различными видами транспорта [4].

Указанные преимущества, безусловно, привлекают владельцев грузов к перевозкам по железным дорогам. В свою очередь железные дороги, внедряя достижения научно-технического прогресса, шире

используя клиентоориентированные технологии (контейнеризация, технология «just in time» и др.), должны увеличивать их привлекательность для перевозок. В противном случае железнодорожный транспорт может лишиться своих преимуществ.

Характерен следующий пример [12]. В 1950-х гг. государственному железнодорожному транспорту Великобритании уделялось недостаточное внимание, было допущено значительное отставание в технической вооруженности. Например, локомотивный парк состоял на 90 % из маломощных паровозов старых серий. Налицо был кризис железных дорог, вызвавший потерю грузопотоков и убыточность. Среди английских специалистов появились пессимистические взгляды на будущее железнодорожного транспорта в стране вообще. В этот период представитель Британского военного министерства Ллойд представил в апреле 1955 г. доклад, посвященный вопросу полной замены в стране железнодорожного транспорта автомобильным с устройством по трассам железных дорог 32 тыс. км новых автомагистралей. Однако государственные деятели Великобритании правильно оценили важную роль железных дорог в жизни страны. Этот доклад подвергся серьезной критике, и вопрос о его реализации не рассматривался, а к железным дорогам страны внимание было повышено для вывода их из кризисного состояния. Тем не менее этот факт говорит о необходимости постоянного сохранения и приумножения конкурентных преимуществ железнодорожного транспорта.

Что касается перспективных объемов пассажирских перевозок, то для железных дорог они более чем оптимистичны. И это является следствием роста населения Земли, особенно в городах, и повышением жизненного уровня людей. На рис. 3 представлена диаграмма роста населения Земли, которое уже к 2030 г. по прогнозам достигнет уровня около 8 млрд чел., хотя темпы прироста населения в дальнейшем будут снижаться.

Демографические прогнозы указывают, что в развивающихся странах рост населения городов будет продолжаться ускоренными темпами. В 2009 г. численность городского населения впервые за всю мировую историю сравнялась с численностью сельского населения, и дальше число городских жителей будет увеличиваться опережающими темпами. Число мегагородов (более 10 млн чел.) в мире к 2030 г. составит более 20, из которых почти 80 % будут располагаться в развивающихся странах. Заметим, что в 1950 г. был только один мегагород — Нью-Йорк. Уже сегодня в Китае в городах проживает более 60 % населения, а к 2030 г. этот показатель составит 70 % при абсолютном числе городских жителей примерно 1 млрд чел. По состоянию на 2010 г. в Китае был 221 город с населением от 500 тыс. до 1 млн. чел. и 81 город с населением

1 млн чел. и более. Быстро растет городское население в Индии и других развивающихся странах.

Рост городского населения имеет два следствия, связанных с увеличением пассажирских перевозок по железным дорогам. Во-первых, это рост пригородных перевозок, а также внутригородских, что характерно, например, для Москвы, Берлина и ряда других городов. И, во-вторых, рост междугородных перевозок на расстояниях до 1000–1500 км, выполняемых скоростными и особенно высокоскоростными поездами по линиям ВСМ. Городское население России сегодня составляет примерно 75 %. В нашей стране основным фактором увеличения перевозок пассажиров выступает рост жизненного уровня и, соответственно, повышение мобильности населения. Железные дороги должны быть готовы к освоению возрастающих перевозок пассажиров и в свою очередь предлагать новые услуги, связанные с повышением скорости, комфорта, удобства расписаний движений поездов для пассажиров, предоставлением гибких тарифов и т. п.

Таким образом, в перспективе 2030–50 гг. и далее предстоит повышение или, по крайней мере, сохранение грузовой базы для перевозок железнодорожным транспортом и существенный рост потребностей населения в передвижениях.

Стратегический прогноз развития технико-технологического состояния. Рассмотрим теперь, какие перспективы имеются у железнодорожного транспорта для сохранения и даже повышения своей роли в мировой транспортной системе на период прогноза 30–50 лет и более. При этом надо понимать, что другие виды транспорта быстро развиваются и в конкурентной среде стремятся занять различные ниши перевозок, традиционно занимаемые железными дорогами. Хорошо известно, например, что в России в последние десятилетия из-за отставания железнодорожного транспорта в своем технико-технологическом развитии часть перевозок срочных (ценных) грузов и пассажиров перешла на автотранспорт. Такой отток перевозок срочных (ценных) грузов приводит к ухудшению финансового положения железных дорог и, соответственно, нарастанию затруднений в финансировании мер по освоению новых технических средств и технологий для повышения их конкурентоспособности.

По аналогии с прошедшим 190-летним периодом развития мирового железнодорожного транспорта надо определить на перспективу 30–50 лет и более дальнейшие возможности увеличения в разы и на порядки важнейших параметров функционирования железных дорог. Только наличие таких перспектив и их реализация, по нашему мнению, позволит им сохранить и усилить свое положение в конкурентной транспортной среде.

Перспективные технико-технологические решения, позволяющие в разы и на порядки улучшать важ-

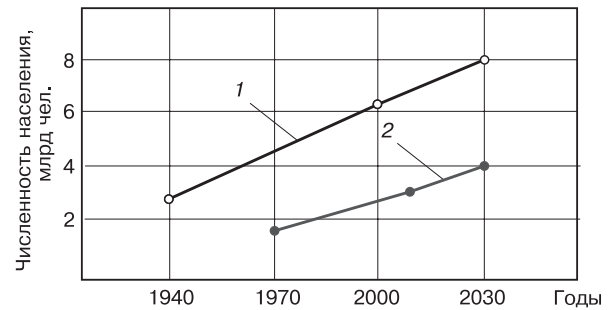


Рис. 3. Рост населения Земли (1) и тренд изменения численности городского населения (2)

Fig. 3. Growth of the Earth's population (1) and the trend of urban population change (2)

нейшие параметры работы железнодорожного транспорта, можно разделить на два типа:

- 1) известные и уже применяемые в мировой практике решения;
- 2) новые решения, для внедрения которых требуются новые научно-технические разработки.

К решениям первого типа относится, например, создание сети линий ВСМ. Российским железным дорогам предстоит наверстать допущенное серьезное отставание от мирового уровня и в перспективе 30–50 лет создать сеть российских ВСМ. Значительный эффект по повышению конкурентоспособности железных дорог в пассажирских перевозках, удельной экономии энергии и материальных ресурсов и другие положительные эффекты ВСМ хорошо известны [15] и нет необходимости их рассматривать. То же относится и к таким мерам, как развитие информационных технологий, повышение осевых нагрузок в грузовом движении, внедрение энергоэффективного подвижного состава (в частности газотурбовозов) и др. Особо следует отметить необходимость на порядок и более увеличения объема контейнерных перевозок, поскольку доля контейнеризации перевозок сегодня исчисляется процентами, а должна исчисляться в перспективе десятками процентов [15], особенно при определенном снижении перевозок угольных и нефтяных грузов.

Более подробно рассмотрим технико-технологические решения второго типа.

Одним из решающих параметров для железных дорог является надежность работы и достигнутый эксплуатационный ресурс технических средств. Современный уровень этого параметра можно оценить как крайне недостаточный. Например, на инфраструктуре Российских железных дорог ежегодно предоставляется около 600 тыс. «окон» различной продолжительности (некоторая часть из которых связана с реконструкцией линий). Для поддержания локомотивов в исправном техническом состоянии между плановыми видами ремонта практически ежедневно выполняются операции по техническому обслужи-

ванию локомотивов с отвлечением их от работы на 2–3 ч. Примерно 12–15% общего локомотивного парка железных дорог постоянно находятся в состоянии выполнения различных видов ремонта. Аналогично положение и по другим техническим средствам железных дорог. Все это вызывает большие расходы и повышение себестоимости перевозок, а значит, и снижение конкурентоспособности железнодорожного транспорта.

На наш взгляд, вполне реально за период стратегического прогноза 30–50 лет и более повысить в разы, а возможно, и на порядок надежность и фактический эксплуатационный ресурс технических средств железных дорог. Основой этого должны стать достижения фундаментальной науки в области материалов — металлов, сплавов, полимерных материалов, в том числе углепластиков, смазок и др. Важно, что инновационные материалы могут обеспечить повышение основополагающих для железнодорожной техники параметров — модуля упругости, статической и динамической усталостной прочности. Однако не надо думать, что новые материалы придут на железнодорожный транспорт сами собой. Без глубокого взаимодействия отраслевой и фундаментальной науки это произойдет либо с большим опозданием, либо с серьезными ошибками. Возьмем, например, проблему взаимодействия в системе «колесо — рельс». Если создать сверхвысокопрочный рельс, то возникнет повышенный износ колес. Возможна и обратная ситуация. Здесь, как и в других вопросах, необходимо оптимизировать принимаемые решения. Нужны исследования, испытания, принятие на этой основе межотраслевых стандартов, которые должны обновляться при достижении новых научных результатов. Особо следует сказать об испытательной базе. Во многих странах мира имеются испытательные полигоны для железнодорожной техники. Так, на железных дорогах США работает специальный экспериментальный полигон (Пуэбло), который имеет длину путевого развития более 80 км и множество испытательных стендов. Здесь непрерывно выполняются испытания путевой техники, подвижного состава и других технических средств. Для проведения различного типа испытаний инфраструктуры и подвижного состава должен и дальше развиваться основной экспериментальный полигон Российских железных дорог на станции Щербинка.

Можно с высокой степенью уверенности утверждать, что многократное (или даже на порядки) повышение надежности и фактического эксплуатационного ресурса технических средств железных дорог, в первую очередь пути, контактной сети, подвижного состава, при правильной организации взаимодействия фундаментальной и отраслевой науки является реальной задачей для российского железнодорожного транспорта.

Большие резервы повышения производительности труда кроются в решении задачи интеллектуализации рабочих мест оперативного управляющего персонала железных дорог [4]. Главное здесь заключается в определении перечня управляющих решений, принимаемых на таких рабочих местах, определении необходимой информационной базы и разработке алгоритмов и программного обеспечения, обеспечивающих принятие оптимальных управляющих решений. Принципиально это означает имитационное моделирование производственных процессов. Сложность решения данной задачи заключается в многообразии частных условий на однотипных рабочих местах. Например, невозможно составить единую модель, описывающую работу всех поездных диспетчеров (ДНЦ). Поэтому требуются глубокие исследования по созданию имитационных моделей работы ДНЦ и других оперативных работников в различных условиях. Выполнение таких исследований с решением задачи интеллектуализации рабочих мест оперативного управляющего персонала позволит в разы расширить зоны управления на таких рабочих местах. Например, на Российских железных дорогах сегодня имеется более 350 диспетчерских участков. В перспективе на основе интеллектуализации процессов управления их число может быть сокращено не менее чем в 3–4 раза. Это относится и к другим объектам оперативного управления во всех хозяйствах железнодорожного транспорта. Непрерывное имитационное моделирование перевозочного процесса обеспечит решение и такой важной задачи, как постоянное принятие оптимальных управляющих решений в каждой конкретной ситуации на всех уровнях управления с получением соответствующего экономического эффекта.

Что касается скоростей движения поездов, то максимальные их значения на традиционном железнодорожном транспорте вырастут, возможно, до 400–500 км/ч на высокоскоростных магистралях и до 120–150 км/ч в грузовом движении. Но есть одна область организации перевозок, где скорость доставки грузов должна вырасти в разы. Эта область — организация перевозок срочных (ценных) грузов. Создание и внедрение специальных технологий их перевозок основано на организации движения групповых поездов на протяженных направлениях с обменом групп вагонов со срочными (ценными) грузами на попутных технических станциях с согласованными по времени расписаниями прибытия и отправления групповых поездов со срочными грузами (модульная система грузовых перевозок [3]). На рис. 4 представлено направление «узел А» — «узел Г» с двумя попутными техническими станциями в узлах Б и В. Для каждого узла определены: точки прибытия и отправления поездов со срочными грузами, затраты време-

ни на технические операции с поездами и перецепку групп на попутных станциях $t_{гр} \approx 2,5$ ч. Эти затраты имеют место на всех станциях — $A_{от}$, а, б, в, г и $\Gamma_{пр}$, где $A_{от}$ — станция отправления груза, $\Gamma_{пр}$ — станция прибытия груза. При доставке срочных грузов от станции $A_{от}$ до станции $\Gamma_{пр}$ затраты времени включают в себя время следования по согласованным расписаниям от станции $A_{от}$ до станции $\Gamma_{пр}$ со скоростями движения поездов 50 км/ч на отрезках общего маршрута: $A_{от} — а$, $г — \Gamma_{пр}$ и 60 км/ч на отрезке $а — г$. Тогда время доставки срочных грузов на всем маршруте длиной 1795 км составит:

$$2,5 \cdot 4 + \frac{620 + 450 + 700}{60} + \frac{15 + 10}{50} = 40,0 \text{ ч.}$$

В этом случае скорость доставки срочных грузов составит 44,9 км/ч, или 1077 км/сут. При следовании срочных грузов в общих поездах с другими грузами среднесуточная скорость доставки может достичь 350–450 км/сут. Основные потери доставки срочных (ценных) грузов сегодня связаны с переработками составов на попутных технических станциях и накоплением составов. Технология групповых поездов с их следованием по согласованным расписаниям позволяет в 2–3 раза повысить скорость доставки срочных (ценных) грузов с их отправлением и прибытием в точно определенное время. Думается, что грузовладельцы в этом случае отдадут предпочтение в перевозке не автомобильному, а железнодорожному транспорту. Это особенно важно в условиях снижения перевозок угольных и нефтяных грузов в перспективе. Конечно, внедрение такой технологии требует соответствующих затрат на путевое развитие технических станций и скоростной подвижной состав.

Большие затраты несет железнодорожный транспорт на маневровую работу. Достигнут высокий уровень автоматизации процесса расформирования составов на сортировочных горках. Современные системы позволяют автоматизировать операции перевода стрелок, торможения отцепов, регулирования скорости роспуска составов. Однако одна из основных операций (расцепка вагонов) выполняется вручную, что сдерживает повышение скоростей и производительность труда при маневровой работе и требует тяжелой и опасной работы составителей поездов и их помощников.

Для автоматизации процесса расцепки вагонов требуется усовершенствовать конструкцию привода автосцепки так, чтобы взаимодействующее с ним напольное устройство было максимально простым. Это необходимо, т. к. такие напольные устройства должны устанавливаться не только на сортировочных горках большой и малой мощности, но и в тысячах других мест выполнения маневровой работы. Решение этой задачи обеспечит комплексную автоматизацию сортировочного процесса, снижение затрат на

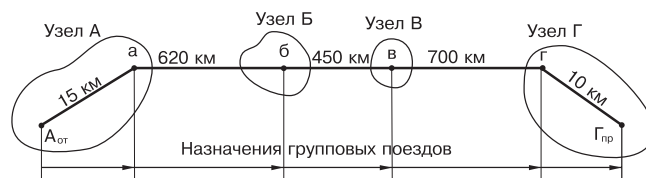


Рис. 4. Организация доставки срочных (ценных) грузов групповыми поездами на маршруте $A_{от} — \Gamma_{пр}$

Fig. 4. Delivery organization of urgent (valuable) goods by group trains in direction "node A" — "node Г"

маневровую работу. Для рассматриваемого периода прогноза решение данной задачи с заменой приводов автосцепных устройств на всем подвижном составе представляется вполне реальным.

Существенные резервы улучшения важнейших параметров имеются у тягового подвижного состава [4]. Использование новых типов тяговых приводов, увеличение осевой нагрузки позволяют улучшить тяговые характеристики и повысить тяговые свойства локомотивов. Внедрение прогрессивных систем тягового электроснабжения снизит потери при передаче электроэнергии к электровозам и электропоездам. Использование альтернативных силовых установок, альтернативных видов топлива и накопителей энергии повысит эффективность автономного тягового подвижного состава. Думается, что на основе массового внедрения многосистемных электровозов, а также перехода на укрупненных полигонах на единый род тока уйдут в прошлое такие понятия, как станции стыкования родов тока, а значит, и связанные с работой этих станций значительные экономические потери. Должен осуществиться переход к вождению соединенных поездов одной локомотивной бригадой.

У грузовых вагонов должна значительно снизиться масса тары на основе использования новых материалов, что позволит существенно увеличить статическую нагрузку вагонов. Грузовые вагоны будут оборудованы электропневматическими тормозами. Вагонный парк будет значительно более специализированным.

Принципиальным вопросом является развитие системы специализированных магистралей как для пассажирского, так и для грузового движения. Это важнейшая мера для значительного роста скоростей движения, экономии топливно-энергетических ресурсов, снижения расходов и повышения конкурентоспособности. Одним из направлений решения этой задачи является рост протяженности многопутных линий. Так, между Москвой и Санкт-Петербургом требуется иметь не менее 4-х главных путей, а на пригородных участках — не менее 6-ти главных путей со специализацией: два пути для обращения поездов ВСМ, два — для грузового движения и два — для пригородного движения.

Перечисленные перспективные технико-технологические решения, конечно, не исчерпывают всех мер. Но и они показывают сколь велики при достаточном инвестиционном обеспечении резервы Российских железных дорог по повышению их конкурентоспособности на транспортном рынке страны, а также в организации транзитных международных перевозок.

Железнодорожный транспорт должен усилить свои позиции как экологически чистый транспорт на основе снижения удельного энергопотребления на 1 т-км, 1 пассажиро-км снижения уровня шума, вибраций, повышения уровня безопасности. Его определение как «эко-дружественного транспорта» [15] должно получить еще большие основания.

Железные дороги будущего можно охарактеризовать примерно следующим образом [4]. Инфраструктура, подвижной состав будут иметь принципиально новый уровень надежности и эксплуатационного ресурса, что позволит осуществлять перевозки с минимумом затрат на различного вида ремонты с большими потерями в эксплуатационной работе. Полностью автоматизированный, высококачественный и всеобъемлющий процесс диагностики обеспечит исключение случаев нарушения безопасности движения. На основе имитационного моделирования производственных процессов на большинстве рабочих мест будут функционировать интеллектуальные системы управления, что обеспечит многократное расширение производственных зон обслуживания и полигонов управления перевозочным процессом. За счет дальнейшей контейнеризации перевозок, широкого внедрения согласованных специализированных расписаний движения поездов со срочными (ценными) грузами на железные дороги будут преимущественно переключены с автотранспорта перевозки срочных грузов, что существенно увеличит доходы железных дорог. Линии ВСМ с повышенными скоростями обеспечат основные перевозки по ним большинства пассажиров на маршрутах протяженностью до 1500–2000 км и более. Будут повышены скорости в пригородном движении. Основной объем пассажирских и грузовых перевозок будет осуществляться на специализированных пассажирских и грузовых магистралях, что обеспечит существенный рост производительности подвижного состава и инфраструктуры. Железнодорожный транспорт на основе снижения удельных затрат энергии, использования альтернативных видов топлива, повышения безопасности существенно повысит свои позиции в качестве экологически чистого транспорта. Решение всех этих задач вполне реально при организации тесного взаимодействия отраслевой и фундаментальной науки с инженерным составом практических работников железных дорог и железнодорожной промышленности.

Выводы. На основании изложенного можно сделать следующие выводы в части стратегического прогноза работы железных дорог.

1. Анализ развития российского и мирового железнодорожного транспорта показал, что его технико-технологическое состояние находится в непрерывном и быстром развитии. Железные дороги постоянно впитывают в себя важнейшие достижения мирового научно-технического прогресса, что позволяет им сохранять высокий уровень конкурентоспособности, несмотря на быстрое развитие других видов транспорта. Такая тенденция должна сохраниться и в перспективе.

2. Предложена методика выполнения стратегического прогнозирования развития железных дорог, основой которой является преимущественный учет в прогнозе технико-технологических решений, позволяющих в разы и на порядки повышать важнейшие параметры работы железнодорожного транспорта.

3. Разработана целевая модель технико-технологического состояния железнодорожного транспорта на перспективный период прогноза, показывающая большие возможности Российских железных дорог по сохранению и приумножению его роли в транспортной системе страны.

4. Стратегические прогнозы определяют основные тренды развития железных дорог, они должны являться важным инструментом при разработке долгосрочных и дальнесрочных прогнозов. Стратегические прогнозы следует разрабатывать как в целом для железнодорожного транспорта, так и для его важнейших составляющих — инфраструктуры, подвижного состава, организации перевозочного процесса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мишарин А.С. Генеральная схема — основа устойчивого развития железнодорожного транспорта // Железнодорожный транспорт. 2016. № 5. С. 11–14.
2. Пехтерев Ф.С. С учетом прогнозов социально-экономического развития страны // Железнодорожный транспорт. 2016. № 5. С. 15–19.
3. Мачерет Д.А., Измайкова А.В. Экономическая роль инноваций в долгосрочном развитии железнодорожного транспорта. М.: МИИТ, 2016. 162 с.
4. Сотников Е.А. Перспективный прогноз состояния железнодорожного транспорта // Железнодорожный транспорт 2017. № 9. С. 74–77.
5. Российский статистический сборник: стат. сб. / Росстат. М., 2016. 725 с.
6. Железнодорожный транспорт в СССР и за рубежом / ЦНИИТЭИ МПС. М., 1981. Вып. 12. 72 с.
7. Железнодорожный транспорт в СССР и за рубежом / ЦНИИТЭИ МПС. М., 1982. Вып. 13. 150 с.
8. Транспорт и связь в России: стат. сб. / Росстат. М., 2014. 112 с.
9. Российский статистический ежегодник: стат. сб. / Госкомстат. М., 2014. 1201 с.
10. Зарубежный транспорт. М.: Изд-во Академии наук СССР, 1960. 268 с.

11. Хачатуров Т. С. Экономика транспорта. М.: Изд-во Академии наук СССР, 1959. 587 с.
12. Зарубежный транспорт: сб. 1. М.: Изд-во Академии наук СССР, 1958. 300 с.
13. Зарубежный транспорт: сб. 2. М.: Изд-во Академии наук СССР, 1958. 368 с.
14. Загорский К. Я. Экономика транспорта. М.; Л.: Госиздат, 1930. 368 с.
15. Лapidус Б. М., Лapidус Л. В. Железнодорожный транспорт: философия будущего. М.: Прометей, 2015. 232 с.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

СОТНИКОВ Евгений Александрович,
д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник,
АО «ВНИИЖТ»

ШЕНФЕЛЬД Константин Петрович,
д-р техн. наук, исполнительный директор АО «ВНИИЖТ»

Статья поступила в редакцию 11.07.2017 г., принята к публикации 14.09.2017 г.

Strategic forecasting of complex production system — railway transport

E. A. SOTNIKOV, K. P. SHENFELD

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

Abstract. The paper considers conditions and methods for developing a strategic forecast for the technical and economic state of the worldwide and Russian railway transport for a period of 30–50 years or more. The analysis was made on changes in the state of infrastructure, rolling stock, organization of train traffic and shunting work, nature of the management of the transportation process from 1825 to the present. It is established that many quantitative and qualitative indicators of its technical and technological state have improved during this period many times and by orders of magnitude. This allowed the railway transport to ensure a high level of competitiveness in the transport system of the world, including our country, despite the emergence of all new modes of transport. At the same time, some such indicators are now close to the maximum possible and will not be able to grow rapidly in the future. It is accepted that in the development of strategic forecasts of the technical and technological state of complex (large) production systems, it is necessary to determine the most important parameters, which in the long term can be improved many times substantially, which in the complex system under consideration will achieve a significant reduction in costs, and even increase their competitiveness. The main trends in the development of railways for a strategic long-term period are determined, taking into account the support of the development of its technical and technological state for the achievements of fundamental and branch science. These trends take into account both known solutions, for example, HS operation and new solutions. The implementation of the proposals will allow the railways to achieve a reduction in unit costs (per unit of transport output), preserve and increase their competitiveness in the constantly developing transport market.

Keywords: railway transport; strategic forecast; 30–50 years; technical and technological solutions; achievement of scientific and technical progress; main development trends

DOI: <http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2017-76-5-255-265>

REFERENCES

1. Misharin A. S. *General'naya skhema — osnova ustoychivogo razvitiya zheleznodorozhnogo transporta* [General scheme is the basis for sustainable development of railway transport]. *Zheleznodorozhnyy transport*, 2016, no. 5, pp. 11–14.
2. Pekhterev F. S. *S uchetom prognozov sotsial'no-ekonomicheskogo razvitiya strany* [Taking into account the forecasts of

the country's socio-economic development]. *Zheleznodorozhnyy transport*, 2016, no. 5, pp. 15–19.

3. Macheret D. A., Izmaykova A. V. *Ekonomicheskaya rol' innovatsiy v dolgosrochnom razviti zheleznodorozhnogo transporta* [The economic role of innovation in the long-term development of rail transport]. Moscow, MIIT Publ., 2016, 162 p.

4. Sotnikov E. A. *Perspektivnyy prognoz sostoyaniya zheleznodorozhnogo transporta* [Perspective forecast of the state of railway transport]. *Zheleznodorozhnyy transport*, 2017, no. 9, pp. 74–77.

5. *Rossiyskiy statisticheskiy sbornik* [The Russian Statistical Collection]. Moscow, Rosstat Publ., 2016, 725 p.

6. *Zheleznodorozhnyy transport v SSSR i za rubezhom* [Railway transport in the USSR and abroad]. Moscow, TSNIITEI MPS, 1981, no. 12, 72 p.

7. *Zheleznodorozhnyy transport v SSSR i za rubezhom* [Railway transport in the USSR and abroad]. Moscow, TSNIITEI MPS, 1982, no. 13, 150 p.

8. *Transport i svyaz' v Rossii* [Transport and Communications in Russia]. Moscow, Rosstat Publ., 2014, 112 p.

9. *Rossiyskiy statisticheskiy ezhegodnik* [Russian Statistical Yearbook]. Moscow, Goskomstat, 2014, 1201 p.

10. *Zarubezhnyy transport* [Foreign transport]. Moscow, USSR Academy of Science Publ., 1960, 268 p.

11. Khachaturov T. S. *Ekonomika transporta* [Transport economics]. Moscow, USSR Academy of Science Publ., 1959, 587 p.

12. *Zarubezhnyy transport* [Foreign transport]. Coll. 1. Moscow, USSR Academy of Science Publ., 1958, 300 p.

13. *Zarubezhnyy transport* [Foreign transport]. Coll. 2. Moscow, USSR Academy of Science Publ., 1958, 368 p.

14. Zagorskiy K. Ya. *Ekonomika transporta* [Transport economics]. Moscow, Leningrad, State Publishing, 1930, 368 p.

15. Lapidus B. M., Lapidus L. V. *Zheleznodorozhnyy transport: filosofiya budushchego* [Railway transport: the philosophy of the future]. Moscow, Prometey Publ., 2015, 232 p.

ABOUT THE AUTHORS

Evgeniy A. SOTNIKOV,
Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief Researcher, JSC "VNIIZhT"

Konstantin P. SHENFELD,
Dr. Sci. (Eng.), Executive Director JSC "VNIIZhT"

Received 11.07.2017

Accepted 14.09.2017

■ E-mail: press@vniizht.ru (K. P. Shenfeld)

Новый алгоритм автоматизации электроснабжения тяговой сети переменного тока с постом секционирования на выключателях

Л. А. ГЕРМАН¹, А. Ю. ПОПОВ², А. В. САМОУКОВ², Д. В. ИШКИН², Д. В. ЯКУНИН³,
К. С. СУБХАНВЕРДИЕВ⁴

¹ Филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Самарский государственный университет путей сообщения» в городе Нижнем Новгороде (филиал СамГУПС в Нижнем Новгороде), Нижний Новгород, 603011, Россия

² Общество с ограниченной ответственностью «НИИЭФА-ЭНЕРГО» (ООО «НИИЭФА-ЭНЕРГО»), Санкт-Петербург, 196641, Россия

³ Арзамасская дистанция электроснабжения Горьковской дирекции по энергообеспечению — структурного подразделения «Трансэнерго» — филиала ОАО «РЖД», Арзамас, 607220, Россия

⁴ Проектно-изыскательский институт электрификации железных дорог и энергетических установок «Трансэлектропроект» — филиал АО «Росжелдорпроект» («Трансэлектропроект» — филиал АО «Росжелдорпроект»), Москва, 107140, Россия

Аннотация. В статье разобран принцип работы функций определения устойчивого (или проходящего) короткого замыкания в отключенной контактной сети и определения места повреждения, реализуемых в интеллектуальном терминале ИнТер и решающих вопрос выполнения быстродействующего автоматического повторного включения выключателей после аварийного их отключения, а также отыскания зоны повреждения без опробования изоляции контактной сети.

Разработан новый алгоритм автоматизации электроснабжения тяговой сети, обусловленный переносом функции определения проходящего (или устойчивого) короткого замыкания с тяговой подстанции на пост секционирования и позволяющий значительно снизить время восстановления напряжения в контактной сети.

Отмечается целесообразность применения новой схемы автоматизации совместно с постами секционирования на реклоузерах.

Ключевые слова: тяговая подстанция; пост секционирования; контактная сеть; переменный ток; АПВ; БАПВ; ИнТер; ОМП; реклоузер; проходящее короткое замыкание; устойчивое короткое замыкание

1. Пост секционирования контактной сети переменного тока с интеллектуальными терминалами ИнТер. Современный пост секционирования на выключателях отличается введением новых функций: определением устойчивого (проходящего) короткого замыкания (КЗ) в отключенной контактной сети и определением места повреждения [1].

Указанные функции пост секционирования приобрел в связи с включением на каждом выключателе питающей линии контактной сети интеллектуального терминала присоединений (далее — терминала) серии ИнТер (рис. 1). Разработчик и изготовитель поста секционирования и терминала ИнТер ООО «НИИЭФА-ЭНЕРГО» [2, 3]. При совместном применении этих функций, в частности после аварийного отключения

выключателя и определения места повреждения, решается вопрос о возможности повторного включения выключателя.

По каналам ТУ—ТС телемеханики информация от терминала ИнТер передается в диспетчерскую для принятия соответствующих мер по восстановлению напряжения (автоматически или оперативно энергодиспетчером).

Введение функции определения устойчивого (проходящего) КЗ стало возможным в связи с наличием в проектом варианте поста секционирования трансформаторов напряжения ТУ на каждой питающей линии контактной сети [2, 4].

Разберем принцип работы рассматриваемых функций [3, 5]:

а) Функция определения устойчивого (проходящего) КЗ в отключенной контактной сети по остаточному напряжению.

После аварийного отключения выключателя, питающего контактную сеть, на котором произошло КЗ, электровазы некоторое время (до 1,5–2 с) продолжают генерировать напряжение от асинхронной машины — фазорасщепителя «старых» электровазов (например, ВЛ-80С) или от асинхронных вспомогательных машин собственных нужд «новых» электровазов (например, 2ЭС5К, 3ЭС5К), рис. 2 [6, 7].

В последние годы в электровазах «Ермак» устанавливают дополнительно пусковой двигатель НБА55, работающий без нагрузки и выполняющий функции расщепителя фаз. Указанное увеличивает общую мощность асинхронной нагрузки.

Генерируемое напряжение асинхронных машин в режиме выбега называют остаточным. При работающих машинах его частота постепенно снижается: за 2 с до 47–46 Гц и ниже. Тем самым асинхронные

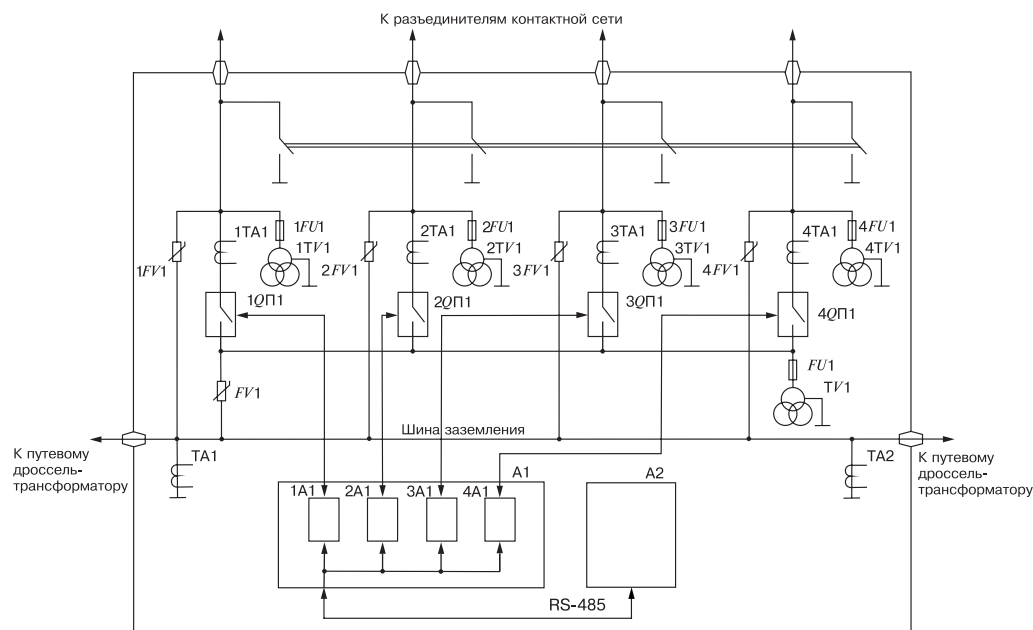


Рис. 1. Схема поста секционирования для двухпутных участков железных дорог ПСК-27,5 с терминалами ИнТер:
 1QП1–4QП1 — выключатель поста секционирования; 1ТА1–4ТА1, ТА1, ТА2 — трансформатор тока;
 1ТВ1–4ТВ1 — трансформатор напряжения; 1FV1–4FV1 — ограничитель перенапряжения; 1FU1–4FU1 — предохранитель;
 А1 — шкаф управления фидерами; А2 — шкаф телемеханики; 1А1–4А1 — терминал ИнТер
 Fig. 1. The layout of the sectioning point PSK-27.5 for double-track sections of the railways with smart terminals InTer:
 1QП1–4QП1 — switch of the sectioning point; 1ТА1–4ТА1, ТА1, ТА2 — current transformer; 1ТВ1–4ТВ1 — voltage transformer;
 1FV1–4FV1 — the overvoltage limiter; 1FU1–4FU1 — fuse; А1 — feeder control cabinet; А2 — telemechanics cabinet;
 1А1–4А1 — InTer terminals

машины генерируют напряжение частотой ниже 50 Гц. Обычно контролируется напряжение частотой 48–48,5 Гц, наличие которого определяет:

- отсутствие КЗ в контактной сети;
- отключение всех источников напряжения частотой 50 Гц на рассматриваемом участке контактной сети.

Общая мощность вспомогательных машин на электровазах переменного тока (мотор-вентиляторы, мотор-компрессоры) составляет до 7–10% от общей мощности тяговых двигателей при потреблении ими до 10% электроэнергии, затрачиваемой на тягу. Мощность фазорасщепителя соизмерима с мощностью вспомогательных машин. Таким образом, мощность асинхронных двигателей такова, что можно достаточно точно измерить остаточное напряжение с помощью трансформатора напряжения ТН-27,5 кВ, установленного в тяговой сети (например, у тяговой подстанции).

При устойчивом КЗ в любой точке тяговой сети систем 25 и 2×25 кВ указанное напряжение близко к нулю, так как сопротивление асинхронных двигателей электроваза на несколько порядков больше сопротивления тяговой сети [8]. Если остаточное напряжение близко к нулю, то это является условием необходимости блокировки автоматического повторного включения (АПВ).

Время быстродействующего автоматического повторного включения. Практика работы быстродействующего

АПВ (БАПВ) с временем 0,5 с на Горьковской железной дороге показала, что могут быть случаи повторного КЗ после срабатывания БАПВ (т. е. случаи неуспешного срабатывания БАПВ, по опыту эксплуатации их не более 5% от всех аварийных отключений). Это объясняется тем, что обычно остаточное напря-

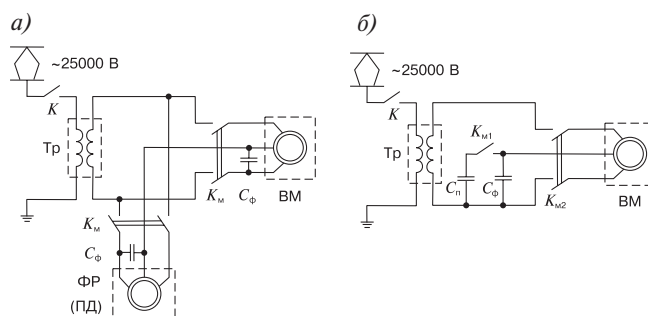


Рис. 2. Упрощенная схема питания вспомогательных машин (ВМ) переменного тока с вращающимся фазорасщепителем (ФР), пусковым двигателем (ПД) (а), со статическим конденсаторным расщепителем фаз (б): Тр — трансформатор; C_ϕ — симметрирующий конденсатор; C_n — пусковой конденсатор; К — главный выключатель электроваза; K_m , K_{m2} — пускатели асинхронных машин; K_{m1} — переключатель конденсаторов

Fig. 2. Simplified power supply scheme for auxiliary machines (AM) of alternating current with rotating phase splitter (PS), starting engine (SE) (a), with static capacitor phase splitter (б): Тр — transformer; C_ϕ — balancing condenser; C_n — starting capacitor; К — main switch of the locomotive; K_m , K_{m2} — starters of asynchronous machines; K_{m1} — the switch of condensers

жение не более 6–10 кВ, а при включении выключателя подается в контактную сеть напряжение 27,5 кВ. Анализ аварийных ситуаций показал, что в связи со спецификой процесса деионизации дуги в месте повреждения в тяговом электроснабжении с ростом времени бестоковой паузы в пределах от 0,5 до 2 с растет надежность повторного включения. При этом следует учесть особенности работы электрифицированного участка.

Для удержания схемы диодного электроподвижного состава (ЭПС) в тяговом режиме следует вводить БАПВ с временем задержки 0,5–0,7 с. Это требование распространяется на участки с тяжеловесным движением и с подъемами свыше 6‰ [5]. На равнинных участках с подъемами менее 6‰ в случае бестоковой паузы более 0,5–0,7 с схема ЭПС также будет разбираться и состав остановится, однако после остановки поезд самостоятельно, без вспомогательного электровоза, сможет продолжить движение. К сожалению, у ЭПС с выпрямительно-инверторным преобразователем (ВИП) даже при кратковременном исчезновении напряжения в контактной сети (0,2–0,3 с) система управления тиристорами теряет синхронизацию с сетью. Поэтому «удержание» ЭПС в тяговом режиме при БАПВ исключается. При этом в ряде публикаций (например, при испытаниях автоматической нейтральной вставки в контактной сети) утверждается необходимость модернизации схем электровоза для сохранения тягового режима ЭПС при кратковременных исчезновениях напряжения в контактной сети [9].

Если говорить об удержании схемы постов секционирования на разъединителях во включенном состоянии при аварийной обстановке на контактной сети, то здесь время БАПВ можно установить в пределах 0,5–2 с. В частности, при БАПВ в 2 с время «разбора» поста секционирования должно быть 2,5–3 с.

Таким образом, БАПВ следует выполнять с временем 0,5 с для удержания схемы диодных ЭПС в тяговом режиме на участках с подъемами более 6‰ на период аварийного процесса в тяговой сети. В остальных случаях БАПВ можно выполнять с повышенным временем — до 2 с. Как следствие указанного: на каждой межподстанционной зоне следует рассчитывать время задержки БАПВ в пределах 0,5–2 с.

Итак, особенностью функции определения устойчивого КЗ, основанной на остаточном напряжении, является кратковременность его действия, т. е. с его помощью можно формировать только быстродействующее АПВ (т. е. БАПВ с временем до 0,5–2 с) [5]. Для определения устойчивого (проходящего) КЗ через более длительный промежуток времени используют факт наличия наведенного напряжения в отключенной контактной сети.

б) Функция определения устойчивого (проходящего) КЗ в отключенной контактной сети по наведенному напряжению.

Наведенное напряжение в отключенной контактной сети формируется от контактной сети соседнего пути и (или) от линии ДПР. От контактной сети соседнего пути в системах электроснабжения 25 и 2×25 кВ наведенное напряжение составляет 3–5 кВ и более. При устойчивом КЗ наведенное напряжение электрического характера приближается к нулю. Что касается наведенного напряжения магнитного характера, то оно зависит от нагрузки контактной сети соседнего пути. Но в любом случае оно значительно меньше наведенного напряжения электрического характера.

Следует учесть особенности наведенного напряжения:

— при отключении КЗ в отключенной контактной сети раньше возникает остаточное напряжение от асинхронных машин ЭПС и только через 1,5–2 с после отключения собственных нужд электровоза, т. е. после исчезновения остаточного напряжения появляется наведенное напряжение [5]. Это обстоятельство ограничивает возможности наведенного напряжения в реализации БАПВ и применяется при АПВ с временем задержки более 2–3 с. Кроме того, наведенное напряжение успешно применяется при отыскании зоны повреждения без опробования изоляции контактной сети путем включения выключателей [5];

— в классической схеме защиты межподстанционной зоны, когда при КЗ отключается «четвертушка» межподстанционной зоны, для основного АПВ (АПВ-2) применяется контроль по наведенному напряжению, т. е. при устойчивом КЗ вводится блокировка АПВ на выключатели поста секционирования.

в) Функция определения места повреждения (ОМП) в контактной сети [3].

Эта функция была введена в работу, когда на питающей линии контактной сети поста секционирования Второво на скоростном участке Горьковской железной дороги установили специально подготовленный терминал ИнТер. Прошедшие за полгода короткие замыкания в контактной сети подтвердили необходимость выполнения требований [3] к настройке уставок ОМП, а именно: для большей точности определения места повреждения следует предварительно выполнить измерения в двух опытах короткого замыкания рассматриваемой межподстанционной зоны, которые загружаются в терминал ИнТер в качестве уставок ОМП. В соответствии с [3] в первом опыте КЗ для измерения параметров контактной сети при отсутствии тока на смежном пути рассчитываются сопротивление тяговой сети и угол сдвига фаз напряжения и тока. Во втором опыте КЗ при наличии тока смежного пути определяется коэффициент взаимного комплексного (реактивного) сопротивления смежных контактных проводов в двухпутном участке.

2. Существующий алгоритм автоматизации электроснабжения тяговой сети. В настоящее время автомати-

зация электроснабжения тяговой сети переменного тока с селективным способом работы релейной защиты в соответствии с нормативными документами выполнена следующим образом. При КЗ в любой точке контактной сети отключаются выключатели питающей линии контактной сети на тяговой подстанции $Q11$ и на посту секционирования $QП11$ (рис. 3). Далее по АПВ выключателя питающей линии контактной сети тяговой подстанции $Q11$ с нормированным временем 5–7 с происходит его включение при проходящем КЗ, и затем по встречному напряжению включается выключатель $QП11$ рассматриваемой питающей линии на посту секционирования по АПВ.

Другими словами, существующий алгоритм автоматизации электроснабжения тяговой сети на основании [10] для участков с постом секционирования на выключателях и с селективной защитой межподстанционной зоны представляет следующую последовательность действий:

- КЗ в тяговой сети;
- отключение от защиты «четвертушки» участка контактной сети межподстанционной зоны;
- включение по АПВ (5–7 с) выключателя $Q11$ на тяговой подстанции;
- включение выключателя $QП11$ на посту секционирования по встречному напряжению.

Таким образом, напряжение в контактной сети отсутствует 5–7 с. За это время разбирается схема тягового режима электровагона (например, ВЛ-80С). Это происходит через 1,5–2 с после снятия напряжения, так как фазорасщепитель теряет скорость и дает команду на отключение контакторов тяговых двигателей. Чтобы восстановить тяговый режим машинисту требуется не менее 1–2 мин. Если тяжеловесный состав идет по подъему свыше 6‰, то существует большая вероятность его остановки с известными последствиями прекращения движения поездов на участке [11].

Для предотвращения остановки движения поездов при аварийных ситуациях в тяговой сети используют терминал ИнТер, в котором введены функции определения проходящего (устойчивого) КЗ в отключенной контактной сети. В этом случае при проходящих КЗ вводится БАПВ с временем 0,5 с, и тогда схема тягового режима на электровагоне не успевает разобратся. Такие терминалы с указанными функциями успешно работают на участках Горьковской железной дороги и на некоторых других участках сети уже более 8 лет. Однако для реализации указанных функций требуется установка трансформатора напряжения у выключателя каждого присоединения питающей линии со стороны контактной сети. В проектом варианте такого трансформатора нет. Рассмотрим, что можно сделать в этой ситуации.

3. Новый алгоритм автоматизации электроснабжения тяговой сети. Предлагается следующий вариант автоматизации электроснабжения с переносом функций

определения проходящего (устойчивого) КЗ на пост секционирования. Как указано, посты секционирования изготавливаются с трансформаторами напряжения на каждую питающую линию контактной сети, поэтому с учетом установленных терминалов ИнТер реализовать новый алгоритм достаточно просто [12], и он заключается в следующем. При КЗ в любой точке питающей линии контактной сети отключаются выключатели на подстанции и на посту секционирования. Однако далее при проходящем КЗ работает БАПВ выключателя поста секционирования и происходит его включение с временем 0,5–0,7 с. Схема тягового режима электровагона не разбирается. Что касается выключателя питающей линии со стороны тяговой подстанции, то его схему АПВ выполняют зависимой и оно работает после получения сообщения по каналам телеуправления об успешном БАПВ на посту секционирования [14]. Остается рассмотреть вопрос, как выполнить АПВ питающей линии зависимым при успешной работе АПВ поста секционирования.

1. Совершенно ясно следующее: если установить трансформатор напряжения на питающей линии контактной сети тяговой подстанции, то вопрос решается элементарно. Но в этом случае монтаж трансформаторов напряжения на каждой питающей линии приведет к значительному удорожанию проекта.

2. Возможен другой вариант — оставить без изменения существующую схему АПВ питающей линии на тяговой подстанции, т. е. «слепое» АПВ с выдержкой 5–7 с. При этом требуемое сокращение времени отсутствия напряжения в контактной сети до 0,5–2 с в случае проходящих КЗ выполняется [12]. Однако при устойчивых КЗ выключатель подстанции повторно включается так же, как в существующих схемах.

3. Наиболее рациональным вариантом является реализация зависимого АПВ подстанции с использованием телемеханики.

Предлагаемый алгоритм работы поста секционирования контактной сети с БАПВ (рис. 4) следующий.

После аварийного отключения выключателя поста секционирования $QП11$, например, в результате ко-

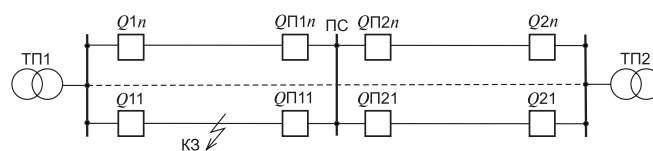


Рис. 3. Схема питания межподстанционной зоны: ТП1, ТП2 — тяговые подстанции 1 и 2; ПС — пост секционирования; $Q11...Q1n$, $Q21...Q2n$ — выключатели тяговых подстанций ТП1 и ТП2; $QП11...QП1n$, $QП21...QП2n$ — выключатели поста секционирования на участках ПС — ТП1 и ПС — ТП2

Fig. 3. Power supply scheme of the inter-substation zone: ТП1, ТП2 — traction substations 1 and 2; ПС — sectioning point; $Q11...Q1n$, $Q21...Q2n$ — switches of traction substations ТП1 and ТП2; $QП11...QП1n$, $QП21...QП2n$ — switches of the sectioning point in the sections ПС — ТП1 and ПС — ТП2

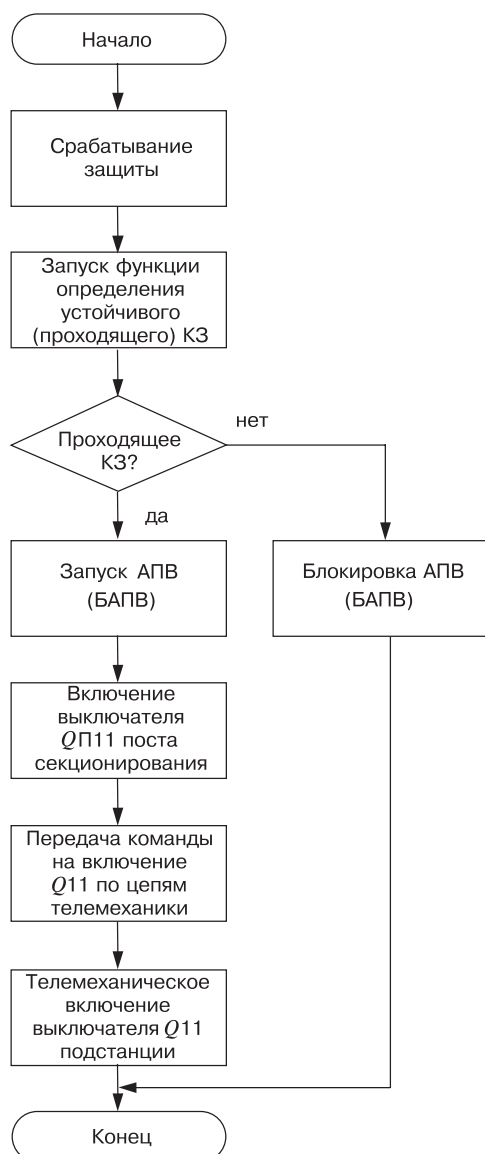


Рис. 4. Схема нового алгоритма автоматизации электроснабжения тяговой сети

Fig. 4. Scheme of a new algorithm for automation of power supply of a traction network

роткого замыкания на питающей линии контактной сети (см. рис. 3), реализуемого от защит терминала ИнТер-27,5-ФКС, происходит одновременное выполнение функций определения устойчивого (проходящего) КЗ в отключенной контактной сети как по остаточному напряжению, так и по наведенному напряжению, реализуемых в этом же терминале.

В случае проходящего КЗ БАПВ выключателя QП11, используемое вместо обычного АПВ 1-й степени, дает команду на его включение с минимально возможной выдержкой времени.

Время перерыва питания составит

$$t_{\text{пер}} = t_{\text{заш}} + (0,5 + 2) \text{ с},$$

где $t_{\text{заш}}$ — время защиты.

После включения выключателя QП11 поста секционирования по последовательному каналу связи (RS-485), предназначенному для телемеханики, от терминала ИнТер передается команда на включение выключателя Q11 подстанции.

В случае устойчивого короткого замыкания БАПВ команду на включение QП11 не дает, а выполняется АПВ 2-й степени, необходимое для резервирования работы алгоритма БАПВ.

После аварийного отключения выключателя измеряется остаточное напряжение, и если оно меньше 48,5 Гц и больше 800 В, то подается команда (БАПВ) один раз на включение выключателя [3]. Если частота более 48,5 Гц и напряжение меньше 800 В, то вводится запрет БАПВ.

Пост секционирования на однофазных реклоузерах 25 кВ. С разработкой и изготовлением однофазных реклоузеров ОР-27,5 (ЗАО «ГК «Таврида Электрик») на базе трехфазных реклоузеров 35 кВ [13] появилась возможность изготовить компактные посты секционирования контактной сети переменного тока. Реклоузер ОР-27,5 представляет собой единую конструкцию, куда входят вакуумный выключатель, трансформаторы тока и напряжения. Завод-изготовитель предлагает конструкции ОР-27,5 монтировать на опоре контактной сети. В любом случае, где бы не были смонтированы реклоузеры, применение ОР-27,5 приведет к упрощению схемы поста секционирования, уменьшению габаритных размеров и в целом к снижению его стоимости и текущих затрат на содержание. Целесообразно применение новой схемы автоматизации совместно с постами секционирования на реклоузерах. Пункты параллельного соединения контактной сети (ППС) также рекомендуется выполнять на реклоузерах.

Выводы. Новый алгоритм автоматизации электропитания контактной сети позволяет снизить перерыв питания контактной сети в аварийных ситуациях с 5–7 до 0,5–2 с. Для этого вводится БАПВ с задержкой 0,5–2 с на выключателе поста секционирования, устанавливается телемеханическая связь выключателей поста секционирования и тяговых подстанций, и по факту включения выключателя поста секционирования по БАПВ включается соответствующий аварийно отключенный выключатель на тяговой подстанции.

Для реализации нового алгоритма не требуются дополнительные капитальные затраты, так как по проекту трансформаторы напряжения ТН-27,5 кВ, используемые для БАПВ, должны быть установлены на каждой питающей линии контактной сети поста секционирования.

Предлагается на выключателе поста секционирования установить БАПВ с временем задержки 0,5–2 с и основное АПВ (2-я степень) с задержкой в 5–7 с с блокировкой по наведенному напряжению.

На равнинных участках с целью повышения надежности успешных БАПВ целесообразно поднять минимальное значение времени БАПВ с 0,5 до 1–2 с.

На участках с подъемами более 6‰ и с тяжеловесным движением следует установить минимальное значение времени БАПВ — 0,5–0,7 с.

Целесообразно разработать проект нового поста секционирования на однофазных реклоузерах 27,5 кВ с терминалами ИнТер и предлагаемым новым алгоритмом автоматизации тяговой сети.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пост секционирования контактной сети переменного тока: пат. на полезную модель № 160050 ФИПС Роспатент: МПК G01R 31/42 (2006.01) / Л.А. Герман [и др.]. Заявл. 28.10.2015; опубл. 27.02.2016. Бюл. № 6.
2. Посты секционирования и пункты параллельного соединения. Схемы и технические параметры / НИИЭФА-ЭНЕРГО. СПб.: Рекламное бюро «ДИО», 2011. 8 с.
3. Терминал интеллектуальный присоединений 27,5 кВ ИнТер-27,5-ФКС: руководство по эксплуатации АВ093-00-000-00 01 РЭ / НИИЭФА-ЭНЕРГО. СПб.: Рекламное бюро «ДИО», 2013. 21 с.
4. Марквардт К.Г. Энергоснабжение электрических железных дорог. М.: Транспорт, 1965. 464 с.
5. Герман Л.А., Герман В.Л. Автоматизация электроснабжения тяговой сети переменного тока: монография. М.: МИИТ, 2014. 173 с.
6. Малютин А.Ю. Применение маловентильных преобразователей в системе питания вспомогательных цепей электропоездов переменного тока: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03. М.: МГУПС, 2017. 24 с.
7. Малютин А.Ю. Состояние вопроса о вспомогательных машинах отечественных электропоездов переменного тока // Электроника и электрооборудование транспорта. 2016. № 6. С. 24–28.
8. Пупынин В.Н., Герман Л.А. Остаточное напряжение фидеров 27,5 кВ тяговых подстанций // Труды МИИТ. 1965. Вып. 213. С. 86–96.
9. Гончаренко В.П., Корниенко Д.В., Латманисов М.В. Опыт эксплуатации устройства прохождения нейтральной вставки на Красноярской железной дороге // Электрификация, инновационные технологии, скоростное и высокоскоростное движение на железнодорожном транспорте: материалы V Международного симпозиума «Элтранс-2009». СПб.: ПГУПС, 2010. С. 2009–2013.

10. Стандарт СТО РЖД 07.021.2–2015. Защита систем электроснабжения железных дорог от коротких замыканий и перегрузок. Ч. 2. Методика выбора алгоритмов действия, уставок блокировок и выбора времени автоматики в системе тягового электроснабжения. Утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 27.05.2015 г. № 1351р. 28 с.

11. Герман Л.А., Якунин Д.В., Фадеев А.И. Посты секционирования контактной сети переменного тока на разъединителях // Локомотив. 2013. № 5. С. 40–41.

12. Пост секционирования контактной сети переменного тока: пат. на полезную модель № 172099. ФИПС Роспатент: МПК G01R 31/42 (2006.01) / Л.А. Герман [и др.]; заявитель и патентообладатель Московский гос. ун-т путей сообщения Императора Николая II — МГУПС (МИИТ). № 2017105746; заявл. 21.02.2017; опубл. 28.06.2017. Бюл. № 19.

13. Герман Л.А., Максимова А.А. Интеллектуальная контактная сеть // Локомотив. 2014. № 10. С. 38–39.

14. Основы автоматики, автоматизация и телеуправление устройствами электроснабжения электрических железных дорог / под ред. Н.Д. Сухопрудского. М.: Транспорт, 1975. 352 с.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

ГЕРМАН Леонид Абрамович,
д-р техн. наук, профессор,
филиал СамГУПС в Нижнем Новгороде

ПОПОВ Александр Юрьевич,
первый заместитель генерального директора,
ООО «НИИЭФА-ЭНЕРГО»

САМОУКОВ Александр Викторович,
директор самостоятельного структурного подразделения,
ООО «НИИЭФА-ЭНЕРГО»

ИШКИН Дмитрий Валерьевич,
начальник отдела, ООО «НИИЭФА-ЭНЕРГО»

ЯКУНИН Денис Викторович,
главный инженер Арзамасской дистанции электроснабжения
Горьковской дирекции по энергообеспечению — структурного
подразделения «Трансэнерго» — филиала ОАО «РЖД»

СУБХАНВЕРДИЕВ Камилль Субханвердиевич,
инженер I категории, «Трансэлектропроект» —
филиал АО «Росжелдорпроект»

Статья поступила в редакцию 01.06.2017 г., актуализирована 10.08.2017 г., принята к публикации 22.08.2017 г.

A new algorithm for automating power supply of an AC traction network with a sectioning points on switches

L. A. GERMAN¹, A. Yu. POPOV², A. V. SAMORUKOV², D. V. ISHKIN³, D. V. YAKUNIN³, K. S. SUBKHANVERDIEV⁴

¹ Branch of the Federal State Budget Educational Institution of Higher Professional Education "Samara State Transport University" in the city of Nizhny Novgorod (a branch of the Samara State University of Railway Engineers (SamGUPS) in Nizhny Novgorod), Nizhny Novgorod, 603011, Russia

² Limited Liability Company "NII-EFA-ENERGO" (LLC "NII-EFA-ENERGO"), St. Petersburg, 196641, Russia

³ Arzamas power supply distance of the Gorkovskaya Directorate for Energy Supply — the structural division of the "Transenergo", branch of the JSC "Russian Railways", Arzamas, 607220, Russia

⁴ Design and survey institute of electrification of railways and power plants "Transelectroproject" — branch of the JSC "Roszheldorproject" ("Transelectroproject" — branch of JSC "Roszheldorproject"), Moscow, 107140, Russia

Abstract. The article considers modern sectioning points on the switches, which differs by the introduction of new functions for determining a stable (or passing) short circuit in the disconnected

contact network and determining the location of the damage, implemented in the IntTer smart terminal. These new functions are deciding whether to perform a quick automatic restart of the circuit

breakers after an emergency shutdown or finding the fault zone without testing the insulation of the contact network. The principle of operation of the functions under consideration is analyzed in the article. The limits of the optimum time of the current-free pause of the circuit breaker for automatic re-activation (AR) for each inter-substation zone are established.

The paper describes the existing algorithm for automating power supply of an AC traction network (the normal reclosing algorithm) and indicates the unfavorable consequences from its application, in particular, related to the long time of the absence of voltage in the contact network. It was noted that the decision to reduce the voltage recovery time performed by introducing the function of determining the passing (or stable) short-circuit in the switched-off contact network in traction substations is due to the cost of additional high-voltage equipment and requires a rethinking.

Thus, a new algorithm for automating the power supply of the traction network (the BAR algorithm) is presented, which is quite easily implemented at the modern sectioning post, which has voltage transformers for each supply line of the contact network, in contrast to the supply lines of the substation contact network and is caused by the transfer of the function of determining the passing (or steady) short circuit to the sectioning point. In the article, the issue of performing the automatic reclosure of the power line of the traction substation is considered dependent on the successful operation of the BAR algorithm of the sectioning point.

It is established that the most rational option is the implementation of a dependent automatic reclosing of a traction substation using telemechanics.

The authors analyze the possibility of manufacturing compact sections of the ac contact network on the basis of single-phase reclosers OR-27.5 kV. It is noted that it is advisable to use a new automation scheme in conjunction with the sectionalization points on reclosers.

Keywords: traction substation; sectioning point; contact network; alternating current; AR algorithm; BAR algorithm; InTer; EIS; recloser; passing short circuit; stable short circuit

DOI: <http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2017-76-5-266-272>

REFERENCES

1. German L. A., Korneev V. A., Popov D. S., Yakunin D. V. *Post sektionirovaniya kontaktnoy seti peremennogo toka*. Patent na poleznuyu model' № 160050 [Sectioning posts of the AC contact network: utility model patent no. 160050]. Moscow, Rospatent Publ., 2016 (in Russ.).
2. *Posty sektionirovaniya i punkty parallel'nogo soedineniya*. Skhemy i tekhnicheskie parametry. NIIIEFA-ENERGO [Sectioning posts and points of parallel connection. Schemes and technical parameters. NIIIEFA-ENERGO]. Moscow, Reklamnoe byuro "DIO" [Advertising bureau "DIO"] Publ., 2011, 8 p. (in Russ.).
3. *The smart connection terminal of 27.5 kV InTer-27.5-FKS*. Operating manual AV093-00-000-00 01 RE. NIIIEFA-ENERGO. Moscow, Reklamnoe byuro "DIO" [Advertising bureau "DIO"] Publ., 2013, 21 p. (in Russ.).
4. Markvardt K. G. *Energosnabzhenie elektricheskikh zheleznikh dorog* [Electric power supply of electric railways]. Moscow, Transport Publ., 1965, 464 p.
5. German L. A., German V. L. *Avtomatizatsiya elektrosnabzheniya tyagovoy seti peremennogo toka*. Monografiya [Automation of power supply of an AC traction network. Monograph]. Moscow, MIIT Publ., 2014, 173 p.
6. Malyutin A. Yu. *Primenenie maloventil'nykh preobrazovateley v sisteme pitaniya vspomogatel'nykh tsepey elektrovozov peremennogo toka*. Kand. tekhn. nauk diss. [The use of low-voltage

converters in the power supply system of auxiliary circuits of AC electric locomotives. Cand. tech. sci. diss.]. Moscow, MGUPS Publ., 2017, 24 p.

7. Malyutin A. Yu. *Sostoyanie voprosa o vspomogatel'nykh mashinakh otechestvennykh elektrovozov peremennogo toka* [The status of the issue of auxiliary machines of domestic AC electric locomotives]. Elektronika i elektrooborudovanie transporta [Electronics and electrical equipment of transport], 2016, no. 6, pp. 24–28.

8. Pupynin V. N., German L. A. *Ostatocnoye napryazhenie fiderov 27,5 kV tyagovykh podstantsiy*. Trudy MIIT [Residual voltage of 27.5 kV feeders of traction substations. Proc. of MIIT]. Moscow, 1965, no. 213, pp. 86–96.

9. Goncharenko V. P., Kornienko D. V., Latmanizov M. V. *Opyt ekspluatatsii ustroystva prokhozheniya neytral'noy vstavki na Krasnoyarskoy zheleznoy doroge* [Experience in operating the device for passing a neutral insert on the Krasnoyarsk railway]. Elektrifikatsiya, innovatsionnye tekhnologii, skorostnoye i vysokoskorostnoye dvizhenie na zheleznodorozhnom transporte. Materialy V Mezhdunarodnogo simpoziuma "Eltrans-2009" [Electrification, innovative technologies, high-speed traffic in railway transport. Proc. of the V International symposium "Eltrans-2009"]. St. Petersburg, PGUPS Publ., 2010, pp. 2009–2013.

10. Standard STO RZD 07.021.2–2015. *Protection of power supply systems of railways against short circuits and overloads. Part 2. Method of choosing action algorithms, blocking settings and timing of automation in the traction power supply system*. Approved by the order of the JSC "Russian Railways" of May 27, 2015, no. 1351r, 28 p. (in Russ.).

11. German L. A., Yakunin D. V., Fadeev A. I. *Posty sektionirovaniya kontaktnoy seti peremennogo toka na raz'edinitelyakh* [Sectioning posts of the AC contact network on the disconnectors]. Lokomotiv [Locomotive], 2013, no. 5, pp. 40–41.

12. German L. A., Subkhanverdiev K. S. *Sectioning posts of the AC contact network*. Utility model patent no. 172099. Moscow, Rospatent Publ., 2017 (in Russ.).

13. German L. A., Maksimova A. A. *Intellektual'naya kontakt-naya set'* [Smart contact network]. Lokomotiv [Locomotive], 2014, no. 10, pp. 38–39.

14. Sukhoprudskiy N. D. *Osnovy avtomatiki, avtomatizatsiya i teleupravlenie ustroystvami elektrosnabzheniya elektricheskikh zheleznikh dorog* [Fundamentals of automation, automatization and remote control devices for electrical power supply of electric railways]. Moscow, Transport Publ., 1975, 352 p.

ABOUT THE AUTHORS

Leonid A. GERMAN,

Dr. Sci. (Eng.), Professor, branch of the SamGUPS in Nizhny Novgorod

Aleksander Yu. POPOV,

First Deputy General Director of the LLC "NIIIEFA-ENERGO"

Aleksander V. SAMORUKOV,

Director of the autonomous division, LLC "NIIIEFA-ENERGO"

Dmitriy V. ISHKIN,

Head of the Department, LLC "NIIIEFA-ENERGO"

Denis V. YAKUNIN,

Chief Engineer of the Arzamas power supply distance of the Gorkovskaya Directorate for Energy Supply — the structural division of the "Transenergo", branch of the JSC "Russian Railways"

Kamil' S. SUBKHANVERDIEV,

1st category Engineer, "Transelectroproject" — branch of JSC "Roszheldorproject"

Received 01.06.2017

Revised 10.08.2017

Accepted 22.08.2017

■ E-mail: lagerman@mail.ru (L. A. German)

Исследование влияния параметров сервисного обслуживания на степень удовлетворенности пассажиров на базе применения аппарата нейронных сетей

С. С. ПАСТУХОВ, К. В. СТЕЛЬМАШЕНКО

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

Аннотация. На основе анализа преимуществ и недостатков различных методических подходов к поиску путей роста качества обслуживания, существующих в маркетинговой практике пассажирского комплекса, выявлена и обоснована необходимость дальнейшего развития таких робастных непараметрических механизмов построения прогнозных моделей оценки, которые бы могли применяться при ориентации менеджмента на реализацию нескольких направлений совершенствования обслуживания одновременно, а также позволяли бы эффективно принимать решения в условиях возможной синергии между многочисленными исследуемыми аспектами сервиса в их влиянии на уровень удовлетворенности клиентов.

Предложены методические и практические подходы к выявлению и сравнительной оценке влияния параметров сервисного обслуживания на уровень удовлетворенности пассажиров на основе моделирования с использованием аппарата нейронных сетей для условий, когда применение корреляционно-регрессионного анализа методом наименьших квадратов и механизмов порядковой логистической регрессии является прогностически неэффективным либо избыточно трудоемким в аналитической работе.

Изложены результаты апробации аппарата нейронных сетей на массивах маркетинговых данных, касающихся различных аспектов обслуживания пассажиров на вокзалах и в поездах, а также представлена оценка эффективности использования нейронных сетей в сравнении с алгоритмами порядковой логистической и линейной регрессии.

В итоге для получения максимума объективной информации, необходимой при выработке решений в области управления качеством транспортных услуг пассажирского комплекса, предложено использование новой модификации универсального комплексного механизма изучения влияния различных параметров сервиса на уровень удовлетворенности клиентов, включающей совокупность регрессионных алгоритмов, аппарат нейронных сетей, а также инструментарий непараметрической статистики.

Ключевые слова: пассажирский комплекс; транспортный сервис; качество обслуживания; анкетный опрос; экономико-статистические модели; нейронные сети

Актуальность исследования для менеджмента. В современных условиях функционирования транспортного рынка при неуклонно возрастающем уровне конкурентной борьбы исключительно важное значение в достижении успеха имеет развитие и совершен-

ствование процессов управления качеством транспортного обслуживания.

Обеспечение доступности и качества пассажирских перевозок в соответствии с социальными стандартами, а также повышение степени удовлетворенности потребителей за счет роста качества услуг при сохранении их конкурентоспособной стоимости являются одними из ключевых целей работы железнодорожного транспорта согласно положениям утвержденной в 2016 г. Стратегии управления качеством в холдинге «РЖД» [1].

В связи с этим продолжают оставаться чрезвычайно актуальными исследования, посвященные выявлению резервов роста качества услуг, в том числе на основе развития теории и практики пассажирского маркетинга, неотъемлемой частью которого, согласно [2, 3], являются вопросы изучения мнений клиентов об уровне транспортного обслуживания, а также совершенствование механизмов выявления и сравнения степени влияния различных параметров сервиса на удовлетворенность клиентов.

Развитие и текущее состояние методологии исследования качества обслуживания, обоснование необходимости ее дальнейшего развития. За последние 20 лет методология исследования качества обслуживания пассажиров в сфере железнодорожных перевозок на базе применения маркетингового подхода прошла длительный путь становления, основные вехи которого детально рассмотрены в [4, 5, 6, 7].

В настоящее время сформирован единый комплексный механизм изучения влияния параметров транспортного сервиса на уровень удовлетворенности пассажиров [7], развитие которого идет в направлении расширения внедрения экономико-статистических непараметрических (со сниженными требованиями к спецификации исходных данных) алгоритмов, которые бы давали возможность формировать удобные прогнозные модели для получения исчерпывающей информации, необходимой в принятии управленческих решений.

■ E-mail: pastuhovsergey@bk.ru (С. С. Пастухов)

В 2016 г. в [7] был представлен специализированный непараметрический робастный алгоритм изучения влияния различных составляющих процесса обслуживания на уровень удовлетворенности пассажиров на основе моделирования методами порядковой логистической регрессии (ПЛР), который позволяет проводить анализ для массивов данных, не подчиняющихся нормальному закону распределения, а также осуществлять необходимое в принятии управленческих решений прогнозирование, изучая как обособленное, так и совместное влияние параметров качества на общее впечатление от сервиса с учетом наличия возможных нелинейных зависимостей.

Тем не менее данный метод имеет определенный недостаток: при наличии синергетического эффекта во влиянии различных параметров качества на общий воспринимаемый пассажирами уровень обслуживания (т. е. когда совместное воздействие рассматриваемых предикторов на результирующую переменную выше, чем их обособленное влияние) для случаев, когда подразумевается использование большого количества исследуемых факторов, особенно если есть вероятность синергии выше третьего уровня вложенности (т. е. когда могут наблюдаться синергетический эффект для различных комбинаций более чем из трех факторов), трудоемкость аналитической работы при моделировании и сложность интерпретации получаемых в рамках ПЛР результатов существенно возрастают. Одна из ключевых проблем состоит в том, что статистической мощности теста Вальда не всегда хватает для определения значимости синергетического взаимодействия факторов, особенно при росте их количества в модели. При этом включение незначимых по тесту Вальда взаимодействий факторов может привести к переобучению модели, а исключение всех тех, для которых значимость не смогла быть выявлена, — к снижению эффективности прогнозирования.

Анализируя развитие методических подходов к оценке уровня восприятия клиентом качества транспортного обслуживания [4, 5, 8, 9, 10], можно выделить наличие явной тенденции роста количества оцениваемых в рамках маркетингового подхода управляемых параметров сервиса. Представляется, что неуклонное совершенствование процессов обслуживания клиентов (рост охвата контроля над параметрами предоставления существующих услуг и внедрение новых продуктов) будет постоянно требовать расширения количества оцениваемых в моделях факторов и приводить к необходимости обеспечения эффективных возможностей оценки их возможного синергетического влияния (как возрастания числа случаев синергии определенного уровня, так и углубления степени ее вложенности).

Таким образом, существует необходимость дальнейшего развития экономико-статистических мо-

делей на основе непараметрических робастных алгоритмов, которые бы, отличаясь сниженными требованиями к спецификации исходных данных, позволяли строить удобные и точные прогнозные модели в особых условиях оценки большого количества факторов сервиса при возможном наличии их синергетического влияния на уровень воспринимаемого клиентом качества в тех случаях, когда алгоритмы, основанные на ПЛР, могут терять эффективность или становятся излишне трудоемкими для проведения аналитической работы.

Перспективное направление развития методологии исследования, его преимущества и недостатки. Перспективной основой для развития алгоритмов исследования влияния параметров сервисного обслуживания на степень удовлетворенности клиентов может стать применение аппарата нейронных сетей (НС), механизм построения которых вместе с различными практическими вычислительными аспектами подробно освещается в [11, 12, 13, 14, 15].

Ключевыми преимуществами НС являются: универсальность и возможность эффективной работы на данных практически любого типа, а также то, что используемые в рамках данного метода алгоритмы обучения, ставящие во главу угла исключительно прогностическую эффективность, способны по умолчанию находить и выражать все возможные типы линейных и нелинейных зависимостей факторных и результирующих переменных, в том числе любые синергетические эффекты во влиянии любых сочетаний факторов на изучаемый отклик модели.

К недостаткам НС обычно относят: высокие требования к квалификации аналитика в области формирования архитектуры нейронных сетей, необходимость использования специального программного обеспечения, а также сложность сопоставления степени влияния предикторов на изучаемые результирующие переменные.

Тем не менее рассматривая сложность выявления степени влияния факторов, можно отметить, что выходом, так же как и в случае ПЛР, может стать использование механизма моделирования сдвига общего впечатления о степени предоставляемого сервиса при изменении уровней отдельных составляющих его параметров с последующим построением аналитических таблиц и визуализацией результатов в виде графиков «кумулят прогноза влияния факторов на воспринимаемое качество» (впервые предложенных и детально описанных в [7]).

Кроме того, специфика маркетинговых данных, используемых при исследовании качества, позволяет изначально определить многие ключевые параметры, что значительно упрощает аналитическую работу по формированию архитектуры НС. Так, в случае анализа результатов анкетных опросов, целесообразно

использование сети для обработки категориального отклика из 5–10 порядковых категорий на каждую изучаемую переменную с возможными нелинейными взаимосвязями предикторов, что позволяет сделать вывод о целесообразности использования следующих наиболее перспективных исходных параметров НС:

- с типом сети — многослойный персептрон (далее — МСП), который благодаря особенностям структуры сети и применяемому подходу к расчету синаптических весов, согласно [12], в меньшей степени чем радиальная базисная функция (РБФ) страдает от «проклятия размерности» и включения в модель факторов, оказывающих малозначимое влияние на результирующую переменную;

- с количеством нейронов на входном слое, равным произведению числа факторных переменных на количество используемых категорий в шкалах опроса (с учетом их наличия в изучаемом массиве данных) [11, 13];

- с одним скрытым слоем с сигмной функцией активации (преобразовывающей входные значения в диапазон от 0 до 1 и обеспечивающей слабое изменение производной на каждом из краев диапазона и сильное изменение в его середине), в качестве которой, согласно [13], наиболее целесообразно использование гиперболического тангенса, который, являясь нечетной функцией, ускоряет тренировку сети по сравнению с логистической функцией;

- с применением оптимизации функции ошибок на основе использования кросс-энтропии, использование которой, согласно [12, 15], в случае категориального отклика (т. к. клиент дает в опросе целочисленные оценки) обеспечивает лучшие результаты для поиска синоптических весов, чем использование оптимизации по сумме квадратов ошибок прогноза;

- с количеством нейронов на выходном слое, равным количеству категорий результирующей переменной с выбором функции «софт-макс» для активации выходного слоя (преимущества и использование которой в условиях оптимизации на основе кросс-энтропии описаны в [15]);

- с использованием алгоритма обратного распространения и метода сопряженных градиентов в качестве исходных инструментов оптимизации, что тем не менее не исключает использования других подходов, например, алгоритма Бройдена — Флетчера — Гольдфарба — Шанно и т. п. (описание инструментария оптимизации представлено в [11, 16, 17]).

Кроме того, аналитику в настоящее время часто вообще не приходится заниматься поиском оптимальной формы и тонкой настройкой параметров нейросетевой модели вручную, так как в рамках функционала прикладного программного обеспечения для нейросетевого проектирования уже разработано и реализовано большое количество автоматизированных

комплексных многоступенчатых алгоритмов поиска оптимальной структуры сетей. Здесь можно отметить как бесплатные программы, такие как язык статистических вычислений R, где доступны следующие реализации нейросетевых пакетов: «nnet», «FCNN4R» и «neuralnet» (различные аспекты работы с которыми изложены в [18, 19]), так и платные системы проведения математических и статистических расчетов, такие как Matlab [15], Statistica [12] и др.

Предлагаемый алгоритм использования аппарата НС при исследовании резервов роста качества услуг. Таким образом, в настоящее время нет существенных препятствий на пути применения НС, поэтому предлагается следующий алгоритм их использования для целей исследования влияния параметров сервисного обслуживания на степень удовлетворенности клиентов:

1. Разбить массив данных (содержащий 5–10-балльные оценки клиентов по отдельным параметрам сервиса и общему уровню качества) на две части: контрольную (от 10 до 15 %) и рабочую (от 90 до 85 %).

2. Для целей исключения переобучения НС разбить рабочую выборку на две части: обучающую и тестовую. При этом в зависимости от размера массива данных величину тестовой выборки целесообразно делать равной количеству наблюдений в контрольной выборке, либо не меньше половины от него.

3. Обучить и отобрать на основе эффективности результатов прогнозирования на данных обучающей тестовой выборки 5–10 перспективных вариантов архитектуры НС.

4. Сравнить эффективность полученных сетей на контрольной выборке и отобрать из них наиболее эффективную по следующим критериям прогностической эффективности: низкий уровень среднего модуля относительной ошибки прогнозирования и высокий процент верных прогнозов в разрезе категорий (соответствующие формулы расчета и их практическое применение представлено в [4, 5, 7, 20]). При близких показателях эффективности целесообразно отдать предпочтение сети с более простой архитектурой. При неудовлетворительных параметрах эффективности НС использовать механизмы ПЛР [7], либо непараметрический метод «сравнения проблем» [6].

5. При получении необходимого аналитику уровня прогностической эффективности НС сохранить параметры ее архитектуры для последующего прогнозного моделирования.

6. Создать новый массив данных факторных переменных на основе изменения оценок по параметрам сервиса в исходных маркетинговых данных и получить прогнозные значения общего уровня воспринимаемого клиентами качества на базе моделирования на основе применения НС, обученной на массиве исходных данных. Подходы к формированию массива

модельных данных, шагу изменений факторных величин и границам шкал для моделирования и оценки изменений (общего уровня удовлетворенности клиентов в результате роста или снижения различных составляющих процесса обслуживания) полностью аналогичны представленным в [7].

7. Провести сопоставление полученных в ходе прогностического моделирования оценок измененного уровня общей удовлетворенности клиента с его начальным значением. Механизмы формирования НС при этом дают возможность определения важных эффектов взаимодействия параметров сервиса на основе непосредственного сравнения величин общей удовлетворенности при изолированном и синергетическом воздействии одних и тех же факторов. В качестве удобных аналитических инструментов предлагается использовать:

- ряды отдельных факторов и их сочетаний, упорядоченные по величине разницы в значениях модельного (для выбранного шага изменений, например, +1 балл) уровня общей удовлетворенности клиентов по сравнению с исходным уровнем;

- построение графиков «кумулят прогноза влияния факторов на воспринимаемое качество».

Апробация предлагаемого алгоритма использования НС при исследовании резервов роста качества услуг. Для оценки перспектив использования аппарата НС была проведена двухэтапная апробация его работы на массивах маркетинговых данных, касающихся различных аспектов обслуживания пассажиров на вокзалах и в поездах, в сравнении с использованием линейных аддитивных моделей с применением корреляционно-регрессионного анализа методом наименьших квадратов (далее — МНК) и алгоритмов ПЛР.

На первом («аналитически-обобщающем») этапе использовались данные проведенного в мае-июне 2015 г. опроса (470 анкет) о качестве обслуживания при покупке билетов в кассах дальнего следования на Ярославском, Казанском и Ленинградском вокзалах, где пассажирам предлагалось оценить по 5-балльной шкале общий уровень качества обслуживания в кассе, а также 8 соответствующих ему параметров: чистота прикассовой зоны; время ожидания в очереди; доступность необходимой информации в кассовом зале; работа билетного кассира; внешний вид кассира (форменная одежда, опрятный вид); оперативность обслуживания; предоставление необходимой информации; вежливость и доброжелательность кассира.

Работа строилась следующим образом. Сначала было выделено 2 набора переменных:

- Основной (4 переменные): чистота прикассовой зоны; время ожидания в очереди; доступность необходимой информации в кассовом зале; работа билетного кассира.

- Расширенный (7 переменных с учетом детализации оценки работы кассира): чистота прикассовой зоны; время ожидания в очереди; доступность необходимой информации в кассовом зале; внешний вид кассира; оперативность обслуживания; предоставление необходимой информации; вежливость и доброжелательность кассира.

На основе использования генератора псевдослучайных чисел «Вихрь Мерсенна» (англ. Mersenne twister), алгоритм которого изложен в [21], отдельно для основного и расширенного набора было проведено разделение массива маркетинговых данных на 2 части в пропорции 7/3. Первая «исходная» подвыборка (70 % наблюдений) использовалась для настройки модели прогнозирования (МНК, ПЛР, НС) согласно установленным процедурам, а вторая «проверочная» (30 % наблюдений) применялась только для сравнения результатов работы используемых прогностических методов. В процессе анализа для каждого метода было проведено по 5 испытаний, в каждом из которых массив маркетинговых данных заново распределялся на подвыборки, после чего каждый раз происходила оптимизация моделей (МНК, ПЛР, НС) на исходной подвыборке и сопоставление их эффективности на проверочной согласно критериям (формулы даны в [4, 5, 7]):

- минимума среднего модуля относительной ошибки в процентах, часто называемого «средняя абсолютная ошибка прогноза», далее — MAPE (Mean Absolute Percentage Error);

- максимума доли верно классифицированных оценок результирующей переменной (далее — ПВК) в разрезе каждого из делений ее шкалы и в целом для всех наблюдений в проверочной подвыборке.

Для проведения обобщенного сравнения эффективности работы алгоритмов полученные по каждой из 5 выборок значения MAPE и ПВК усреднялись. На расширенном наборе переменных, кроме того, было проведено сравнение эффективности работы двух принципиально разных типов архитектуры НС: МСП и РБФ.

Полученные результаты (табл. 1) показывают, что в условиях малого количества оцениваемых факторов сервиса (для основного набора из 4 объясняющих переменных) использование ПЛР является более предпочтительным по критериям ПВК и MAPE. В то же время в расширенном наборе переменных (при росте количества оцениваемых факторов до 7) прогностическая эффективность НС на базе МСП начинает лидировать по эффективности ПВК и MAPE (без учета деления по категориям шкалы результирующей переменной), хотя ПЛР по-прежнему продолжает превосходить МСП при прогнозировании нижних категорий, крайне важных в дальнейшем поиске резервов роста качества. Что касается низкой эффективности

Таблица 1

Показатели эффективности работы прогностических моделей (МНК, ПЛР и НС) при оценке процедуры покупки билета в кассах дальнего следования (обобщенные результаты расчета на массиве 5 проверочных подвыборок)

Table 1

Indicators of the effectiveness of the work of forecasting models (MНК, PLR and NS) in evaluating the procedure for buying tickets at long-distance ticket offices (generalized results of calculation on an array of 5 test subsamples)

Набор переменных	Модель	ПБК, % (в разрезе делений шкалы результирующей переменной)					MAPE, % (все деления в целом)	
		1	2	3	4	5	ПБК, %	MAPE**, %
Основной	МНК	—*	50,0 %	27,3 %	88,4 %	78,4 %	79,6 %	6,27 % (9,24 %)
	НС: МСП	—	0,0 %	19,3 %	92,6 %	86,7 %	82,0 %	5,99 %
	ПЛР	—	66,7 %	47,3 %	90,9 %	91,0 %	86,2 %	4,16 %
Расширенный	МНК	—	40,0 %	22,4 %	90,2 %	62,9 %	77,4 %	5,63 % (8,75 %)
	НС: РБФ	—	0,0 %	0,0 %	96,9 %	68,9 %	80,2 %	6,21 %
	НС: МСП	—	0,0 %	66,7 %	96,6 %	98,4 %	92,9 %	2,64 %
	ПЛР	—	40,0 %	75,0 %	92,9 %	97,6 %	91,5 %	2,74 %

* Ни в одной из 5 проверочных подвыборок не встретилось значение общей оценки процедуры покупки билета, равное 1 баллу.

** Для МНК в скобках представлено значение MAPE без учета округления прогнозов.

Таблица 2

Результаты тестов проверки нормального закона распределения для регрессионных остатков МНК моделей оценки процедуры покупки билета в кассах дальнего следования (для каждой из 5 исходных подвыборок)

Table 2

The results of the normal distribution law check test for the regression residuals of the MNKs models for the evaluation of the ticket purchase procedure at the long-distance ticket offices (for each of the 5 original subsamples)

№ исп.	Вид теста*			
	Шапиро — Уилка	Андерсона — Дарлинга	Колмогорова — Смирнова с поправкой Лиллиефорса	Хорхе — Бера
1	$u = 0,9868$ $p = 0,0041$	$a = 1,646$ $p = 0,0003$	$z = 0,081$ $p < 0,0001$	$h = 6,9776$ $p = 0,0305$
2	$u = 0,9869$ $p = 0,0046$	$a = 1,9355$ $p < 0,0001$	$z = 0,0761$ $p < 0,0001$	$h = 2,1133$ $p = 0,3476$
3	$u = 0,9885$ $p < 0,0001$	$a = 1,7539$ $p < 0,0001$	$z = 0,0889$ $p < 0,0001$	$h = 0,6724$ $p = 0,0124$
4	$u = 0,9789$ $p < 0,0001$	$a = 2,836$ $p < 0,0001$	$z = 0,1156$ $p < 0,0001$	$h = 8,6242$ $p = 0,0134$
5	$u = 0,9889$ $p = 0,0134$	$a = 1,5716$ $p = 0,0005$	$z = 0,0722$ $p = 0,0003$	$h = 2,0812$ $p = 0,3532$

*Представлены значения полученных расчетных статистик и соответствующие им значения вероятностей (p). Значение p ниже 0,01 свидетельствует о значимом (с вероятностью выше 99 %) отклонении от закона нормального распределения.

МНК, то это во многом результат возникновения проблем со спецификацией модели из-за того, что характер исходных данных не позволил использовать стандартный инструментальный оптимальным образом. Ни в одном из 5 проведенных испытаний (табл. 2) регрессионные остатки МНК не прошли проверку на нормальность (формулы критериев изложены в [20, 22]). Учитывая более низкую, чем у ПЛР и МСП эф-

фективность (см. табл. 1), проведение других тестов на оптимальность использования МНК (гомоскедастичность, детерминированность регрессоров и т. д.) не потребовалось.

На втором («прикладном») этапе апробации были использованы данные опроса об оценке услуги предоставления prepaid набора питания в фирменных поездах для 1 квартала 2014 г. (836 анкет), в

Таблица 3

Показатели эффективности работы прогностических моделей ПЛР и МСП при оценке услуги предоставления пассажирам предоплаченного набора питания в фирменных поездах в 1 квартале 2014 г.

Table 3

Indicators of the effectiveness of the forecasting models of PLR and MSPs in assessing the provision of pre-paid meal offers for passengers in branded trains in first quarter of 2014

Тип выборки	Модель	ПВК, % (в разрезе делений шкалы результирующей переменной)					По всем делениям шкалы результирующей переменной	
		1*	2	3	4	5	ПВК, %	MAPE, %
Контрольная	МСП**	—	100,0 %	71,4 %	88,2 %	96,6 %	90,4 %	2,91 %
	ПЛР	—	50,0 %	64,3 %	88,2 %	93,1 %	87,2 %	3,73 %
	ПЛР-2ф***	—	0,0 %	57,1 %	88,2 %	94,8 %	86,4 %	4,51 %

* В полученной контрольной выборке данная категория не представлена.

** Параметры полученной на основе применения метода сопряженных градиентов оптимальной (по критерию функции ошибок на основе использования кросс-энтропии) архитектуры МСП: 41 входной нейрон, 7 скрытых нейронов с функцией активации «гиперболический тангенс», 5 выходных нейронов с функцией активации «софт-макс».

*** Модель ПЛР с учетом всех 2-факторных взаимодействий, для которых хотя бы по одному баллу шкалы была выявлена статистическая значимость по тесту Вальда.

рамках которого пассажирам предлагалось оценить по 5-балльной шкале общий уровень услуги предоплаченного питания, а также 8 характеризующих ее параметров: наличие полной информации о предоставляемых рационах питания; удобство времени приема рационов питания; ассортимент блюд; ассортимент напитков; вкус предложенных блюд; величина/размер порций; оперативность обслуживания; соотношение «качество питания — стоимость услуги».

Работа была организована следующим образом. На основе использования генератора псевдослучайных чисел «Вихрь Мерсенна» массив данных был случайным образом разделен на 3 выборки (70 % — обучающая, 15 % — тестовая, 15 % — контрольная). После чего производилось формирование моделей

МСП и ПЛР на данных обучающей и тестовой выборок, а окончательный вывод о сравнительной эффективности осуществлялся на основе сопоставления показателей MAPE и ПВК для прогнозов полученных моделей применительно к контрольной выборке. При этом рассматривалось 2 варианта модели ПЛР:

- с учетом изолирования влияния факторов;
- с учетом как изолированного влияния факторов, так и 2-факторных взаимодействий в случае их значимости, выявленной по тесту Вальда (формулы и прикладные аспекты использования представлены в [7, 20]), в т. ч. в случае частичной значимости, когда тест Вальда был значим не для всех уровней шкалы изучаемых совместно факторов.

Полученные на втором этапе апробации практические результаты работы ПЛР и МСП (табл. 3) полностью соответствуют теоретическим положениям, представленным в начале статьи, и свидетельствуют о высокой прогностической эффективности МСП. При этом можно сделать заключение, что включение в модель ПЛР факторных синергий, частично значимых по тесту Вальда, может приводить не к улучшению, а к ухудшению качества модели в результате переобучения, что выражается в снижении ПВК на контрольной выборке. Поэтому рекомендуется включать в ПЛР частично значимые по тесту Вальда синергии факторов только в случае отсутствия ухудшения прогностической эффективности на контрольной выборке.

Вывод. Полученные в ходе двухэтапной апробации на массиве маркетинговых данных об обслуживании клиентов на вокзалах и в поездах результаты сравнительной оценки моделей МНК, ПЛР и НС (МСП и РБФ) свидетельствуют об эффективности использования МСП в условиях одновременного изучения боль-



Универсальный комплексный механизм изучения влияния параметров транспортного сервиса на уровень удовлетворенности клиентов для целей управления качеством обслуживания
Universal comprehensive mechanism for studying the impact of transport service parameters on the level of customer satisfaction for the purposes of quality management

шого количества факторов с учетом их возможной синергии, что позволяет рассматривать представленный механизм получения аналитики для решения вопросов управления качеством на базе аппарата нейронных сетей как органичное дополнение и развитие комплекса применяемых в настоящее время исследовательских методов. Таким образом, рекомендуется применение следующей модификации универсального комплексного механизма изучения влияния различных параметров сервиса на уровень удовлетворенности клиентов для целей управления качеством обслуживания (см. рисунок).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стратегия управления качеством в холдинге «РЖД». Стратегия ОАО «РЖД» от 16.03.2016 № 224. Екатеринбург: УралЮрИздат, 2017. 112 с.
2. Мирошниченко О. Ф., Милевская В. А., Пастухов С. С. Информационные технологии в маркетинговых исследованиях пассажирских железнодорожных перевозок // Экономика железных дорог. 2007. № 8. С. 71–80.
3. Мирошниченко О. Ф., Милевская В. А., Пастухов С. С. Комплексная система маркетинговых исследований рынка пассажирских перевозок дальнего следования // Экономика железных дорог. 2008. № 3. С. 41–58.
4. Пастухов С. С. Разработка методов исследования качества транспортного обслуживания населения в сфере железнодорожных пассажирских перевозок дальнего следования: дис. ... канд. экон. наук: 08.00.05. М., 2011. 204 с.
5. Пастухов С. С. Определение приоритетов пассажиров при оценке качества и выявление наиболее эффективных направлений улучшения качества транспортной услуги и сопутствующего ей сервиса в фирменных поездах (методология и результаты) // Вестник ВНИИЖТ. 2008. № 1. С. 23–27.
6. Пастухов С. С. Определение приоритетных направлений улучшения качества транспортного обслуживания пассажиров в условиях неизвестности реального закона распределения изучаемых данных // Вестник ВНИИЖТ. 2009. № 2. С. 22–25.
7. Пастухов С. С. Изучение влияния параметров транспортного сервиса на уровень удовлетворенности пассажиров на основе моделирования методами порядковой логистической регрессии // Вестник ВНИИЖТ. 2016. Т. 75. № 2. С. 108–115.
8. Елизарьев Ю. В., Сенцова К. А. Оценка предпочтений потребителей транспортных услуг населению на рынке пассажирских перевозок // Экономика железных дорог. 2000. № 11. С. 28–32.

9. Сенцова К. А. Применение многофакторных моделей к изучению отношений потребителей транспортных услуг // Экономика железных дорог. 2000. № 10. С. 67–69.
10. Пастухов С. С. Определение основных путей повышения эффективности работы вагонов-ресторанов на основе маркетингового анализа // Вестник ВНИИЖТ. 2008. № 2. С. 42–47.
11. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс: пер. с англ. 2-е изд. М.: Вильямс, 2006. 1104 с.
12. Нейронные сети. Statistica Neural Networks: методология и технологии современного анализа данных / под ред. В. П. Боровикова. М.: Горячая линия — Телеком, 2008. 392 с.
13. Swingler K. Applying Neural Networks. A Practical Guide. London: Academic Press, 1996. 303 p.
14. Terrence L. F. Feedforward Neural Network. Methodology. New York: Springer, 1999. 340 p.
15. Hagan M. T., Demuth H. B., Beale M. H., De Jesús O. Neural Network Design. New York, 2014. 1012 p.
16. Nocedal J., Wright S. Numerical Optimization. 2nd edition. New York: Springer, 2006. 634 p.
17. Press W., Teukolsky S., Vetterling W., Flannery B. Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing. 3th ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. 1235 p.
18. Torgo L. Data Mining with R: Learning with Case Studies. 2nd ed. London: Taylor & Francis; Chapman and Hall, 2017. 426 p.
19. Lewis N. D. 92 Applied Predictive Modeling Techniques in R: With step by step instructions on how to build them FAST! North Charleston: CreateSpace Independent Publishing Platform, 2015. 598 p.
20. William H. Greene Econometric analysis. 7th ed. Upper Saddle River (NJ): Prentice Hall, 2012. 1232 p.
21. Matsumoto M., Nishimura T. Mersenne twister: A 623-dimensionally equidistributed uniform pseudorandom number generator // ACM Transactions on Modeling and Computer Simulations. 1998. No. 8 (1). P. 3–30.
22. Кобзарь А. И. Прикладная математическая статистика: для инженеров и научных работников. М.: Физматлит, 2006. 816 с.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

ПАСТУХОВ Сергей Сергеевич,

канд. экон. наук, ведущий научный сотрудник лаборатории «Экономика и маркетинг пассажирских перевозок», АО «ВНИИЖТ»

СТЕЛЬМАШЕНКО Константин Владимирович,

инженер лаборатории «Экономика и маркетинг пассажирских перевозок», АО «ВНИИЖТ»

Статья поступила в редакцию 18.07.2017 г., принята к публикации 21.09.2017 г.

Investigation of the impact of service parameters on the degree of passenger satisfaction based on the application of the apparatus of neural networks

S. S. PASTUKHOV, K. V. STEL'MASHENKO

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

Abstract. Based on the analysis of the advantages and disadvantages of various methodological approaches to the search for ways to increase the quality of service existing in the marketing practice of the passenger complex, the need for further development of such robust nonparametric mechanisms for constructing predictive va-

luation models has been identified and justified. These models could be used to guide management to implement several areas of service improvement at the same time, and also to make efficient decisions in the context of possible synergies between the multiple aspects of the service being investigated in their impact on customer satisfaction.

Methodical and practical approaches are proposed to identify and compare the effect of service parameters on the level of passenger satisfaction on the basis of modeling using the apparatus of neural networks for conditions where the application of least squares correlation and regression analysis and mechanisms of order logistic regression are prognostically inefficient or excessively time consuming for analytical work.

The approbation results of the apparatus of neural networks on sets of marketing data concerning various aspects of passenger service at stations and in trains are presented, as well as an estimation of the efficiency of using neural networks in comparison with the algorithms of ordinal logistic and linear regression.

As a result, in order to obtain the maximum of objective information necessary for developing solutions in the field of quality management of transport services of the passenger complex, it is proposed to use a new modification of the universal complex mechanism for studying the influence of various service parameters on the level of customer satisfaction, including a set of regression algorithms, the apparatus of neural networks and nonparametric statistics toolkit.

Keywords: passenger complex; transport service; quality of service; questionnaire survey; economic and statistical models; neural networks

DOI: <http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2017-76-5-273-280>

REFERENCES

1. *Quality management strategy in the holding "RZD"*. The strategy of Russian Railways of March 16, 2016, no. 224. Ekaterinburg, UralYurldat Publ., 2017, 112 p. (in Russ.).
2. Miroshnichenko O. F., Milevskaya V. A., Pastukhov S. S. *Informatsionnye tekhnologii v marketingovykh issledovaniyakh passazhirskikh zheleznodorozhnykh перевозок* [Information technologies in marketing researches of passenger railway transportations]. *Ekonomika zhelezných dorog*, 2007, no. 8, pp. 71–80.
3. Miroshnichenko O. F., Milevskaya V. A., Pastukhov S. S. *Kompleksnaya sistema marketingovykh issledovaniy rynka passazhirskikh перевозок dal'nego sledovaniya* [Complex system of market research of long-distance passenger transportation market]. *Ekonomika zhelezných dorog*, 2008, no. 3, pp. 41–58.
4. Pastukhov S. S. *Razrabotka metodov issledovaniya kachestva transportnogo obsluzhivaniya naseleniya v sfere zheleznodorozhnykh passazhirskikh перевозок dal'nego sledovaniya*. Kand. ekon. nauk diss. [Development of methods for studying the quality of public transport services in the field of long distance railway passenger transport. Cand ekon. sci. diss.]. Moscow, 2011, 204 p.
5. Pastukhov S. S. *Opredelenie prioritov passazhirov pri otsenke kachestva i vyavlenie naibolee effektivnykh napravleniy uluchsheniya kachestva transportnoy uslugi i soputstvuyushchego ey servisa v firmennykh poezdakh (metodologiya i rezul'taty)* [Determination of the priorities of passengers in assessing the quality and identifying the most effective ways to improve the quality of the transport service and the accompanying service in brand trains (methodology and results)]. *Vestnik VNIIZhT* [Vestnik of the Railway Research Institute], 2008, no. 1, pp. 23–27.
6. Pastukhov S. S. *Opredelenie prioritnykh napravleniy uluchsheniya kachestva transportnogo obsluzhivaniya passazhirov v usloviyakh neizvestnosti real'nogo zakona raspredeleniya izuchemykh dannykh* [Determination of priority directions for improving the quality of passenger transport services in conditions of unknown real distribution of the data under study]. *Vestnik VNIIZhT* [Vestnik of the Railway Research Institute], 2009, no. 2, pp. 22–25.
7. Pastukhov S. S. *Izuchenie vliyaniya parametrov transportnogo servisa na uroven' udovletvorennosti passazhirov na osnove*

modelirovaniya metodami poryadkovoy logisticheskoy regressii [Study of the influence of the parameters of the transport service on the level of passenger satisfaction on the basis of modeling by the methods of order logistic regression]. *Vestnik VNIIZhT* [Vestnik of the Railway Research Institute], 2016, Vol. 75, no. 2, pp. 108–115.

8. Elizar'ev Yu. V., Sentsova K. A. *Otsenka predpochteniy potrebiteley transportnykh uslug naseleniyu na rynke passazhirskikh перевозок* [Estimation of consumers preferences of transport services to the population in the market of passenger transportations]. *Ekonomika zhelezných dorog*, 2000, no. 11, pp. 28–32.

9. Sentsova K. A. *Primenenie mnogofaktornykh modeley k izucheniyu otnosheniy potrebiteley transportnykh uslug* [The use of multifactor models to study the relationship of consumers of transport services]. *Ekonomika zhelezných dorog*, 2000, no. 10, pp. 67–69.

10. Pastukhov S. S. *Opredelenie osnovnykh putey povysheniya effektivnosti raboty vagonov-restoranov na osnove marketingovogo analiza* [Determining the main ways to improve the efficiency of restaurant cars based on marketing analysis]. *Vestnik VNIIZhT* [Vestnik of the Railway Research Institute], 2008, no. 2, pp. 42–47.

11. Haykin S. *Neural Networks: A Comprehensive Foundation*. 2nd edition. Moscow, Williams Publ., 2006, 1104 p.

12. Borovikov V. P. *Neyronnye seti. STATISTICA Neural Networks: Metodologiya i tekhnologii sovremennogo analiza dannykh* [Neural networks. STATISTICA Neural Networks: Methodology and Technologies for Modern Data Analysis]. Moscow, Goryachaya liniya – Telekom Publ., 2008, 392 p.

13. Swinger K. *Applying Neural Networks: A Practical Guide*. London, Academic Press, 1996, 303 p.

14. Terrence L. F. *Feedforward Neural Network Methodology*. New York, Springer, 1999, 340 p.

15. Hagan M. T., Demuth H. B., Beale M. H., De Jesús O. *Neural Network Design*. New York, Martin T. Hagan and Howard B. Demuth, 2014, 1012 p.

16. Nocedal J., Wright S. *Numerical Optimization*. 2nd ed. New York, Springer, 2006, 634 p.

17. Press W., Teukolsky S., Vetterling W., Flannery B. *Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing*. 3rd ed. Cambridge, Cambridge University Press, 2007, 1235 p.

18. Torgo L. *Data Mining with R: Learning with Case Studies*. 2nd ed. Taylor & Francis; Chapman and Hall / CRC, 2017, 426 p.

19. Lewis N. D. *92 Applied Predictive Modeling Techniques in R: With step by step instructions on how to build them FAST!* Create Space Independent Publishing Platform, 2015, 598 p.

20. William H. Greene. *Econometric analysis*. 7th ed. Upper Saddle River (NJ), Prentice Hall, 2012, 1232 p.

21. Matsumoto M., Nishimura T. Mersenne twister: A 623-dimensionally equidistributed uniform pseudorandom number generator. *ACM Trans on Modeling and Computer Simulations*, 1998, no. 8 (1), pp. 3–30.

22. Kobzar' A. I. *Prikladnaya matematicheskaya statistika. Dlya inzhenerov i nauchnykh rabotnikov* [Applied mathematical statistics. For engineers and scientists]. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2006, 816 p.

ABOUT THE AUTHORS

Sergey S. PASTUKHOV,

Cand. Sci. (Econ.), Leading Researcher of the Laboratory "Economics and marketing of passenger service", JSC "VNIIZhT"

Konstantin V. STEL'MASHENKO,

Engineer of the the Laboratory "Economics and marketing of passenger service", JSC "VNIIZhT"

Received 18.07.2017

Accepted 21.09.2017

■ E-mail: pastuhovsergey@bk.ru (S. S. Pastukhov)

Опыт использования сейсмической регистрации вибраций от поездов для оценки состояния конструкций зданий и сооружений

Н. К. КАПУСТЯН^{1,2}, Г. Н. АНТОНОВСКАЯ², И. М. БАСАКИНА²

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта Российской академии наук (ИФЗ РАН), Москва, 123242, Россия

² Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. академика Н. П. Лаврова Российской академии наук (ФГБНУ ФИЦКИА РАН), Архангельск, 163000, Россия

Аннотация. Любой вид транспорта является источником колебаний, которые через грунтовую среду передаются на расположенные вблизи магистралей сооружения, вызывая их вибрацию, приводя к изменению как технического состояния зданий, так и к ухудшению комфортности пребывания в них людей. Действующие в настоящее время нормативы (ГОСТ Р 52892–2007) для основных типов зданий регламентируют допустимые уровни вибрации в нескольких частотных диапазонах. Для оценки опасности вибрации для конкретного сооружения этого недостаточно, т. к. практически не учитывается состояние сооружения. Это особенно важно для архитектурных памятников, оказавшихся вблизи железных дорог. Необходимо оценить создаваемые вибрацией дополнительные напряжения в теле объекта и соотнести их с расчетным сопротивлением материала конструкции. Для этого можно рассматривать вибрации от поездов как одну из разновидностей сейсмических воздействий, используя разработанные в строительстве методы оценки этого влияния.

Широкое использование математического моделирования, в первую очередь создание конечноэлементных расчетных моделей зданий, дает возможность оценить распределение статических и динамических нагрузок в теле сооружения и тем самым выявить наиболее опасные для целостности зоны.

Ключевые слова: движение поезда; вибрации; акселерограмма; спектр; состояние сооружения; свойства грунтов; расчет воздействий

Введение. Действующие в настоящее время нормативы [1] для основных типов зданий регламентируют допустимые уровни вибрации в нескольких частотных диапазонах. В ряде случаев, прежде всего для исторических сооружений или сильно поврежденных конструкций, требуется более детальный анализ, учитывающий возможность резонанса при совпадении частот воздействия и собственных частот здания [2, 3].

Колебания, создаваемые при движении железнодорожного состава, передаются в грунт. По мере удаления на различное расстояние от полотна они неравномерно затухают с расстоянием, так как являются совокупностью сейсмических волн разных типов — объемных и поверхностных, ослабевающих с расстоянием по разным законам. Уровень колебаний

в точке наблюдения определяется интерференцией волн, кроме того, существенны деформационные свойства системы «дорожное полотно — грунт — фундамент — наземная конструкция». К ним относятся: физико-механические свойства и строение грунтов, наличие подземных вод, состояние фундамента, его сочленения со зданием и пр. Все это может привести к усилению или снижению отклика на вибрационные воздействия [4]. Существующие в настоящее время методы оценки (в основном компьютерное моделирование) преобразования внешних воздействий при переходе волн из грунта в тело сооружения требуют задания ряда коэффициентов, описывающих физико-механические свойства всей системы, в том числе зоны контакта сооружения с грунтами основания и пр. Учитывая, что существует достаточно много моделей задания грунтов, которые трудно выбрать заранее, одним из основных путей получения достоверной информации является выполнение специальных экспериментальных сейсмометрических исследований, как, например [3, 4, 5].

Экспериментальное использование методики

Описание объекта. Проработка методики обследования, которая включает строительные расчеты и сейсмометрические наблюдения, проводилась авторами для Спасо-Прилуцкого Димитриево монастыря в г. Вологде. Объектом исследования являлась монастырская стена XVII в. (прясло) в аварийном состоянии с отклонением от вертикали и рядом трещин, в том числе кулисообразных (рис. 1). Вдоль перпендикулярной к ней стены протекает р. Вологда, а на расстоянии порядка 170 м от обследуемого прясла расположено активно эксплуатирующееся полотно Северной железной дороги (рис. 2).

Помимо фундаментальной задачи развития новой инженерно-сейсмометрической методики обследования сооружения, практической целью проведенных работ было выяснить причины разрушения стены монастыря и оценить вклад вибрации от транспорта в ухудшение ее состояния.

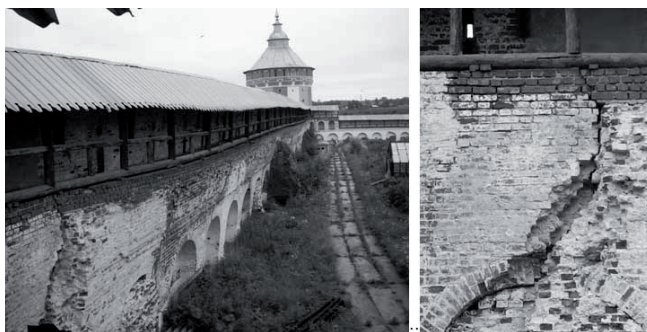


Рис. 1. Внешний вид прясла Спасо-Прилуцкого монастыря, г. Вологда

Fig. 1. A curtain wall of the Spaso-Prilutsk Monastery, Vologda



Рис. 2. Фото района проведения работ (<http://maps.google.ru/>)

Fig. 2. Photo of the work area (<http://maps.google.ru/>)

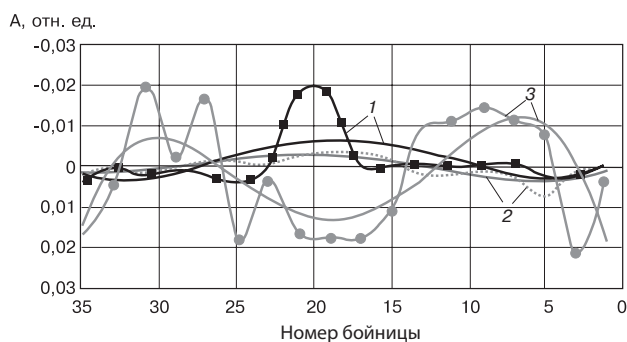


Рис. 3. Экспериментальные профили форм собственных колебаний на частотах: 1 — 0,58 Гц; 2 — 1,75 Гц; 3 — 3,5 Гц. Сплошные линии — полиномиальное сглаживание, прочие — профили форм колебаний по точкам наблюдения. Перемещения показаны в зависимости от номера бойницы (0–35), начиная от реки

Fig. 3. Experimental profiles of forms of own oscillations at frequencies: 1 — 0,58 Гц; 2 — 1,75 Гц; 3 — 3,5 Гц. Solid lines are polynomial smoothing, others are profiles of waveforms at observation points. The positioning is shown depending on the number of loopholes starting from the river

Комплекс обследования сооружения и грунтов основания включает ряд методик: инструментальные сейсмометрические наблюдения динамики объекта; малоглубинная сейсморазведка при обследовании грунтов оснований; задание расчетной схемы, расчет отклика модели на вибровоздействие. Наблюдения динамики сооружения выполнялись для оценки параметров, характеризующих движение точек объекта:

при собственных колебаниях и при различных внешних воздействиях [5–8], в данном случае — от поезда. Их определение является отображением состояния сооружения и необходимо для создания расчетной модели, наиболее приближенной к действительности. Такая модель дает возможность оценить вклад тех или иных воздействий на сооружение, в нашем случае — вибраций от железнодорожного транспорта, а также разработать те или иные реставрационные мероприятия.

При задании расчетной модели закладываются следующие параметры: геометрия сооружения, его конструктивная схема, способы закрепления в грунте и деформационные модули, прочностные характеристики стройматериалов, основные трещины и дефекты, статические нагрузки, действующие на сооружение.

Методика обследования и результаты проведения сейсмометрических исследований. Сейсмометрическая регистрация собственных колебаний и воздействий проводилась на прясле на верхнем уровне (галерее), в нижних бойницах и на грунте — вдоль стены, а также пройден профиль от железной дороги к стене и далее по территории монастыря. Применялось два типа сейсмометров: велосиметры СМ-3КВ (Россия) с портативной сейсмической станцией ADAS-3 (Россия) [9] и акселерометры CMG-5T фирмы Guralp (Великобритания) с регистратором GSR-24 фирмы GeoSIG (Швейцария) [10]. Наблюдения велись по компонентам X , Y , Z , ориентация горизонтальных компонент — вдоль и поперек стены соответственно. Длина прясла составляет 140 м, датчики ставились на галерею практически у каждой бойницы, т. е. с шагом 3,5 м. На полученных записях микросейсм интерпретировались собственные колебания стены и записи проходящих поездов (пассажирских, грузовых).

В соответствии с методикой анализа собственных колебаний [10, 11] в каждой точке наблюдений для каждой из частот были определены амплитуды и фазы колебаний и построены экспериментальные профили форм собственных колебаний (рис. 3). Эти кривые являются исходными для выбора модели из совокупности расчетных моделей, наиболее полно соответствующей эксперименту.

Анализ графиков, приведенных на рис. 3, показывает следующее:

- наблюдаются ненулевые перемещения конструкции в точках у башен (1 и 35 бойницы), причем наибольшие — для частоты 3,5 Гц, т. е. не для первых форм. Это говорит о том, что «раскрепление» прясла от башен не доходит до низа стены, что также соответствует видимым трещинам;

- формы колебаний имеют более изрезанный вид в левой части графика (бойницы 20–35), чем в правой (1–19), что говорит о большей целостности правой части прясла;

— на первой из наблюдаемой форм (частота 0,58 Гц) отчетливо просматриваются ворота, заложенные в настоящее время кирпичом (по признаку ослабления конструкции и возможности ей совершать большие перемещения).

Измерения воздействия вибраций от железнодорожного транспорта производились акселерометрами для получения реальной акселерограммы, которая затем задается в расчетную модель для определения дополнительных нагрузок при динамических воздействиях транспорта. Датчики колебаний устанавливались на прясле и на грунте. Анализ записей включает выявление природы сейсмических волн, возбуждаемых поездом. Во-первых, тип волны можно определить по траектории движения частиц грунта, второй признак — закон ослабления амплитуды сейсмических волн по мере удаления от источника. Для собственных частот колебаний стены 1,75 и 3,5 Гц выявлено следующее:

— вблизи источника (у железнодорожной насыпи) наблюдается смесь объемных и поверхностных волн, при удалении от него — в основном поверхностные волны, что подтверждается малым ослаблением амплитуды с расстоянием;

— на частоте 1,75 Гц возбуждение вибраций, по-видимому, осуществляется горизонтальными воздействиями поезда на насыпь, на 3,5 Гц — вертикальными.

Обсуждение результатов. Рассмотрим более подробно, как реагируют участки стены на вибрации от поезда (рис. 4). Из рис. 4, а видно, что при прохождении поезда спектры мощности ускорений колебаний стены существенно различаются в ее верхних и в нижних частях.

В верхней части прясла нарастание амплитуд в соответствующем диапазоне частот указывает на большую «разбитость» (больше трещин и частоты ниже, т. е. трещины длиннее). Отношение спектров колебаний, записанных вверху и внизу стены (рис. 4, б), позволяют оценить частотные свойства конструкции — резонансные явления, ослабление колебаний и пр. Для центральной части стены резонансные частоты ниже, чем для краевой части (наблюдается усиление колебаний в диапазоне 3–4 Гц и ослабление на частотах 5–7 Гц). На рис. 5 показаны пространственные распределения ускорений колебаний в нижней части стены при воздействии микросейсм и вибрации от поезда для одной из собственных частот (1,75 Гц). В этом случае усиление мощности вибрации при прохождении поезда относительно уровня микросейсм получается больше — примерно в 200 раз, тем не менее абсолютные величины воздействий крайне малые — до $10^{-3} g$ (или 10^{-2} м/с^2), т. е. менее 2 баллов по шкале MSK-64. Амплитуды воздействий вдоль стены в горизонтальной плоскости изменяются мало, поэтому в расчете можно принять одинаковые жесткости закрепления в грунте. Ускорения по вертикали (и, следовательно, перемеще-

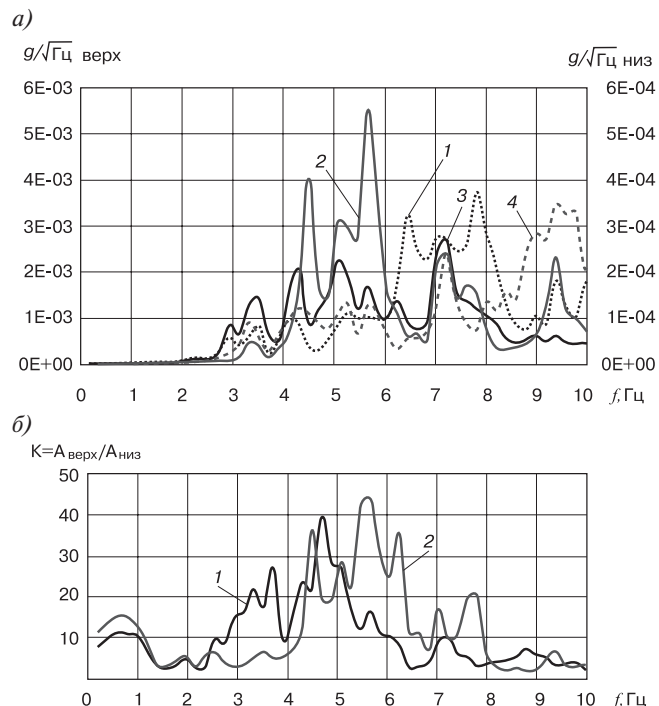


Рис. 4. Спектры мощности ускорений колебаний стены при прохождении поезда (а) и отношение спектров мощности верхней части стены к нижней (б) для поперечных компонент: 1 — центральная часть стены; 2 — край стены; 3 — верхняя часть стены; 4 — нижняя часть стены

Fig. 4. Power spectrum of wall vibrations acceleration when passing a train (а) and the ratio of the power spectrum of the upper part of the wall to the bottom (б) for the transverse components: 1 — the central part of the wall; 2 — edge of the wall; 3 — the upper part of the wall; 4 — lower part of the wall

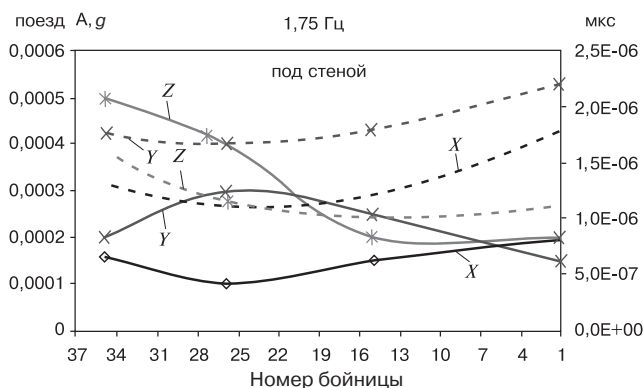


Рис. 5. Ускорения колебаний (в единицах g) в нижней части стены при воздействии микросейсм (пунктир) и при вибрации от поезда (сплошная), компоненты регистрации X, Y, Z, частота 1,75 Гц; вертикальные шкалы: правая — для микросейсм, левая — для колебаний от поезда

Fig. 5. Acceleration of oscillation (in units of g) in the lower part of the wall under the action of microseisms (dotted lines) and vibration from the train (solid), registration components X, Y, Z, frequency 1.75 Hz; vertical scales: right — for microseism, left — for oscillations from a train

ния) у левой башни примерно в два раза больше, чем у правой, что совпадает с предыдущим результатом и указывает на «оторванность» башни от прясла.

Типичная 3-компонентная акселерограмма, которая закладывалась в динамический расчет, и спектры мощности колебаний стены при прохождении поезда представлены на рис. 6.

Результаты инструментальных наблюдений определяют собственные частоты и формы колебаний прясла, отражающие его реальное состояние, что существенно для сопоставления и верификации расчетной модели. Еще одним важным параметром является связь сооружения с основанием, что определяется параметрами грунта.

Строение и свойства грунтового массива по данным малоглубинной сейсморазведки. Обследование грунтового массива проводилось с применением малоглубинной сейсморазведки методом преломленных волн (МПВ) по ряду профилей (рис. 7).

Первая преломляющая граница (средняя скорость от 400 до 500 м/с) отделяет техногенный слой и пески, она имеет ярко выраженный наклон к реке. Было получено пространственное распределение параметров

грунтов основания, существенных для задания в расчетной модели закрепления прясла в грунте: скорости продольных (V_p) и поперечных волн (V_s) для деформируемого слоя. Величины V_s были определены путем выделения на записях поверхностных волн, оценки их кажущейся скорости (V_R) и использования известного соотношения $V_R = 0,9V_s$. Отметим, что низкие скорости V_s характеризуют легкодеформируемый грунт. Последнее отражается в увеличении амплитуд колебаний сооружения при сейсмических (вибрационных) воздействиях, например, от железной дороги. Увеличение мощности низкоскоростных слоев дает возможность развития большей осадки сооружения. На рис. 8 представлены вариации скорости V_p по профилям вдоль стены: внутри монастыря и снаружи. Анализ результатов сейсморазведки показывает следующее. Мощность верхнего низкоскоростного культурного слоя увеличивается в сторону реки, что отражает геологию речной долины. В центральной части сооружения, в том числе под заложенными кирпичом воротами, мощность слоя также большая, чем по бокам, что, возможно, является следом «продавленной» дороги, над которой «нарос» низкоскоростной культурный слой. Средние скорости V_p с внутренней и внешней сторон стены различны, что обосновывает возможность крена стены.

Средние скорости V_p для внутренней стороны прясла указывают на более слабые грунты, причем наиболее явно — в левой части и вблизи погребенной дороги. Таким образом, с внутренней стороны прясла грунты более «слабые» по деформационным свойствам и можно ожидать большей осадки внутренней стороны стены. Вскрытие шурфа дало литологию слоев — это водонасыщенные пески и суглинки, техногенные отложения с песками и супесями, песчано-обломочные грунты. По отношениям V_s/V_p значения 0,3...0,6 соответствуют супесям и суглинкам, а 0,55...0,68 — пескам с галечником.

Наиболее полно методика расчета деформационно-прочностных характеристик грунтов описана в [4], где также для разных грунтов даны эмпирические соотношения между модулем деформации $E_{\text{деф}}$ и скоростями V_p , V_s , использованные в расчетах. Учитывая, что деформируемая толща под стеной может быть достаточно велика (до 10 м), по данным метода преломленных волн были рассчитаны средние скорости и интервал изменений $E_{\text{деф,ср}} = 17$ МПа, при вариациях значений $E_{\text{деф}} = 6–22$ МПа. При учете мощности деформируемого слоя получаем $E_{\text{деф}} = 59–80$ МПа.

Воспользовавшись эмпирическими соотношениями между $E_{\text{деф}}$ и E_d — динамическим модулем упругости [4], получаем возможные вариации $E_d = 20–1000$ МПа. Соотношение статического E_0 и динамического E_d модулей Юнга $E_d = 0,8E_0$ дает $E_0 = 25–1250$ МПа. Приведенная оценка показывает,

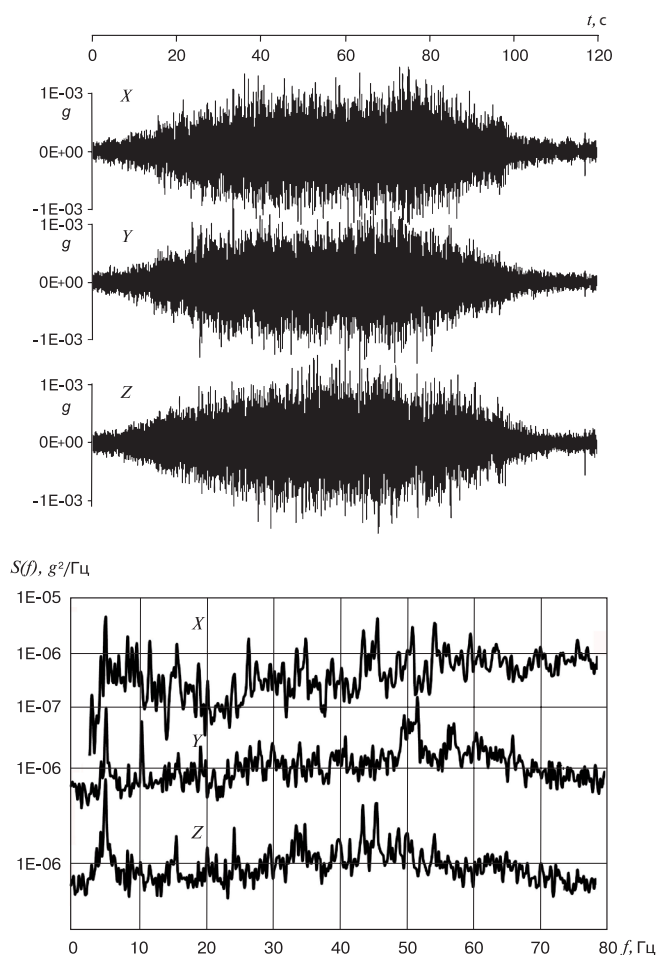


Рис. 6. Акселерограммы на грунте (вверху) и соответствующие им спектры мощности вибрации (внизу) от поезда по компонентам X, Y, Z

Fig. 6. Accelerograms on the ground (above) and the corresponding vibration power spectra (bottom) of the train along the components X, Y, Z

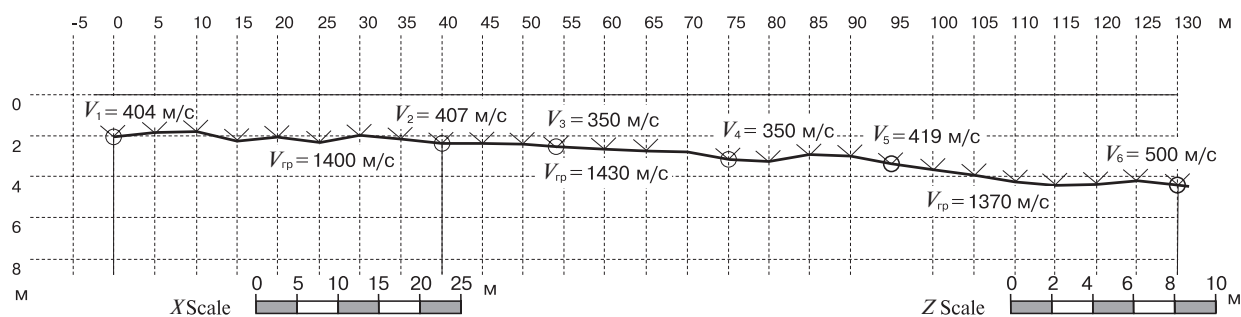


Рис. 7. Сейсмический разрез вдоль стены. По оси абсцисс — расстояние, м; по оси ординат — глубина, м; V_1-V_6 — средние скорости продольных волн в верхнем слое разреза; V_{rp} — граничная скорость преломленной волны на границе раздела двух сред

Fig. 7. Seismic cut along the wall. The abscissa is the distance, m; ordinate — depth, m; V_1-V_6 — average speeds of longitudinal waves in the upper layer of the cut; V_{rp} is the boundary speed of the refracted wave at the interface between the two media

что даже небольшое изменение скоростных свойств грунтов за счет обводнения может изменить их несущую способность до двух порядков.

Подбор расчетной модели осуществлялся в два этапа: сначала по материалам обмеров задавалась упрощенная модель, а затем более детальная. Принятые в расчете характеристики каменной кладки по СНиП II-22-81* [12]: $R_u = 0,9$ МПа — расчетное сопротивление сжатию; $R_t = 0,16$ МПа — расчетное сопротивление растяжению при изгибе по перевязанному сечению; $\alpha = 1000$ — упругая характеристика кладки; $E_0 = R_u \alpha = 900$ МПа — начальный модуль упругости; $E = 0,8E_0 = 720$ МПа — модуль упругости при определении периода собственных колебаний; $E = 0,5E_0 = 450$ МПа — модуль упругости при расчете по прочности; $G = 0,4E_0 = 360$ МПа — модуль сдвига; $\nu_n = 2,2$ — коэффициент ползучести; $\nu = 0,22$ — коэффициент поперечной деформации.

Подбор характеристик основания в модели уместно рассмотреть совместно с решением статической задачи, которая дает возможность оценить поля напряжений в теле объекта. Основной нагрузкой является вес сооружения. Мерой правильности подбора расчетной модели является совпадение значений собственных частот — расчетных и наблюдаемых, а также профилей перемещений точек тела при его собственных колебаниях. Расчет динамической задачи с применением вибрационных воздействий показывает, какие величины напряжений добавляют эти воздействия к уже имеющимся статическим. Суммарное напряжение сравнивается с расчетным сопротивлением материала, тем самым судят об опасности вибраций.

Современное состояние прясла — наклон, изгиб в средней части и пр., показывает, что изначально правильная конструкция претерпевала изменения, причем именно вследствие статических нагрузок. По опыту строительства [13] наиболее вероятной причиной современного состояния прясла является ослабление фундамента или нарушение свойств грунта основания. Мы попробовали смоделировать ситуа-

цию, приведшую прясло в современное состояние. Моделирование велось для упрощенной модели прясла, с внешней стороны стены задавались относительно плотные грунты (податливость основания по вертикали и горизонтали соответственно ($C_1 = 2$ МПа, $C_2 = 10$ МПа), а внутри — очень слабые, например, обводненные ($C_1 = 0,01$ МПа, $C_2 = 0,05$ МПа). Решение статической задачи дает правдоподобную картину: стена наклонилась в «нужном» направлении, причем на достаточно большой градус (2°). По существу, мы задали очень слабые грунты внутри стены для того, чтобы не рассматривать процесс ее деформирования во времени и достижения современного состояния наклона. Появление тангенциальных напряжений объясняет возникновение трещин вблизи башен, наблюдаемых сейчас.

Для более детальной модели с учетом башен при решении статической задачи была принята единая модель грунта для всего основания со следующими характеристиками: осредненный модуль упругости $E = 17$ МПа и коэффициент Пуассона грунта $\nu = 0,32$. В качестве основания в расчетной модели было выбрано упругое основание по Пастернаку, характеризующееся двумя коэффициентами постели

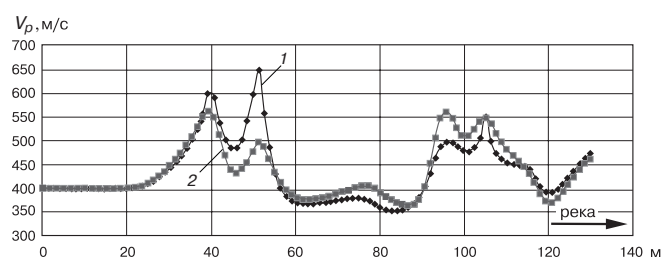


Рис. 8. Вариации скорости продольных волн (V_p) по профилям вдоль стены в сторону реки (внутри монастыря и снаружи): по оси X — расстояние, м; 1 — вариации скорости V_p с внутренней стороны стены монастыря; 2 — вариации скорости V_p с внешней стороны стены монастыря

Fig. 8. Variations in the speed of longitudinal waves (V_p) in profiles along the wall towards the river (inside the monastery and outside): along the X axis — distance, m; 1 — variations of the V_p speed from the inside of the monastery wall; 2 — variations of the V_p speed from the outside of the monastery wall

(податливость основания по вертикали и по горизонтали):

$$C_1 = \frac{0,138E}{1-\nu^2} = 2,61 \text{ МПа}; C_2 = 2C_1 = 5,22 \text{ МПа}.$$

Анализ решения статической задачи показывает, что причину возникновения трещин в стене следует искать в недостаточной несущей способности фундаментов сооружения.

Статический расчет дает также формы собственных колебаний для моделей: упрощенной, детальной и детальной с раскреплениями (трещинами у башен). Анализ показывает, что значительная детализация модели ненамного изменяет значения собственных частот (до 5%), более важным является ослабление закрепления (10% и более).

Рассмотрим деформацию стены от динамического воздействия при задании реальной акселерограммы от поезда на расчетную модель. Наиболее опасное направление динамического воздействия — вдоль оси Y (поперек стены). Расчет показывает, что динамический отклик системы распределяется следующим образом: 48,37% — составляющая по оси Y от первой формы; 24,13% — составляющая по оси Y от третьей формы; 6,04% — составляющая по оси Z от третьей формы. Максимальное перемещение, полученное в расчете в середине стены, равно 10 мкм (10^{-5} м) в центре прясла. Нагрузки, полученные в результате динамического расчета по трехкомпонентной акселерограмме, от воздействия проходящего поезда оказались достаточно малыми. Порядок усилий, полученных в стене, составляет $10^{-2} \dots 10^{-3}$ Па, что значительно меньше нагрузок от собственного веса конструкций и временных нагрузок. Из этого следует, что вибрации от поезда не могут быть основной причиной разрушения прясла. Более того, в данном случае они не оказывают воздействия, способного приводить к разрушению прясла даже на длительном интервале времени воздействия.

Выводы. Применение новой инженерно-сейсмометрической методики на практике позволило провести детальное обследование исторического сооружения и выяснить причины ухудшения состояния его конструкций. Методика является инновационной по следующим признакам. Во-первых, она объединяет в единый комплекс подходы прикладной геофизики и строительных наук при равнозначности каждого из них. Во-вторых, используются современные методики расчетов и наблюдений, в том числе оригинальные. Существенно, что в качестве тестовых воздействий используются слабые сейсмические сигналы от движущихся поездов, что перспективно, учитывая соседство железных дорог и сооружений разного назначения. Важно также, что представленные схемы

наблюдений могут быть использованы и для оценки состояния сооружений, входящих в железнодорожный комплекс (мосты, здания вокзалов и пр.).

Практическим результатом проведенного обследования прясла Спасо-Прилуцкого монастыря является экспертное заключение о безопасности вибраций от поездов и отказ от дорогостоящих работ по установке виброзащиты.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ, проект № 17-20-02119.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р 52892–2007. Вибрация и удар. Вибрация зданий. Измерение вибраций и ее воздействий на конструкцию. М.: Стандартинформ, 2008. 16 с.
2. Антоновская Г.Н., Капустян Н.К., Рогожин Е.А. Сейсмический мониторинг промышленных объектов: проблемы и пути решения // Сейсмические приборы. 2015. Т. 51. № 1. С. 5–15.
3. Сейсмометрический мониторинг технического состояния несущих строительных конструкций зданий и сооружений по динамическим характеристикам / Е.П. Золотухин [и др.] // Вычислительные технологии. Специальный выпуск. 2013. Т. 18. С. 29–36.
4. Аникин О.П., Горшенин Ю.В., Козлов А.М. Методические рекомендации по определению состава, состояния и свойств грунтов сейсмоакустическими методами. М.: ЦНИИС Минтрансстроя СССР, 1985. 65 с.
5. Gallipoli M., Mucciarelli M., Vona M. Empirical estimate of fundamental frequencies and damping for Italian buildings // Earthquake Engineering and Structural Dynamics. 2009. Vol. 38, no. 8. P. 973–988.
6. Ditommaso R., Vona M., Gallipoli M., Mucciarelli M. Evaluation and considerations about fundamental periods of damaged reinforced concrete buildings // Natural Hazards and Earth System Sciences. 2013. Vol. 13, no. 7. P. 1903–1912.
7. Mivehchi M.R., Ahmadi M.T., Hajmomeni A. Effective Techniques for Arch Dam Ambient Vibration Test: Application on Two Iranian Dams. JSEE. 2003. no. 5 (2). P. 23–34.
8. Snieder R., Şafak E. Extracting the building response using seismic interferometry: theory and application to the Millikan Library in Pasadena, California // Bulletin of the Seismological Society of America. 2006. Vol. 96, no. 2. P. 586–598.
9. Antonovskaya G.N., Kapustyan N.K., Moshkunov A.I., Danilov A.V. Seismic network solution for HPP turbine operation monitoring. International Journal on Hydropower & Dams. 2016. Issue 6. P. 52–56.
10. Сейсмологические исследования в арктических и приарктических регионах / под ред. чл.-корр. Ф. Н. Юдахина. Екатеринбург: УрО РАН, 2011. 244 с.
11. Юдахин Ф.Н., Капустян Н.К., Антоновская Г.Н. Инженерно-сейсмические исследования геологической среды и строительных конструкций с использованием ветровых колебаний зданий. Екатеринбург: УрО РАН, 2007. 156 с.
12. СНиП II-22-81* Каменные и армокаменные конструкции / Госстрой России. М.: ФГУП ЦПП, 2004. 64 с.
13. Пашкин Е.М. Инженерная геология: учеб. пособие. М.: Архитектура, 2005. 264 с.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

КАПУСТЯН Наталия Константиновна,
д-р физ.-мат. наук, главный научный сотрудник,
ФГБУН ФИЦКИА РАН

АНТОНОВСКАЯ Галина Николаевна,
канд. техн. наук, руководитель научно-образовательного центра «МПТО-Арктика»,
заведующий лабораторией сейсмологии,
ФГБУН ФИЦКИА РАН

БАСАКИНА Ирина Михайловна,
канд. техн. наук, научный сотрудник, ФГБУН ФИЦКИА РАН

Статья поступила в редакцию 26.05.2017 г., принята к публикации 03.08.2017 г.

Experience in the use of seismic recording of vibrations from trains to evaluate the condition of buildings and structures

N. K. KAPUSTYAN^{1,2}, G. N. ANTONOVSKAYA², I. M. BASAKINA²

¹ Federal State Budgetary Institution of Science "Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences" (IPE RAS), Moscow, 123242, Russia

² Federal State Budgetary Institution of Science "N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research" (FGBUN FITsKIA RAS), Arkhangelsk, 163000, Russia

Abstract. Constructions along railway traffic lines are always exposed to vibrations generated by the passing transport. This sometimes leads to shifts in their state even threatening the comfort of the people that stay here. To estimate the magnitude of such effect one needs the frequency-amplitude chart of impacting vibrations. Current codes [1] are applied to the main types of buildings and state the acceptable level of magnitudes in wide frequency ranges. However, the code's regulations are not enough to ensure the building's stability as the real state of this building is not taken into account. This is especially true for the historical buildings near railroads. Majority of these are cult-related and are mostly damaged and need renovation. To correctly estimate an impact of vibrations one needs to measure addition tensions due to vibration in the construction's body and to compare them with ones resistance material calculations. In other words, seismic vibrations emitted by trains act as a seismic signal, for which there are several established methods of evaluation. Finite elements simulations enables estimation of the distribution of static and dynamic loads so that the most vulnerable locations in the construction's body are identified. Consequently the simulation can use experimentally recorded waves (spectra or accelerograms) as the dynamic load. With the simulation stage set different model types are cycled until the satisfactory match is obtained as is shown in the paper. Importantly, we demonstrate how construction evaluation methods can be combined with applied seismic methods, which are being actively developed for the needs of soil and construction integrity evaluations.

Keywords: train motion; vibrations; accelerogram; spectrum; construction state; grounds properties; impact modelling

DOI: <http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2017-76-5-281-287>

REFERENCES

1. GOST R 52892–2007. *Vibration and shock. Vibration of buildings. Measurement of vibrations and its effects on the structure*. Moscow, Standartinform Publ., 2008, 16 p. (in Russ.).
2. Antonovskaya G. N., Kapustyan N. K., Rogozhin E. A. *Seismicheskiy monitoring promyshlennykh ob'ektov: problemy i puti resheniya* [Seismic monitoring of industrial facilities: problems and solutions]. *Seismicheskiye pribory* [Seismic devices], 2015, Vol. 51, no. 1, pp. 5–15.
3. Zolotukhin E. P., Kuz'menko A. P., Saburov V. S., Korolenko D. B., Neskoroedev V. D. *Seismometricheskiiy monitoring tekhnicheskogo sostoyaniya nesushchikh stroitel'nykh konstruktsiy zdaniy i sooruzheniy po dinamicheskim kharakteristikam* [Seismometric monitoring of technical condition of load-bearing constructions of buildings and structures by dynamic characteristics]. *Vychislitel'nye tekhnologii. Spetsial'nyy vyp.* [Computational technologies. Special issue], 2013, Vol. 18, pp. 29–36.
4. Anikin O. P., Gorshenin Yu. V., Kozlov A. M. *Metodicheskie rekomendatsii po opredeleniyu sostava, sostoyaniya i svoystv grun-*

tov seysmoakusticheskimi metodami [Methodical recommendations for determining the composition, condition and properties of soils by seismo-acoustic methods]. Moscow, TsNIIS Mintransstroya SSSR Publ., 1985, 65 p.

5. Gallipoli M., Mucciarelli M., Vona M. *Empirical estimate of fundamental frequencies and damping for Italian buildings*. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2009, Vol. 38, no. 8, pp. 973–988.

6. Ditommaso R., Vona M., Gallipoli M., Mucciarelli M. *Evaluation and considerations about fundamental periods of damaged reinforced concrete buildings*. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2013, Vol. 13, no. 7, pp. 1903–1912.

7. Mivehchi M. R., Ahmadi M. T., Hajmomeni A. *Effective Techniques for Arch Dam Ambient Vibration Test: Application on Two Iranian Dams*. *JSEE*, 2003, no. 5 (2), pp. 23–34.

8. Snieder R., Şafak E. *Extracting the building response using seismic interferometry: theory and application to the Millikan Library in Pasadena, California*. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2006, Vol. 96, no. 2, pp. 586–598.

9. Antonovskaya G. N., Kapustyan N. K., Moshkunov A. I., Danilov A. V. *Seismic network solution for HPP turbine operation monitoring*. *International Journal on Hydropower & Dams*, 2016, Issue 6, pp. 52–56.

10. Yudakhin F. N., Antonovskaya G. N., Asming V. E., Baranov S. V. *Seysmologicheskie issledovaniya v arkticheskikh i priarkhticheskikh regionakh* [Seismological research in the Arctic and near-Arctic regions]. Ekaterinburg, UrO RAN Publ., 2007, 244 p.

11. Yudakhin F. N., Kapustyan N. K., Antonovskaya G. N. *Inzhenerno-seysmicheskie issledovaniya geologicheskoy sredy i stroitel'nykh konstruktsiy s ispol'zovaniem vetrovykh kolebaniy zdaniy* [Engineering seismic studies of the geological environment and building structures using wind turbines of buildings]. Ekaterinburg, UrO RAN Publ., 2007, 156 p.

12. SNiP II-22-81* *Stone and reinforced structures*. Gosstroy of Russia. FGUP TsPP Publ., 2004, 64 p. (in Russ.).

13. Pashkin E. M. *Inzhenernaya geologiya: ucheb. posobie* [Engineering Geology: A Training Manual]. Moscow, Arkhitektura Publ., 2005, 264 p.

ABOUT THE AUTHORS

Nataliya K. KAPUSTYAN,
Dr. Sci. (Phys.-Math.), Chief Researcher, FGBUN FITsKIA RAS

Galina N. ANTONOVSKAYA,
Cand. Sci. (Eng.), Head of the Scientific and Educational Center "MPOT-Arktika", Head of the laboratory of seismology, FGBUN FITsKIA RAS

Irina M. BASAKINA,
Cand. Sci. (Eng.), Researcher, FGBUN FITsKIA RAS

Received 26.05.2017

Accepted 03.08.2017

■ E-mail: nkapustian@gmail.com (N. K. Kapustyan)

Методика оценки работоспособности противоюзных устройств

И. А. ЖАРОВ¹, А. А. АЛЕКСЕЕВ²

¹ Акционерное общество «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (АО «ВНИИЖТ»), Москва, 129626, Россия

² Акционерное общество «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте» (АО «НИИАС»), Москва, 109029, Россия

Аннотация. В статье предложена методика для расчета возможностей противоюзных устройств железнодорожного подвижного состава, позволяющая определить, как следует снижать тормозную силу в конце торможения, и дать оценку тормозному пути вследствие этого.

Методика позволяет установить, насколько прирост тормозного пути данного поезда из-за этого снижения зависит от параметров противоюзных устройств.

Ключевые слова: противоюзное устройство; параметр; коэффициент; сцепление

Введение. По тематике, связанной с противоюзными устройствами железнодорожного подвижного состава в периодической печати за последние годы опубликован ряд работ [1–7], раскрывающих многообразие стоящих в этой отрасли задач. Эти публикации позволяют понять историю вопроса.

Как известно, задачей противоюзного устройства является предохранение колес экипажа от повреждений при вхождении в юз (ползунов, наваров, выкрашиваний) при минимальном приросте тормозного пути. Достигается это снижением давления в тормозном цилиндре колесной пары, которая начинает вхождение в юз (скорость вращения которой становится заметно меньше скорости движения поезда). Для обнаружения процесса вхождения колесной пары в юз нужно знать угловую скорость вращения колесной пары, которая обычно измеряется импульсным speed-мером. Обычно для этой цели применяются датчики магнитные (импульс напряжения появляется при прохождении магнитика мимо катушки) или оптоэлектронные (импульс напряжения появляется при прохождении луча света через прорезь и попадания его на фотодиод). Между импульсами напряжения точка на поверхности катания колеса проходит путь Δx , который находится из равенства

$$\Delta x = 2\pi R / n, \quad (1)$$

где n — количество импульсов за оборот колеса; R — радиус колеса.

Расчет показывает, что в случае если n равно 72 (через каждые 5° поворота), а R равно 460 мм, то $\Delta x \approx 4$ см. То есть каждым 4 см тормозного пути соответствует

один импульс магнитного или оптоэлектронного датчика. Обращать импульсы можно по-разному. В данной работе рассматривается случай, когда подсчитывается количество импульсов с периодичностью Δt .

Соответствующие требования к величине Δx и другим параметрам противоюзного устройства рассматривались в работе [8]. Однако в этих работах предполагалось, что в момент получения импульса противоюзное устройство рассчитывает точное значение скорости колеса на окружности катания ωR , где ω — угловая скорость вращения колесной пары. На самом деле скорость ωR находится приблизительно, особенно при малых значениях ωR и в режиме текущего времени (т. е. если можно использовать информацию только до текущего момента). Для изучения влияния величин Δx и Δt на работоспособность противоюзного устройства требуется решить три задачи:

1. Предложить алгоритм нахождения скорости ωR по данным импульсного датчика.
2. Предложить критерий для начала срабатывания противоюзного устройства (посылки команды на сброс воздуха из тормозного цилиндра) на основании анализа вычисленных значений ωR .
3. Сформулировать требования к параметрам противоюзного устройства (Δx , Δt и др.) для обеспечения работоспособности противоюзного устройства во всем диапазоне скоростей движения.

Первые две задачи были решены в работе [9]. Было предложено использовать формулу в конечных разностях для замедления колесной пары как показатель, по которому можно диагностировать начало входа в юз.

Третья задача решается в данной работе. По сравнению с работой [8] в данной работе дополнительно сделано следующее:

1. Предложен метод расчета, находящий предел работоспособности противоюзного устройства с заданными параметрами. При этом учтено время, требуемое на обнаружение начала вхождения в юз.
2. Ранее установлено, что требования к параметрам противоюзных устройств становятся наиболее жесткими в конце торможения из-за легкости вхождения в юз при малых скоростях движения. Поэтому,

■ E-mail: t2604404@yandex.ru (И. А. Жаров)

изучен вопрос о том, насколько надо снизить тормозной коэффициент сцепления колесной пары Ψ_0 (отношение тормозной силы к нагрузке на ось) при малых скоростях движения, чтобы устранить возможность повреждения колес при вхождении в юз.

3. Обсуждено, как можно определять параметры противоюзных устройств при тормозных испытаниях подвижного состава и как использовать при этих испытаниях полученные расчетные зависимости. От существующих методов испытаний противоюзных устройств данный подход отличается тем, что работоспособность противоюзного устройства оценивается не на конкретном участке пути с пониженным сцеплением, а на расчетном участке пути с наихудшим коэффициентом сцепления в каждой точке (чем он меньше, тем быстрее колесная пара входит в юз, но и повредить ее труднее).

Для понимания сути проблем, возникающих при работе противоюзного устройства, рассмотрим поезд, тормозящий с определенным замедлением a , которое связано со скоростью поезда v равенством

$$a = -dv / dt. \quad (2)$$

Пусть в некоторый момент времени колесная пара стала входить в юз, т. е. скорость вращения колесной пары ωR стала меньше скорости движения поезда v . Нарастание этого различия можно характеризовать замедлением b , где

$$b = d(v - \omega R) / dt. \quad (3)$$

Из формул (1) и (2) следует, что

$$a + b = -Rd\omega / dt. \quad (4)$$

Срабатывание противоюзного устройства (например, снижение давления в тормозных цилиндрах) происходит не сразу при начале вхождения в юз. Сначала должно пройти время t_d до появления возможности обнаружения вхождения в юз. Это время зависит от погрешностей при вычислении величины $a + b$ на основании сигналов датчика скорости. То есть это минимальное время, после которого можно заключить, что замедление $a + b$ больше предельно возможного при торможении поезда.

Затем должно пройти время реакции t_p , т. е. максимальное время между моментом обнаружения вхождения в юз и началом сброса давления.

Срабатывание противоюзного устройства не останавливает вхождение в юз мгновенно. Требуется время, чтобы тормозной момент на колесной паре снизился до значения, после которого замедление b станет отрицательным (т. е. ускорением) и колесная пара начнет выходить из юза. Это время называется временем снижения тормозного усилия — t_c .

Цель данной работы состоит в выяснении вопроса, может ли колесная пара повредиться из-за пластического сдвига ее стали при вхождении в юз при задан-

ных параметрах противоюзного устройства и заданном режиме торможения поезда?

Время до возможности обнаружения вхождения в юз. Время t_d зависит от времени t_n между двумя импульсами датчика скорости вращения, которое находится из равенства

$$\Delta x = Ut_n - at_n^2 / 2, \quad (5)$$

где U — скорость поезда в момент первого импульса; a — замедление поезда.

Решив квадратное уравнение (5), получим

$$t_n = \left(1 - \left(1 - 2a\Delta x / U^2\right)^{0.5}\right) U / a. \quad (6)$$

Если величина $2a\Delta x / U^2$ много меньше единицы, то из равенства (6) следует, что

$$t_n \approx \Delta x / v. \quad (7)$$

Однако в общем случае нужно проверять условие

$$2a\Delta x / U^2 \leq 1 \quad (8)$$

и использовать равенство (6). Если условие (8) нарушается, это значит, что при нормальном торможении колесная пара не повернулась бы до получения следующего импульса и, следовательно, диагностика входа ее в юз невозможна в принципе. При этом формально t_n равно бесконечности.

Рассмотрим вариант, когда a равно максимально возможному замедлению поезда, превышение которого служит сигналом о начале вхождения в юз.

Тогда время t_d до возможности обнаружения вхождения в юз будет максимальным, если вхождение началось сразу после получения очередного импульса. При этом t_d равно t_n (начало входа в юз определяется через это время, используя соответствующие формулы в конечных разностях для скоростей и замедления [9]). При меньшем замедлении t_d может превышать t_n (если начало входа в юз не определится на следующем импульсе), но и тормозной коэффициент сцепления колесной пары Ψ_0 при этом обычно меньше, чем при максимально возможном замедлении поезда. Поэтому примем, что

$$t_d = t_n = \left(1 - \left(1 - 2a\Delta x / v^2\right)^{0.5}\right) v / a. \quad (9)$$

Величину t_d следует находить по результатам торможений, используя формулы для замедления, предложенные в работе [9].

Время реакции. Это время состоит из трех составляющих, т. е.

$$t_p = \Delta t + t_o + t_n, \quad (10)$$

где Δt — время между опросами датчика скорости; t_o — время обработки информации с датчиков скорости и принятия решения на сброс давления в тормозном цилиндре (цилиндрах); t_n — время подготовки клапанов, т. е. время между получением сигнала на сброс давления и началом сброса давления.

Время обработки информации с датчиков скорости и принятия решения на сброс давления в тормозном цилиндре (цилиндрах) t_0 можно уменьшить за счет того, что основной объем вычислений выполнить в предыдущий временной интервал Δt . Поскольку при малых скоростях за интервал Δt появляется либо один импульс, либо ни одного, есть возможность заранее принять решение о необходимости сброса давления в случае не появления импульса. Понятно, что нельзя делать время Δt меньшим, чем суммарное время обработки информации (до и после получения с датчика скорости данных о количестве импульсов за время Δt).

Время подготовки клапанов t_n , т. е. время между получением сигнала на сброс давления и началом сброса давления, обычно включает в себя время на закрытие впускного клапана в тормозной цилиндр и время на подготовку выпускного клапана (например, «разогрев» индукционной катушки). С целью уменьшения этого времени впускные клапаны обычно закрывают заранее по более жесткому условию, чем открывают выпускные (например, если замедление $a + b$ больше 90 % от предельно возможного при торможении поезда).

Время подготовки выпускного клапана можно уменьшить, если частично «разогреть» индукционную катушку заранее.

С практической точки зрения важно общее время реакции t_p , включающее эти три компоненты, а также общее время реакции t_p^* , дополнительно учитывающее время на закрытие впускных клапанов и возможный «разогрев» индукционной катушки выпускного клапана. Эти времена реакции можно определять по результатам торможений.

Учет времени снижения тормозного усилия. Рассмотрим уравнение вращения колесной пары

$$m_n R^2 d\omega / dt = \psi PR - M, \quad (11)$$

где m_n — инерционная масса, связанная с колесной парой; ψ — коэффициент сцепления между колесной парой и рельсами; P — нагрузка на ось; M — тормозной момент на колесной паре.

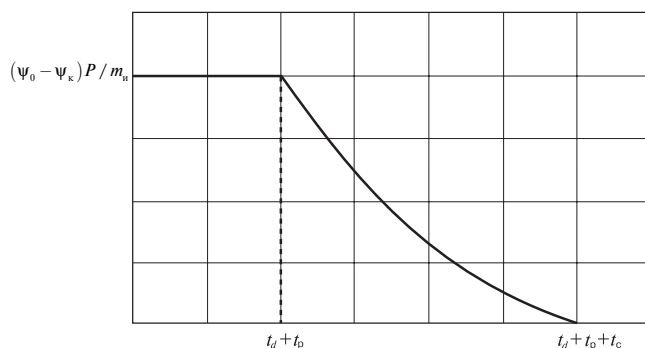


Рис. 1. Зависимость замедления b от времени t
Fig. 1. The dependence of deceleration b on time t

В случае когда колесная пара не входит в юз, коэффициент сцепления ψ равен тормозному коэффициенту сцепления ψ_t и из равенства (11) следует, что

$$\psi_t(t) = M(t) / (PR) - m_n a(t) / P. \quad (12)$$

В случае когда колесная пара входит в юз, из равенств (11) и (12) следует, что

$$b(t) = (\psi_t(t) - \psi(t)) P / m_n. \quad (13)$$

Найдем время t_c , за которое замедление b падает до нуля. Согласно формуле (13) для этого можно использовать время, за которое функция $\psi_t(t)$ уменьшается от начального значения тормозного коэффициента сцепления колесной пары ψ_0 до соответствующего значения ψ_k .

Считая, что тормозной коэффициент сцепления снижается по экспоненте, запишем равенство

$$\psi_t(t_c) = \psi_0 \exp(-t_c / \tau) = \psi_k, \quad (14)$$

где τ — время, за которое $\psi_t(t)$ уменьшается в e раз.

Отсюда

$$t_c = \tau \ln(\psi_0 / \psi_k). \quad (15)$$

В случае если тормозной момент создается фрикционным тормозом, удобно использовать оценку

$$\tau = t_2 / \ln(2), \quad (16)$$

где t_2 — время сброса давления в тормозном цилиндре наполовину. Это время также можно замерять при тормозных испытаниях поезда.

Оценка возможной скорости проскальзывания колесной пары. Рассмотрим случай, когда величина $\psi(t)$ уменьшилась скачком с величины $\psi_t(0)$ (обозначили как ψ_0) до величины ψ_k и не менялась до начала выхода из юза, а величина $\psi_t(t)$ не менялась в течение времени $t_d + t_p$, а затем в течение времени t_c экспоненциально снизилась до величины ψ_k . Вид функции $b(t)$ при этом показан на рис. 1.

Для скорости проскальзывания u с учетом формулы (13) верны равенства

$$u = v - \omega R = \int b(t) dt = (P / m_n) \times [(\psi_0 - \psi_k)(t_d + t_p + \tau) - \psi_k t_c]. \quad (17)$$

Если поезд тормозит с замедлением a так, что коэффициент сцепления на всех колесных парах равен ψ_0 , то верно равенство

$$Ma = \psi_0 Mg, \quad (18)$$

где M — масса поезда; g — ускорение свободного падения.

Из равенства (18) следует, что

$$a = \psi_0 g. \quad (19)$$

За время до начала выхода колесной пары из юза скорость поезда уменьшится на величину Δv , которая находится по формуле

$$\Delta v = a(t_d + t_p + t_c). \quad (20)$$

Критерий начала пластического сдвига. Как показано в работе [10], для предотвращения начала пластического сдвига термомеханическая нагруженность (условное повышение температуры) пятна контакта на поверхности катания не должна превышать величины θ_k , равной 800 °С, т. е.

$$2\psi\theta_k p_m / \sigma_0 + \beta\psi N^{0.5} (v^{0.5} - (\omega R)^{0.5}) \leq \theta_k, \quad (21)$$

где β — размерный коэффициент, равный 26 К/Вт^{0.5}; σ_0 — напряжение, равное 1600 МПа; ψ — текущий коэффициент сцепления; N, p_m — нагрузка на колесо (т. е. $P/2$) и максимальное давление на пятне контакта поверхностей катания колес и рельсов соответственно.

Последняя величина находится по формуле Герца

$$p_m = \left(6N(E^*)^2 / (\pi^3 R_c^2) \right)^{1/3}, \quad (22)$$

где $E^* = 0,5E / (1 - \nu^2) = 115$ ГПа, E и ν — модуль Юнга и коэффициент Пуассона для колесных и рельсовых сталей, равные 210 ГПа и 0,3 соответственно; R_c — среднегеометрический радиус кривизны в точке контакта поверхностей катания новых колес и рельсов (обычно около 0,5 м). При нагрузке на ось 200 кН ($N = 100$ кН) давление p_m равно 1 ГПа.

Неравенство (21) должно выполняться все время, пока тормозной коэффициент колесной пары не станет меньше ψ_k . Если U больше, чем $\Delta v + u$, то неравенство (21) заменим следующим

$$2\psi_k \theta_k p_m / \sigma_0 + \beta\psi_k N^{0.5} \times \\ \times [(U - \Delta v)^{0.5} - (U - \Delta v - u)^{0.5}] \leq \theta_k. \quad (23)$$

В противном случае нужно найти время T , за которое колесная пара вошла в юз (ωR стало равно 0), а неравенство (21) заменить следующим

$$2\psi_k \theta_k p_m / \sigma_0 + \beta\psi_k N^{0.5} (U - aT)^{0.5} \leq \theta_k. \quad (24)$$

Время T находится из равенства, аналогичного равенству (17)

$$U = \int b(t) dt + aT = [(P / m_u)(\psi_0 - \psi_k) + a]T, \quad (25)$$

а если получившееся значение T больше чем $t_d + t_p$, то

$$T = t_d + t_p + \lambda, \quad (26)$$

где время λ — время снижения тормозного коэффициента сцепления, которое находится из равенства аналогичного равенству (17)

$$U = \int b(t) dt + aT = (P / m_u) [(\psi_0 - \psi_k) \times \\ \times (t_d + t_p) + \tau\psi_0 - (\tau + \lambda)\psi_0 \exp(-\lambda / \tau)] + aT. \quad (27)$$

Для упрощения расчетов можно считать, что в диапазоне от 0 до t_c функция в правой части равенства (26) меняется от λ линейно.

Алгоритм расчета допустимого тормозного коэффициента сцепления. Из двух предыдущих разделов следует, что неравенство (21) можно представить в виде

$$F(\psi_k, U, \psi_0) \leq \theta_k, \quad (28)$$

где F — непрерывная функция от ψ_k , U и ψ_0 , указанная в неравенствах (23) и (24).

Для нахождения предельно допустимого значения ψ_0 решается равенство

$$\max F(\psi_k, U, \psi_0) = \theta_k, \quad (29)$$

где максимум находится по ψ_k .

Изучим равенство (29) на примере колесной пары с нагрузкой на ось P , равной 200 кН, и инерционной массой m_u , равной 500 кг. Эти величины дают значение P^2 / m_u , близкое к максимальному для прицепного вагона электропоезда. Для колесной пары моторного вагона величина P^2 / m_u обычно несколько меньше, что увеличивает T_m , но зато может быть заметно больше величина ψ_0 . Для примера проведем расчет противоюзного устройства при величине $\Delta x = 4$ см, временах $\Delta t = 0,01$ с, $t_p = 0,04$ с и $t_2 = 0,2$ с.

При данном значении U допустимое значение ψ_0 находим методом половинного деления следующим образом. Нижнюю границу задаем равной 0, а верхнюю — равной $0,001 \cdot 2^{10}$, что позволяет за десять половинных делений определить ψ_0 с точностью до 0,001. При каждом делении делается цикл по ψ_k от 0 до ψ_0 с шагом 0,001 и находится $\max F(\psi_k, U, \psi_0)$ и соответствующее значение $\psi_k^{\max}$.

При U , стремящемся к 0 или ∞ второй член неравенства (21) стремится к нулю, ψ_0 стремится к 0,8, а ψ_k равно ψ_0 . На рис. 2 показаны зависимости $\psi_0(U)$ и $\psi_k^{\max}(U)$ для практически значимого диапазона скоростей U , когда ψ_0 не более 0,3. Скачок величины $\psi_k^{\max}(U)$ при скорости около 21 м/с объясняется тем, что до этой скорости величина была максимально возможной при юзе. Полученная зависимость $\psi_0(U)$ применима для любой скорости движения, хотя и требует для вычисления написания специальной программы.

Минимальное значение $\psi_0(U)$ одна из важнейших характеристик противоюзного устройства. Это значение показывает, при каких значениях ψ_0 противоюзное устройство позволяет не снижать тормозную эффективность в конце торможения (в данном случае около 0,1). Второй важнейшей характеристикой является скорость, ниже которой такое снижение требуется (в данном случае около 2 м/с).

Зависимости $U(\psi_0)$ можно использовать для определения моментов закрытия впускных клапанов. Пусть t_p^* равно 0,1 с. На рис. 3 приведены зависимости $U(\psi_0)$, рассчитанные для t_p и t_p^* . Предполагается, что когда при данном ψ_0 скорость U снизилась до большего значения, то пора закрывать

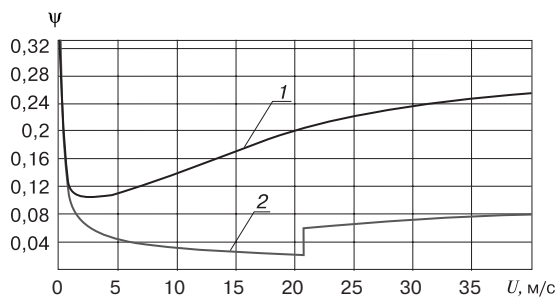


Рис. 2. Зависимости величин ψ_0 (1) и $\psi_k^{\max}$ (2) от скорости U
Fig. 2. Dependencies of the values of ψ_0 (1) and $\psi_k^{\max}$ (2) on the speed U

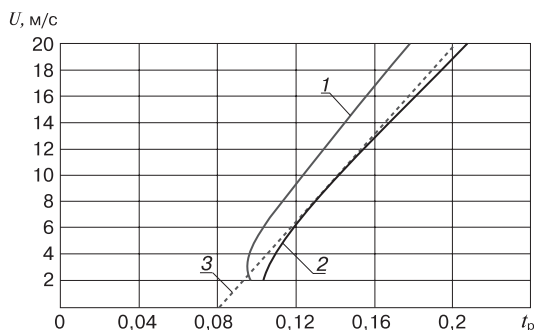


Рис. 3. Зависимости $U(\psi_0)$ для t_p и t_p^* :
1 – t_p ; 2 – t_p^* ; 3 – аппроксимация t_p
Fig. 3. Dependencies $U(\psi_0)$ for t_p and t_p^* :
1 – t_p ; 2 – t_p^* ; 3 – approximation t_p

впускные клапаны, а когда до нижнего значения, то следует снизить ψ_0 .

Прирост тормозного пути. Перепишем равенство (19) в виде

$$dU / dt = g\psi_0(U). \quad (30)$$

Перепишав дифференциальное уравнение (30) в виде

$$UdU / ds = g\psi_0(U), \quad (31)$$

и решив получившееся дифференциальное уравнение с разделяющимися переменными, получим, что

$$S(U_n) = \int_0^{U_n} [UdU / \psi_0(U)] / g, \quad (32)$$

где U_n — скорость начала торможения.

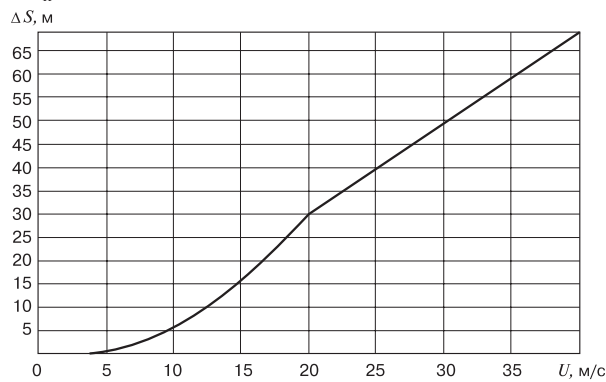


Рис. 4. Зависимость прироста тормозного пути от скорости
Fig. 4. The dependence of growth rate of the braking distance from the speed

Рассмотрим тормозные пути

$$S_0(U_n) = U^2 / (2g\psi_0(U)), \quad (33)$$

которые получились бы, если бы ψ_0 перестал меняться при скоростях меньших U . Соответствующий прирост тормозного пути находится по формуле

$$\Delta S(U_n) = S(U_n) - S_0(U_n). \quad (34)$$

На рис. 4 показана зависимость прироста тормозного пути от U_n .

Если задать допустимый прирост тормозного пути $\Delta S(U_n)$, то из зависимости рис. 4 можно найти допустимое значение U_n , а затем по зависимости рис. 2 допустимое значение $\psi_0(U_n)$. Так, если допустить прирост тормозного пути около 6 м, то скорость U_n близка к 10 м/с, а $\psi_0(U_n)$ к 0,14. То есть рассмотренное противоюзное устройство допустимо к применению при ψ_0 не более 0,1, если не снижать тормозную эффективность в конце торможения и не более 0,14, если снижать тормозную эффективность в конце торможения путем снижения тормозной силы до уровня допустимого противоюзным устройством.

Заключение. Главное применение предложенной методики заключается в указании, как следует снижать тормозную силу в конце торможения, и оценке прироста тормозного пути вследствие этого. Методика позволяет оценить, насколько прирост тормозного пути данного поезда зависит от параметров противоюзных устройств. Заметим также, что на основе этой методики будет проверяться работа противоюзных устройств при торможении поезда.

Зависимости, аналогичные приведенным на рис. 2 и 4, будут использованы в нормативной документации на противоюзные устройства.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ, грант № 12-08-13148-офи_м_РЖД).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бесценная О. В., Казаринов А. В. Тормоза для высокоскоростного подвижного состава // Современные направления и перспективы развития автотормозной техники железных дорог СССР: сб. науч. тр. М.: Транспорт, 1991. С. 34–41.
2. Асадченко В. Р., Казаринов А. В., Козюлин Л. В. Тормозные системы с противоюзными устройствами для повышения реализуемого сцепления // Современные направления и перспективы развития автотормозной техники железных дорог СССР: сб. науч. тр. М.: Транспорт, 1991. С. 98–102.
3. Казаринов А. В. Противоюзные устройства для скоростных поездов. Фундаментальные и прикладные исследования — транспорту: тезисы докладов Всероссийской науч.-техн. конф., февраль 1995, Екатеринбург. Ч. 1 / МПС РФ, УрГАПС. Екатеринбург, 1995. С. 120–121.
4. Испытания противоюзных устройств для электроподвижного состава и скоростных поездов / А. В. Казаринов [и др.] // Вестник ВНИИЖТ. 1996. № 3. С. 32–36.
5. Казаринов А. В., Волуйский Н. М. Расчет некоторых характеристик процесса торможения при движении колеса юзом // Железнодорожный транспорт сегодня и завтра: тезисы докладов науч.-техн. конф. Ч. 1 / МПС РФ, УрГАПС. Екатеринбург, 1998. С. 257–259.

6. Крылов В.В., Казаринов А.В., Максимов Б.Г. Методика испытаний систем противоюзной защиты (СПЗ) железнодорожного подвижного состава // Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты: тезисы докладов Всероссийской науч.-техн. конф., 4–6 июля 2001 г., Санкт-Петербург /Петербургский государственный ун-т путей сообщения (ПГУПС). СПб., 2001. С. 72.

7. Структуризация расчетного коэффициента сцепления колес с рельсами при торможении на основании динамических характеристик экипажа / А.В. Казаринов [и др.] // Вестник ВНИИЖТ. 2009. № 1. С. 9–14.

8. Жаров И.А., Курцев С.Б. Обоснование технических требований к противоюзным устройствам // Вестник ВНИИЖТ. 2006. № 6. С. 21–26.

9. Жаров И.А., Курцев С.Б., Кренделев А.А. Обработка импульсов углового скоростемера для противоюзного устройства // Вестник машиностроения. 2013. № 11. С. 23–27.

10. Жаров И.А., Курцев С.Б. Температуры на пятнах контакта системы «колодка — колесо — рельс» при торможении экипажа // Вестник ВНИИЖТ. 2008. № 3. С. 34–39.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Жаров Илья Алексеевич, канд. техн. наук, в.н.с., отделение «Автотормоза», АО «ВНИИЖТ»

АЛЕКСЕЕВ Александр Алексеевич, главный специалист, АО «НИИАС»

Статья поступила в редакцию 17.04.2017 г., принята к публикации 07.08.2017 г.

Method for evaluating the performance of antiskid devices

I. A. ZHAROV, A. A. ALEKSEEV

¹ Joint Stock Company "Railway Research Institute" (JSC "VNIIZhT"), Moscow, 129626, Russia

² Joint Stock Company "Research and Design Institute of Informatization, Automation and Communication in Railway Transport" (JSC "NIICAS"), Moscow, 109029, Russia

Abstract. To detect the beginning of the entry of the wheelset in the skid, it is necessary to know the angular velocity of rotation of the wheelset, which is usually measured by a pulse speedometer. Usually, magnetic sensors are used for this purpose (the voltage pulse appears when the magnet passes the coil) or optoelectronic (voltage pulse appears when the light beam passes through the slot and hits it on the photodiode). Between the voltage pulses, the point on the rolling surface of the wheel passes the path Δx . Processing pulses can be different. In this paper considers the case when the number of pulses is counted with the periodicity Δt .

In this work, the following is additionally done:

– A calculation method is proposed that finds the limit of the performance of an antiskid device with specified parameters. At the same time, the time required to detect the beginning of the entry into skid is taken into account.

– Earlier it was established that the most stringent requirements for the parameters of antiskid devices are at the end of braking because of the easy entry into the skid at low speeds. Therefore, the question was studied on how much the braking coefficient of coupling of the wheelset Ψ_0 (the ratio of the braking force to the load per axle) should be reduced at low speeds so as to eliminate the possibility of damage to the wheels when entering the skid.

– It is discussed how it is possible to determine the parameters of antiskid devices during braking tests of rolling stock and how to use these calculated dependencies in these tests. From the existing methods of testing antiskid devices, this approach is different in that the performance of an antiskid device is evaluated not on a specific segment of the track with reduced cohesion, but on the estimated track with the worst coefficient of adhesion at each point (the shorter the track section, the faster the wheelset enters the skid, but it is also more difficult to damage it).

The article suggests a method for antiskid devices of railway rolling stock, which allows calculating how to reduce the braking force at the end of braking and to estimate the growth of the braking distance due to this. The method allows estimating how much the growth of the braking distance of this train due to this reduction depends on the parameters of the antiskid devices.

Keywords: antiskid device; parameter; coefficient; coupling

DOI: <http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2017-76-5-288-293>

REFERENCES

1. Bestsennaya O.V., Kazarinov A.V. *Brakes for high-speed rolling stock*. Modern trends and prospects for the development of auto-braking equipment of the USSR railways. Coll. sci. proc. Moscow, Transport Publ., 1991, pp. 34–41.

2. Asadchenko V.R., Kazarinov A.V., Kozyulin L.V. *Brake systems with antiskid devices to increase the realized adhesion*. Modern trends and prospects for the development of auto-braking equipment of the USSR railways. Coll. of works. Moscow, Transport Publ., 1991, pp. 98–102.

3. Kazarinov A.V. *Antiskid devices for high-speed trains*. Fundamental and applied research — transport. Proc. of the All-Russian Scientific and Technical Conference. Abstracts of papers. Part I. Yekaterinburg, UrGAP Publ., 1995, pp. 120–121.

4. Kazarinov A.V., Pogrebinskiy M.G., Krylov V.V., Bestsennaya O.V. *Tests of antiskid devices for electric rolling stock and high-speed trains*. Vestnik VNIIZhT [Vestnik of the Railway Research Institute], 1996, no. 3, pp. 32–36.

5. Kazarinov A.V., Voluyskiy N.M. *Calculation of some characteristics of the braking process when the wheel is driven by a tool*. Railway transport today and tomorrow. Proc. of the Scientific and Technical Conference. Abstracts of papers. Part 1. Yekaterinburg, 1998, UrGAP Publ., pp. 257–259.

6. Krylov V.V., Kazarinov A.V., Maksimov B.G. *Test procedure of antiskid protection systems (APS) for railway rolling stock*. Rolling stock of the twenty-first century: ideas, requirements, projects. Proc. of the All-Russian Scientific and Technical Conference. Abstracts of papers. St. Petersburg, Petersburg State Transport University (PGUPS) Publ., 2001, p. 72.

7. Kazarinov A.V., Kumpyak D.E., Belyankin A.V., Gudas M.V., Kasandrov M.D., Makas A.A. *Structuring of the estimated coefficient of adhesion of wheels with rails during braking based on the dynamic characteristics of the crew*. Vestnik VNIIZhT [Vestnik of the Railway Research Institute], 2009, no. 1, pp. 9–14.

8. Zharov I.A., Kurtsev S.B. *Grounding of technical requirements for antiskid devices*. Vestnik VNIIZhT [Vestnik of the Railway Research Institute], 2006, no. 6, pp. 21–26.

9. Zharov I.A., Kurtsev S.B., Krendellev A.A. *Processing of angular speedometer pulses for an antiskid device*. Vestnik mashinostroyeniya, 2013, no. 11, pp. 23–27.

10. Zharov I.A., Kurtsev S.B. *Temperatures on contact patches of the "shoe — wheel — rail" system during braking of the carriage*. Vestnik VNIIZhT [Vestnik of the Railway Research Institute], 2008, no. 3, pp. 34–39.

ABOUT THE AUTHORS

I'lya A. ZHAROV, Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher, Department "Automatic brakes", JSC "VNIIZhT"

Aleksander A. ALEKSEEV, Principal Engineer, JSC "NIICAS"

Received 17.04.2017

Accepted 07.08.2017

■ E-mail: t2604404@yandex.ru (I. A. Zharov)

Учет энергии на подстанциях переменного тока при протекании по контактной сети транзитных токов

В. М. ВАРЕНЦОВ, А. И. БУРЬЯНОВАТЫЙ, М. А. ИВАНОВ

Петербургский государственный университет путей сообщения (ПГУПС), Санкт-Петербург, 190031, Россия

Аннотация. Целью работы является уточнение методики определения расхода электроэнергии тяговых подстанций переменного тока электрических железных дорог на транзит мощности внешнего энергоснабжения. Выявлены условия возникновения существенного транзита по тяговым сетям мощности внешнего электроснабжения. На примере П-образной схемы замещения линий электропередач показано, что наибольшее влияние на транзитные токи по тяговым сетям оказывают межсистемные потоки мощности по линиям электропередач внешнего электроснабжения. Для анализа выделены местная и транзитная составляющие потока мощности и рассмотрен типичный участок электрической сети, содержащий три электрические связи на напряжениях 330, 110 и 27,5 кВ. При этом наиболее существенным фактором, влияющим на транзит по тяговой сети является поперечная составляющая падения напряжения, поскольку ее компенсация в этой сети затруднительна.

Приведены способы оценки транзитного тока тяговой сети. Предложена инженерная методика оценки расхода электроэнергии на транзит программными средствами. Показана необходимость и возможность использования комплекса программ для расчетов систем тягового электроснабжения (КОРТАС) для оценки транзитных токов тяговой сети, обусловленных внешним электроснабжением. Приведены результаты расчетов для двух участков разных железных дорог на основании данных региональных диспетчерских управлений. Рассмотрено влияние районной и тяговой нагрузок на пути прохождения транзитных токов. Полученные соотношения и разработанная методика позволяют выполнить оценку расхода электроэнергии тяговых подстанций на транзит мощности внешнего электроснабжения.

Ключевые слова: падение напряжения; транзитный ток; учет; электроэнергия; тяговая сеть

Введение. Тяговые сети переменного тока через одинарную или двойную трансформацию подключены к линиям 110, 220, 500 кВ, по которым постоянно протекает ток нетяговых потребителей. Токи линий через трансформаторы затекают в тяговые сети. Возможные причины протекания транзитных токов рассмотрены в [1, 2]. Для экономических оценок и расчетов необходимо определить контуры, по которым протекают токи, зависимость этих токов от сопротивлений тяговой и внешней сетей, угол между токами и напряжением, коэффициент мощности и условия протекания транзитного тока по тяговой сети. Это легче всего сделать при отсутствии поездов на межподстанционных зонах.

Показания счетчиков, учитывающих стекание токов в контактную сеть увеличиваются, так как учет энергии происходит даже в тех случаях, когда на межподстанционных зонах отсутствуют электропоезда и по контактной сети протекают только транзитные токи.

Влияние режима энергосистемы на транзитные токи в тяговой сети. Для анализа режимов работы линий напряжением 110 кВ и выше обычно используются П-образные схемы замещения. В этом случае падение напряжения ΔU представлены суммой двух составляющих: продольной $\Delta U'$ и поперечной $\Delta U''$. Продольная составляющая определяет изменение напряжения по величине, а поперечная — по углу. Составляющие падения напряжения, кВ, могут быть определены по формулам [3]

$$\Delta U' = \frac{P_2 R_{\text{л}} + Q_2 X_{\text{л}}}{U_2} - 0,5 U_2 B_{\text{л}} X; \quad (1)$$

$$\Delta U'' = \frac{P_2 X_{\text{л}} - Q_2 R_{\text{л}}}{U_2} + 0,5 U_2 B_{\text{л}} R, \quad (2)$$

где P_2 и Q_2 — активная и реактивная мощность в конце линии, МВт и Мвар; $R_{\text{л}}$ и $X_{\text{л}}$ — продольные активное и индуктивное сопротивление линии, Ом; U_2 — напряжение в конце линии, кВ; $B_{\text{л}}$ — поперечная емкость проводимости линии, См.

Угол передачи δ между напряжениями в конце и в начале линии

$$\delta = \arctg \left(\frac{\Delta U''}{U_2 + \Delta U'} \right). \quad (3)$$

В сетях напряжением 110 и 220 кВ продольное реактивное сопротивление обычно в два и более раза превышает активное, что обуславливает изменение фазового угла напряжения при передаче активной мощности.

На участках, электрифицированных по системе переменного тока 25 кВ (50 Гц), продольная составляющая падения напряжения $\Delta U'$ может быть компенсирована с помощью переключателя коэффициента трансформации трансформатора под нагрузкой (далее — РПН). Компенсация поперечной составляющей $\Delta U''$ затруднительна, так как требует специальных фазосдвигающих трансформаторов. Ток в тя-

говой сети обусловлен ответвлением части мощности, протекающей по питающей сети (рис. 1).

Мощность, протекающую по сетям внешнего электроснабжения, можно представить в виде наложения потоков местной и транзитной мощности.

Местная составляющая наиболее сильно проявляется вблизи узлов крупной промышленной нагрузки или электростанций. Транзитная составляющая проявляется в тех случаях, когда параллельно железной дороге проходят линии системообразующей сети, работающие на пределе передаваемой мощности.

Для пояснения влияния местных и транзитных потоков мощности рассмотрим схему, представленную на рис. 2, а. Расчет по данной схеме был выполнен с помощью совместной модели системы внешнего и тягового электроснабжения, построенной в среде MATLAB-Simulink [4, 5].

На рис. 2, а представлен типичный участок электрической сети, соединяющей две энергосистемы ЭС1 и ЭС2 по линиям двух классов напряжения: 330 и 110 кВ. От шин 110 кВ подстанций А и Б получает питание местная нагрузка. К линии 110 кВ между подстанциями А и Б подключены две промежуточные тяговые подстанции В и Г. Тяговой является и районная подстанция Б. Рассмотрим работу данной сети в различных режимах. На рис. 2, б представлен режим работы сети только с местной нагрузкой подстанций (ПС) А, Б, В и Г. Генерация местной электростанции равна нулю, переток мощности между ЭС1 и ЭС2 отсутствует. В этом случае распределение мощности определяется только сопротивлением отдельных ветвей сети. Разность углов напряжений на шинах 110 кВ подстанций А, Б, В и Г в этом режиме незначительна и составляет десятые доли градуса.

Влияние местной электростанции, подключенной к шинам 110 кВ подстанции А, иллюстрирует рис. 2, в. Электростанция выдает в сеть активную мощность, равную 100 МВт. Избыток мощности передается в энергосистему ЭС2. Основная часть мощности передается в сеть 330 кВ через автотрансформаторы подстанции А. В линии 110 кВ между подстанциями А и Б появляется транзитная мощность. В результате разность углов напряжений на удаленных друг от друга подстанциях В, Г и Б возрастает до 1–2 град. Аналогичная картина будет и в случае, когда на месте электростанции окажется потребитель сопоставимой мощности.

На рис. 2, г дополнительно присутствует транзит активной мощности 500 МВт из энергосистемы ЭС1 в энергосистему ЭС2. Загрузка сети 330 кВ приводит к значительному увеличению транзита мощности по сети 110 кВ. При этом разность углов напряжений на подстанциях В, Г и Б возрастает до 4,5–5 град.

Мощность, протекающая по сетям внешнего электроснабжения, может иметь как суточные, так и сезонные колебания. Из-за многообразия режимов работы

электрических сетей различных регионов затруднительно назвать какой-либо общий признак межподстанционных зон со значительными транзитными токами.

Наиболее эффективным способом отыскания таких зон является анализ результатов контрольных замеров потокораспределения мощности в линиях внешнего электроснабжения и примыкающей к ним сети. Эта информация может быть получена по соглашению с региональным диспетчерским управлением (РДУ).

Если данных РДУ недостаточно для составления полной картины изменения транзитного тока в течение суток, то дополнительно могут быть использованы результаты контрольных замеров.

Методы расчета транзитных токов. В реальных условиях для расчета транзитного тока в тяговой сети требуется учитывать влияние смежных плеч в трансформаторах тяговых подстанций (ТП), возможное неравенство их коэффициентов трансформации, а также наличие устройств продольной и поперечной компенсации. Кроме того, не всегда смежные ТП связаны друг с другом одной линией электропередачи.

Как показывают исследования, наиболее точно транзитные токи в тяговой сети могут быть учтены при совместном моделировании системы тягового и внешнего электроснабжения, что является трудоемкой процедурой [4–9]. Такой расчет может быть выполнен, например, с помощью программ РАСТ-05К, Fazonord, а также с помощью пакета MATLAB-Simulink. Программа РАСТ-05К позволяет рассчитывать установившиеся нормальные и аварийные режимы систем внешнего и тягового электроснабжения [6, 7]. Программа Fazonord дополнительно позволяет моделировать

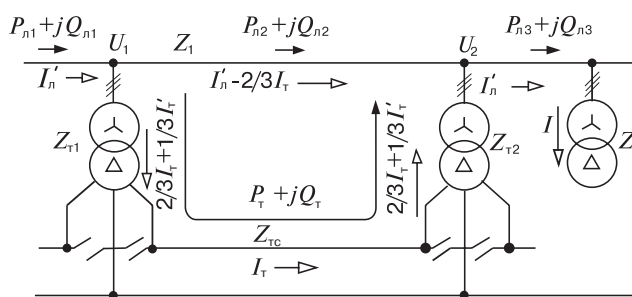


Рис. 1. Схема протекания транзитной мощности по тяговой сети: P_{n1}, P_{n2}, P_{n3} — активные мощности на участках линии питания; Q_{n1}, Q_{n2}, Q_{n3} — реактивные мощности на участках линии питания; P_T, Q_T — активная и реактивная мощности тяговой сети; I'_n, I_T — токи линии питания и тяговой сети; Z_{T1}, Z_{T2} — сопротивления тяговых трансформаторов; I, Z_3 — ток и сопротивление районной нагрузки; $1/3 I'_n$ — составляющая транзитного тока, протекающая по двум другим фазам Δ

Fig. 1. The scheme of the transit power through the traction network: P_{n1}, P_{n2}, P_{n3} — active power on the sections of the power line; Q_{n1}, Q_{n2}, Q_{n3} — reactive power in the power line sections; P_T, Q_T — active and reactive power of the traction network; I'_n, I_T — currents of the power line and traction network; Z_{T1}, Z_{T2} — resistance of traction transformers; I, Z_3 — current and resistance of the district load; $1/3 I'_n$ — component of the transit current flowing through the other two Δ phases

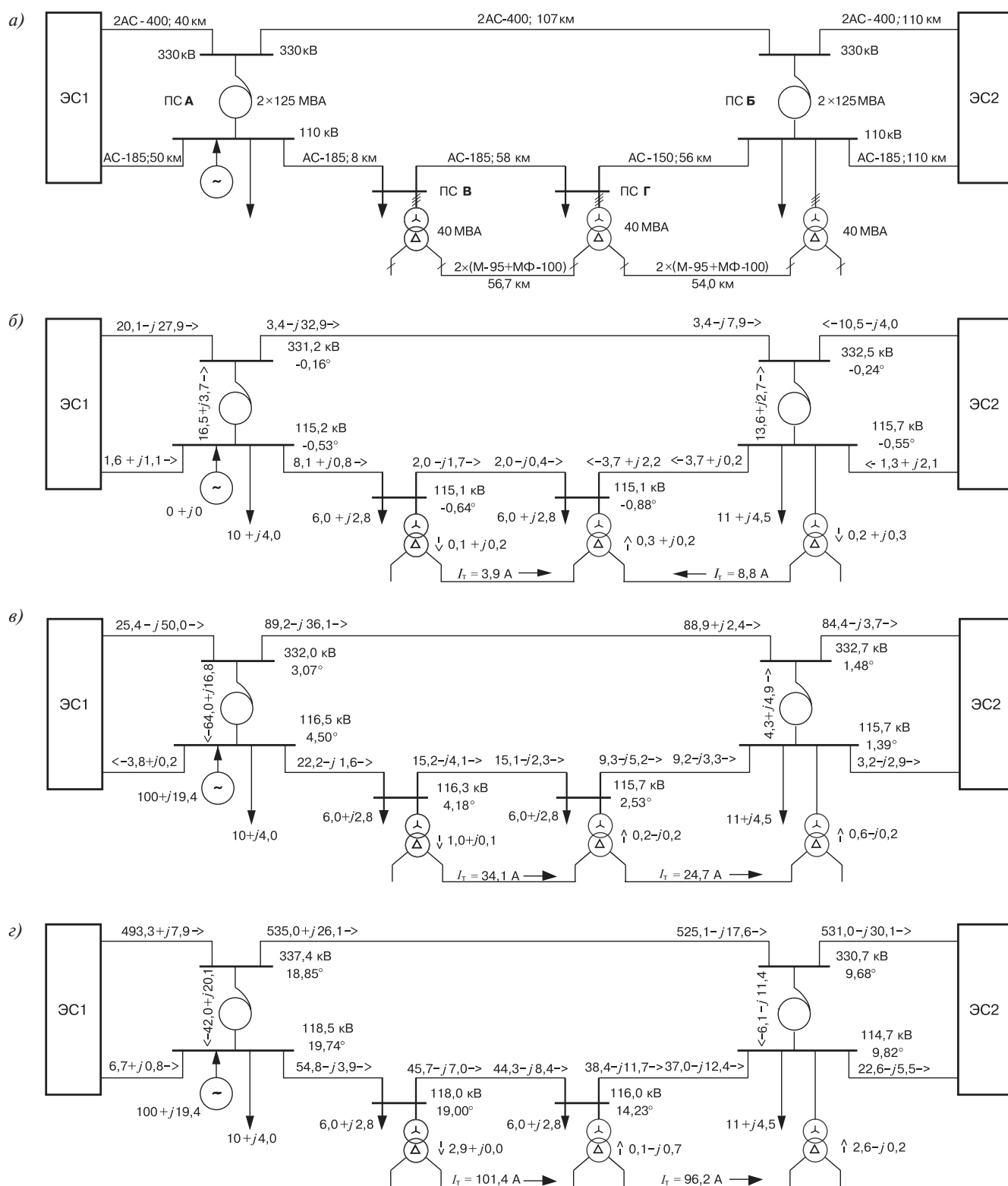


Рис. 2. Схема распределения потоков мощности в сети:

а — параметры сети; б) — распределение при отсутствии местной генерации и перетока между энергосистемами; в) — распределение при перетоке между энергосистемами 500 МВт; г) — ток тяговой сети; цифры над линиями — мощности: активная, МВт, и реактивная, Мвар; цифры у шин подстанций — напряжение, кВ, и угол, эл. град.

Fig. 2. The scheme of power distribution in the network:

а — network parameters; б — distribution in the absence of local generation and flow between power systems; в — distribution with local generation; г — distribution during the flow between power systems 500 MW; I_t — traction network current; figures above the lines — power: active, MW, and reactive, Mvar; the figures for the buses of substations — voltage, kV, and angle, el. deg.

движение поездов по участку. Для этого используется метод равномерного сечения графика движения поездов [8]. MATLAB-Simulink является универсальным исследовательским пакетом. С его помощью можно выполнять как расчеты установившихся режимов [4], так и моделировать движение поездов методом равномерного сечения графика движения [5]. В последнем случае, однако, велики затраты машинного времени. Во всех вышеперечисленных программах совместный расчет систем тягового и внешнего электроснабжения выполняется в фазных координатах.

Расчет транзитных токов с помощью пакета КОРТЭС. Указанные программы, однако, имеют малое распространение и применяются разработчиками преимущественно для решения научных или учебных задач. В то же время в проектной и эксплуатационной работе широко применяется пакет КОРТЭС [10]. Влияние системы внешнего электроснабжения в этом пакете учитывается упрощенно, путем задания мощности трехфазного короткого замыкания на вводе каждой подстанции. В [11] показано, что такой учет может стать причиной появления значительной методической погрешности. Ниже предлагается инженерная методика учета влияния транзитных токов при использовании пакета КОРТЭС с дополнительными измерениями для расчета.

В контрольных замерах приводится суммарная мощность, потребляемая данной подстанцией из сети 110 кВ и выше. Например, для подстанции В из рис. 2, б она будет равна $6,1+j3,0$ МВА, а из рис. 2, в — $7,0+j2,9$ МВА. Таким образом, для действующего участка ответвление части мощности в тяговую сеть будет уже учтено и известна разность напряжений на шинах смежных подстанций. В этом случае с учетом наиболее загруженных фаз тяговых трансформаторов можно вычислить величину транзитного тока

$$I_{\tau} = \frac{\Delta \dot{U}'_{12}}{2/3(\underline{Z}_{\tau 1} + \underline{Z}_{\tau 2}) + \underline{Z}_{\tau c}} = \frac{\Delta \dot{U}'_{12}}{\underline{Z}_2}, \quad (4)$$

где $\Delta \dot{U}'_{12}$ — разность напряжений между узлами подключения ТП, приведенная к стороне 27,5 кВ, В; $\underline{Z}_{\tau 1}$, $\underline{Z}_{\tau 2}$ — сопротивления трансформаторов подстанций, Ом; $\underline{Z}_{\tau c}$ — сопротивления тяговой сети, Ом; $\underline{Z}_2 = 2/3(\underline{Z}_{\tau 1} + \underline{Z}_{\tau 2}) + \underline{Z}_{\tau c}$ — эквивалентное сопротивление сети тягового электроснабжения межподстанционной зоны, Ом.

Полное сопротивление трансформатора $\underline{Z}_{\tau}$, Ом

$$\underline{Z}_{\tau} = 3 \left[\frac{\Delta P_{\kappa 3}}{S_{\text{н}}} + j \sqrt{\left(\frac{u_{\kappa}}{100} \right)^2 - \left(\frac{\Delta P_{\kappa 3}}{S_{\text{н}}} \right)^2} \right] \frac{U_2^2}{S_{\text{н}}} 10^{-3}, \quad (5)$$

где $\Delta P_{\kappa 3}$ — мощность потерь короткого замыкания в обмотках высшего напряжения (ВН) и 27,5 кВ трансформатора, кВт; $S_{\text{н}}$ — номинальная мощность

матратора, %; $U_2 = 27,5$ кВ. Схемы замещения, соответствующие выражению (4), приведены на рис. 3.

В пакете КОРТЭС для каждой ТП требуется задание приведенных сопротивлений энергосистемы $\underline{Z}'_{c1}$ и $\underline{Z}'_{c2}$ (рассчитываются пакетом через мощность трехфазного КЗ на вводах подстанции) и напряжений холостого хода $\dot{U}'_1$ и $\dot{U}'_2$ (рис. 3, б). Для обеспечения эквивалентности схем а и б рис. 3 предлагается откорректировать значения напряжений холостого хода таким образом, чтобы компенсировать увеличение полного сопротивления цепи транзитного тока. Скорректированное значение разности напряжений $\Delta \dot{U}'_{12\text{кр}}$ может быть определено по выражению

$$\Delta \dot{U}'_{12\text{кр}} = \frac{2/3(\underline{Z}_{\tau 1} + \underline{Z}_{\tau 2} + \underline{Z}'_{c1} + \underline{Z}'_{c2}) + \underline{Z}_{\tau c}}{2/3(\underline{Z}_{\tau 1} + \underline{Z}_{\tau 2}) + \underline{Z}_{\tau c}} \Delta \dot{U}'_{12}. \quad (6)$$

Вышеуказанный расчет позволяет адаптировать схему замещения (рис. 3, б) для устранения методической погрешности в связи с отсутствием связи между подстанциями по сети внешнего электроснабжения.

Сопротивление тяговой сети может быть определено средствами пакета КОРТЭС. Для этого необходимо выполнить расчет короткого замыкания на шинах одной из ТП, ограничивающих рассматриваемую межподстанционную зону. Сопротивление, замеренное на вводе РУ-27,5 кВ второй подстанции, и будет равно сопротивлению тяговой сети межподстанционной зоны.

Приведенное падение напряжений рассчитывается как разность питающих напряжений с учетом фактического коэффициента трансформации на каждой ТП

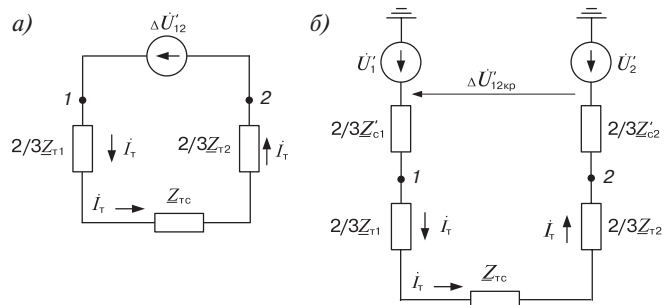


Рис. 3. Схемы замещения для цепи транзитного тока:

а — реальная; б — в пакете КОРТЭС;

1, 2 — узлы сети, к которым подключены тяговые подстанции; $\underline{Z}_{\tau 1}$, $\underline{Z}_{\tau 2}$ — сопротивления тяговых трансформаторов; $\underline{Z}'_{c1}$, $\underline{Z}'_{c2}$ — эквивалентные сопротивления источников питания, приведенные к стороне 27,5 кВ; $\dot{U}'_1$, $\dot{U}'_2$, $\Delta \dot{U}'_{12}$ — напряжения холостого хода эквивалентных источников питания и разность напряжений между узлами подключения тяговых подстанций, приведенные к стороне 27,5 кВ; $\underline{Z}_{\tau c}$, I_{τ} — сопротивление и ток тяговой сети

Fig. 3. Replacement scheme for the transit current circuit:

а — real; б — in the KORTES package;

1, 2 — network units to which traction substations are connected; $\underline{Z}_{\tau 1}$, $\underline{Z}_{\tau 2}$ — resistance of traction transformers; $\underline{Z}'_{c1}$, $\underline{Z}'_{c2}$ — equivalent resistances of the power sources, reduced to the side of 27.5 kV; $\dot{U}'_1$, $\dot{U}'_2$, $\Delta \dot{U}'_{12}$ — idling voltage of equivalent power supplies and voltage difference between the traction sub-stations connected to the 27.5 kV side; $\underline{Z}_{\tau c}$, I_{τ} — resistance and current of traction network

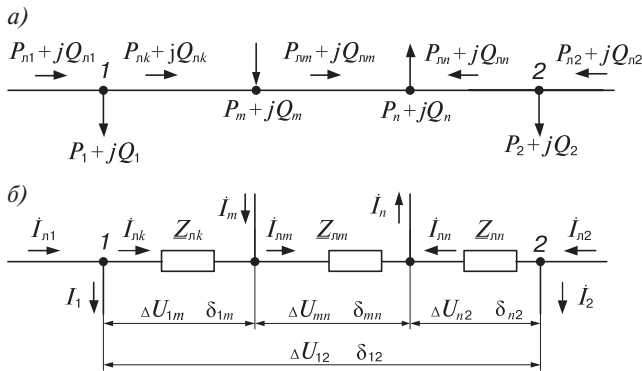


Рис. 4. Расчет падения напряжения между двумя узлами сети:
а — схема сети; б — схема замещения; 1, 2, m, n — узлы сети;
 $P_{n1}, P_{nk}, P_{nm}, P_{nn}, P_{n2}$ — активные мощности между узлами на линиях питания; $Q_{n1}, Q_{nk}, Q_{nm}, Q_{nn}, Q_{n2}$ — реактивные мощности между узлами на линиях питания; P_1, P_m, P_n, P_2 — активные мощности, генерируемые/потребляемые в узлах; Q_1, Q_m, Q_n, Q_2 — реактивные мощности, генерируемые/потребляемые в узлах; $I_{n1}, I_{nk}, I_{nm}, I_{nn}, I_{n2}$ — токи между узлами линий питания; I_1, I_m, I_n, I_2 — токи генерируемые/потребляемые в узлах; $\Delta U_{1m}, \Delta U_{mn}, \Delta U_{n2}, \Delta U_{12}$ — падения напряжения между узлами на линиях питания; $\delta_{1m}, \delta_{mn}, \delta_{n2}, \delta_{12}$ — изменение углов напряжений между узлами на линиях питания

Рис. 4. Calculation of the voltage drop between two units of the network:
а — network circuit; б — replacement circuit; 1, 2, m, n — network units;
 $P_{n1}, P_{nk}, P_{nm}, P_{nn}, P_{n2}$ — active power between units on power lines;
 $Q_{n1}, Q_{nk}, Q_{nm}, Q_{nn}, Q_{n2}$ — reactive power between units on power lines;
 P_1, P_m, P_n, P_2 — active power generated/consumed in the units;
 Q_1, Q_m, Q_n, Q_2 — reactive power generated/consumed in the nodes;
 $I_{n1}, I_{nk}, I_{nm}, I_{nn}, I_{n2}$ — currents between the units of power lines;
 I_1, I_m, I_n, I_2 — currents generated/consumed in the units;
 $\Delta U_{1m}, \Delta U_{mn}, \Delta U_{n2}, \Delta U_{12}$ — voltage drops between units on power lines;
 $\delta_{1m}, \delta_{mn}, \delta_{n2}, \delta_{12}$ — change of voltage angles between units on power lines

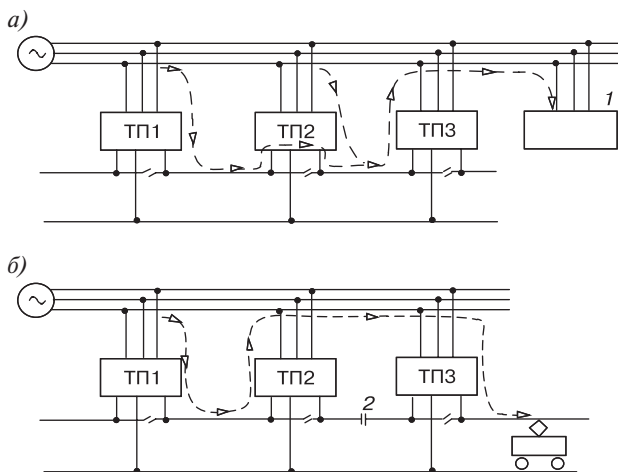


Рис. 5. Возможные пути транзитных токов тяговой сети:
а — при отсутствии тяговой нагрузки; б — при отсутствии районной нагрузки; ТП1, ТП2, ТП3 — тяговые подстанции;
1 — районная нагрузка; 2 — разрыв в контактной сети
Fig. 5. Possible ways of transit currents of the traction network.
а — in the absence of traction; б — in the absence of district load;
ТП1, ТП2, ТП3 — traction substations; 1 — district load;
2 — gap in the contact network

трансформатора, кВА; u_k — напряжение короткого замыкания между обмотками ВН и 27,5 кВ трансфор-

$$\Delta \dot{U}'_{12} = \frac{\dot{U}_1}{k_{r1}} - \frac{\dot{U}_2}{k_{r2}}, \quad (7)$$

где $\dot{U}_1, \dot{U}_2$ — напряжения на стороне ВН смежных ТП 1 и 2, кВ; k_{r1}, k_{r2} — коэффициенты трансформации ТП 1 и 2, определенные по фактическому положению РПН.

В результатах контрольных замеров не всегда приводится угол напряжения в узле. В случае отсутствия углов расчет их разности ведется по формулам (1–3) с алгебраическим суммированием δ отдельных ветвей, расположенных на пути от узла 1 до узла 2, как это показано на рис. 4.

В этом случае формула (6) примет вид

$$\Delta \dot{U}'_{12} = \frac{U_1}{k_{r1}} - \frac{U_2}{k_{r2}} e^{j \sum \delta}, \quad (8)$$

где $\sum \delta$ — алгебраическая сумма углов δ отдельных ветвей на пути от узла 1 до узла 2.

По откорректированным падениям напряжений рассчитываются приведенные напряжения ТП

$$\dot{U}'_N = \dot{U}'_{N-1} + \Delta \dot{U}'_{N-1N_{кр}}.$$

С использованием данной методики, где для расчета транзитных токов в тяговой сети дополнительно учитывают разность напряжений на высокой стороне тяговых подстанций, выполнены расчеты для двух участков Октябрьской и Восточно-Сибирской железных дорог. Результаты расчетов приведены в таблице. Там же указаны данные, полученные из совместного расчета системы внешнего (СВЭ) и тягового электропитания (СТЭ). Наибольшее расхождение результатов обычно наблюдается на первой и последней межподстанционных зонах расчетного участка. Однако во всех случаях при использовании описанной методики расхождение результатов не превышает 10 %.

Расчетная схема замещения для одной межподстанционной зоны (см. рис. 2) может быть представлена сопротивлением Z_1 , которое соответствует участку линии 110–330 кВ, равной длине межподстанционной зоны, и параллельно включенным сопротивлением Z_2 , соответствующим эквивалентному сопротивлению участка контактной сети и двух трансформаторов. Параллельно соединенные сопротивления Z_1 и Z_2 последовательно включены с нагрузкой транзитного потребителя (в нашем случае — районного потребителя), которая моделируется сопротивлением Z_3 . Все сопротивления приводятся к одному напряжению. Тогда транзитный ток, приведенный к напряжению контактной сети, может быть определен по выражению

$$\dot{I}_r = \frac{U_1 Z_1}{Z(Z_1 + Z_2)} = I_{ra} + jI_{rp} = I_r e^{j\varphi_r},$$

где $\varphi_r = \arctg(I_{rp} / I_{ra})$ — угол между током и питающим напряжением, если оно направлено вдоль вещественной оси; $Z = Z_1 Z_2 / (Z_2 + Z_1) + Z_3$ — полное сопротивление цепи.

Результаты расчета уравнивающих токов
Results of calculation of balancing currents

Межподстанционная зона	Транзитный ток, А	
	Расчет в КОРТЭС	Совместный расчет СТЭ и СВЭ
Белое Море — Княжая	15	14,5
Кузема — Кемь	47	43,8
Тайшет-Вост. — Невельская	47	45,0
Невельская — Новочунка	47	47,9

Счетчик электрической энергии ТП будет учитывать транзитный ток, протекающий по контактной сети, с $\cos\varphi_T$.

Коэффициент мощности транзитной энергии, протекающей по тяговой сети, как показали исследования, примерно равен коэффициенту мощности транзитной нагрузки, подключенной к линиям 110–330 кВ. Счетчики подстанции показывают сумму энергии транзита по контактной сети и энергии тяги.

При рассмотрении протекания транзитного тока на нескольких межподстанционных зонах его распределение зависит от наличия поездной и районной нагрузок, предельные случаи показаны на рис. 5. При отсутствии тяговой нагрузки на участке (рис. 5, а) примерно 80 % транзитного тока протекает через первую подстанцию, а через вторую примерно 20 %. Стеkanie транзитного тока в линию происходит в основном на последней подстанции. Чтобы исключить протекание транзитного тока, необходимо устраивать разрывы цепи для транзитных токов на межподстанционных зонах (рис. 5, б). Экспериментально транзитные токи можно определить при отсутствии тяговой нагрузки.

При отсутствии поездов активная мощность транзита, учитываемая счетчиками ТП, равна

$$P = U_{\text{кc}} I_T \cos\varphi_T,$$

где $U_{\text{кc}}$ — напряжение в контактной сети; I_T — ток транзита; $\cos\varphi_T$ — коэффициент мощности транзитной нагрузки.

Среднее значение транзитного тока можно получить по результатам измерения энергии счетчиками электрической энергии в часы, когда тяговая нагрузка отсутствует

$$I_T = \frac{\sqrt{W_p^2 + W_q^2}}{UT},$$

где W_p и W_q — активная и реактивная энергия транзита, передаваемая из контактной сети во внешнюю сеть.

Теоретическая оценка времени протекания транзитного тока по контактной сети без затекания в цепи подвижного состава или при частичном затекании возможна путем статистического анализа графика движения поездов и определения доли времени этих состояний или вероятности появления их $P_{\text{вт}}$ [12, 13].

Расчетное значение транзитной мощности, передаваемой по контактной сети, будет равно произведению транзитного тока I_T на напряжение в контактной сети $U_{\text{кc}}$

$$P_{\text{тр}} = I_T U_{\text{кc}},$$

а транзитная энергия — произведению мощности транзита на время $T = 24$ ч и на вероятность появления транзитного тока.

Выводы. 1. Энергия транзитных токов суммируется счетчиками электрической энергии, установленными на вводах тяговых подстанций и фидерах контактной сети, с энергией тяговой нагрузки.

2. Величина транзитной энергии определяется по приборам учета энергии на тяговой подстанции или по показаниям амперметров на фидерах тяговых подстанций при отсутствии тяговой нагрузки.

3. Транзит электрической энергии, протекающий из контактной сети во внешнюю сеть через понижающие трансформаторы тяговой подстанции необходимо учитывать счетчиками сальдированного учета электрической энергии.

4. Электрический разрыв цепи транзитного тока по контактной сети целесообразен при отсутствии тяговой нагрузки на рассматриваемой зоне.

5. Изменение напряжения на подстанциях не всегда приведет к положительному результату — уменьшению транзитного тока, так как он может возрасти на соседних межподстанционных зонах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Энергосбережение на железнодорожном транспорте: справочно-методическое издание / под ред. В. А. Гапановича. М.: Интхэнерго-Издат; Теплоэнергетик, 2014. 304 с.
2. Повышение эффективности сопряжения систем тягового и внешнего электроснабжения / В. Т. Черемисин [и др.] // Наука и транспорт. 2006. Спецвыпуск. С. 18–21.
3. Идельчик В. И. Электрические системы и сети: учеб. для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1989. 592 с.
4. Бурьяноватый А. И., Иванов М. А., Шаговик А. Е. Использование пакета MATLAB-Simulink для расчета режимов электрических сетей // Электрификация и развитие инфраструктуры энергообеспечения тяги поездов на железнодорожном транспорте: материалы VI Международного симпозиума «Элтранс-2011». СПб.: ПГУПС, 2013. С. 130–140.
5. Бурьяноватый А. И., Иванов М. А. Визуализация результатов расчетов системы тягового электроснабжения // Электрификация и организация скоростных и тяжеловесных коридоров на железнодорожном транспорте: материалы IV Международного симпозиума «Элтранс-2007». СПб.: ПГУПС, 2009. С. 97–101.
6. Герман Л. А., Кирушко К. В. Сравнение методов расчета системы тягового электроснабжения при разных способах учета параметров внешней сети // Вестник ВНИИЖТ. 2013. № 1. С. 16–21.
7. Герман Л. А., Попов Д. В., Кузнецов А. С. Продольная ёмкостная компенсация снижает уравнивающие токи // Локомотив. 2007. № 4. С. 45–46.
8. Закарюкин В. П., Крюков А. В. Сложнонесимметричные режимы электрических систем. Иркутск: Изд-во Иркутского ун-та, 2005. 273 с.

9. Kulworawanichpong T. Optimising AC electric railway power flows with power electronic control. PhD Thesis. The University of Birmingham, UK, 2003. 186 p.

10. Расчет пропускной способности электрифицированных железных дорог. Программа на ЭВМ: св-во о гос. регистрации в Роспатент № 2008615261 от 31.10.2008 / В. Е. Марский; правообладатель: ОАО «РЖД».

11. Герман Л.А., Кишкурно К.В., Субханвердиев К.С. Оценка погрешности расчета токов короткого замыкания в тяговой сети переменного тока. Электроника и электрооборудование транспорта. 2017. № 1. С. 5–10.

12. Бурьяноватый А.И., Варенцов В.М. Вероятности появления максимальных токов фидеров // Вестник ВНИИЖТ. 2014. № 1. С. 30–34.

13. Biesenak G., Hofmann S. Energiversorgung elektrischer Bahnen. Wiesbaden: Teubner Verlag, 2006. 729 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

ВАРЕНЦОВ Валерий Михайлович, канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроснабжение железных дорог», ПГУПС

БУРЬЯНОВАТЫЙ Аркадий Иванович, доцент кафедры «Электроснабжение железных дорог», ПГУПС

ИВАНОВ Михаил Александрович, старший преподаватель кафедры «Электроснабжение железных дорог», ПГУПС

Статья поступила в редакцию 18.04.2017 г., актуализирована 18.08.2017 г., принята к публикации 04.09.2017 г.

Energy accounting in AC substations in case of transit currents flowing through the contact network

V. M. VARENTSOV, A. I. BUR'YANOVATYY, M. A. IVANOV

Petersburg State Transport University (PGUPS), St. Petersburg, 190031, Russia

Abstract. The purpose of the work is to clarify the methodology for determining the electric power consumption of traction substations of AC electric power for the transit of external power supply. The conditions for the emergence of significant transit through traction networks of external power supply are revealed.

Using the example of the U-shaped scheme for the replacement of power transmission lines, it is shown that the inter-system power fluxes along the electric power transmission lines of the external power supply exert the greatest influence on the transit currents along the traction networks. For analysis, the local and transit components of the power flow are identified and a typical section of the electrical network is considered, containing three electrical connections at voltages of 330, 110 and 27.5 kV. In this case, the most significant factor affecting transit through the traction network is the transverse component of voltage drop, since its compensation in this network is difficult.

Methods for estimating the transit current of a traction network are given. An engineering technique for estimating the electric power consumption for transit by software is proposed. Authors show the necessity and possibility of using the KORTES package for estimating transit currents of the traction network caused by external power supply.

The results of calculations for two sections of different railways based on the data of the Regional Dispatch Office are presented. The influence of regional and traction loads on the path of transit currents is considered.

Obtained relationships and developed methodology allow estimating the electric power consumption of traction substations for the transit of the power of external power supply.

Keywords: voltage drop; transit current; accounting; electricity; traction network

DOI: <http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2017-76-5-294-300>

REFERENCES

- Gapanovich V.A. *Energy saving in railway transport*. Reference and methodical edition. Moscow, Intekhenenergo-Izdat Publ., Teploenergetik Publ., 2014, 304 p.
- Cheremisin V.T., Kondrat'ev Yu.V., Kvashchuk V.A., Kashtanov A.L. *Improving the efficiency of interfacing traction and external power supply systems*. Nauka i transport, 2006, special edition, pp. 18–21.
- Idel'chik V.I. *Electrical systems and networks*. A textbook for high schools. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1989, 592 p.
- Bur'yanovatyy A.I., Ivanov M.A., Shagovik A.E. *Using the MATLAB-Simulink package for calculating the modes of electrical networks*. Electrification and organization of high-speed and heavy-duty

corridors in railway transport. Proc. of the VI International Symposium "Eltrans-2011". St. Petersburg, PGUPS Publ., 2013, pp. 130–140.

5. Bur'yanovatyy A.I., Ivanov M.A. *Visualization of the results of calculations of traction power supply system*. Electrification and organization of high-speed and heavy-duty corridors in railway transport. Proc. of the IV International Symposium "Eltrans-2007". St. Petersburg, PGUPS Publ., 2009, pp. 97–101.

6. German L.A., Kirushko K.V. *Comparison of methods for calculating traction power supply system for different ways of accounting for external network parameters*. Vestnik VNIIZhT [Vestnik of the Railway Research Institute], 2013, no. 1, pp. 16–21.

7. German L.A., Popov D.V., Kuznetsov A.S. *Longitudinal capacitive compensation reduces equalizing currents*. Lokomotiv [Locomotive], 2007, no. 4, pp. 45–46.

8. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. *Difficult asymmetric modes of electrical systems*. Irkutsk, Irkutsk University Publishing, 2005, 273 p.

9. Kulworawanichpong T. *Optimizing AC electric railway power flows with power electronic control*. PhD Thesis. The University of Birmingham, UK, 2003, 186 p.

10. Mar'skiy V.E. *Calculation of the throughput of electrified railways*. Computer program: certificate of state registration in Rospatent no. 2008615261 dated October 31, 2008, Moscow (in Russ.).

11. German L.A., Kishkurno K.V., Subkhanverdiev K.S. *Estimation of the error of calculation of short-circuit currents in an AC traction network*. Elektronika i elektrooborudovaniye transporta, 2017, no. 1, pp. 5–10.

12. Bur'yanovatyy A.I., Varentsov V.M. *Probabilities of the occurrence of maximum feeder currents*. Vestnik VNIIZhT [Vestnik of the Railway Research Institute], 2014, no. 1, pp. 30–34.

13. Biesenak G., Hofmann S. *Energiversorgung elektrischer Bahnen*. Wiesbaden, Teubner Verlag, 2006. 729 p.

ABOUT THE AUTHORS

Valeriy M. VARENTSOV, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department "Electricity supply of railways", PGUPS

Arkady I. BUR'YANOVATYY, Associate Professor of the Department "Electricity supply of railways", PGUPS

Mikhail A. IVANOV, Senior Lecturer of the Department "Electricity supply of railways", PGUPS

Received 18.04.2017

Revised 08.08.2017

Accepted 04.09.2017

■ E-mail: elsnabgd@mail.ru (V.M. Varentsov)

Результаты испытаний по показателю внешнего шума электровозов на стоянке

М. Ю. НОСКОВ, М. М. ГИНШПАРГ, Н. С. НЕСТЕРОВ

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

Аннотация. В статье представлены результаты испытаний электровоза переменного тока, находящегося в стационарном режиме, по показателю внешнего шума и описана методика проведения данных испытаний. В ходе проведенных исследований установлены уровни звука в точках измерения и выявлены точки, где наблюдается превышение нормативных значений шума. Авторами предлагается привести техническое состояние оборудования, такого как тяговый трансформатор, преобразователь и модуль охлаждения тягового двигателя машинного отделения электровоза, в соответствие с нормативной документацией. С целью обеспечения нормативного запаса по показателю внешнего шума электровоза предложено использовать в его конструкции звукопоглощающий материал.

Ключевые слова: электровоз; переменный ток; внешний шум; измерительное оборудование; измерение; шум на стоянке; методика

Введение. Одним из неблагоприятно воздействующих на окружающую среду факторов, обусловленных функционированием железнодорожного транспорта, является генерируемый им шум не только при движении, но и на стоянке при работе вспомогательного оборудования локомотивов. В связи с отсутствием дизель-генераторной установки на электровозах они по сравнению с тепловозами считаются менее шумными. Вместе с тем работа вентиляторов охлаждения электрооборудования и тяговых двигателей, компрессорной установки является источником интенсивного шума, особенно на электровозах переменного тока [1–3]. Генерируемый шум электровоза может оказывать маскирующее воздействие, например, на шум приближающегося по соседнему пути подвижного состава, речевые сообщения, передаваемые по системе громкоговорящего оповещения, а также вызвать повышенную утомляемость у пассажиров и т. д. Следует отметить, что проблеме снижения шума электровозов уделяется значительное внимание за рубежом, и в частности в рамках Международного союза железных дорог [4, 5]. Поэтому задача обеспечения нормативных требований к уровню шума оборудования электровозов, работающих на стоянке, является актуальной.

Авторами на Экспериментальном кольце АО «ВНИИЖТ» проведены испытания магистраль-

ных электровозов, предназначенных для обеспечения вождения грузовых поездов на участках пути электрифицированных на переменном токе с напряжением 25 кВ (электровозы переменного тока), по показателю уровень внешнего шума на стоянке.

Методы проведения испытаний. Испытания проводились в естественных климатических условиях при температуре от -2 до $+1$ °С, относительной влажности воздуха от 63 до 70 %, атмосферном давлении от 757,3 до 769,2 мм.рт.ст. и скорости ветра от 2 до 5 м/с.

Методика проведения испытаний по определению показателя внешнего шума электровоза базировалась на требованиях ГОСТ 32203–2013 (ISO 3095:2005) «Железнодорожный подвижной состав. Акустика. Измерение внешнего шума». Для определения уровня звука внешнего шума электровозов на стоянке применялся метод прямого измерения уровня звука в децибелах по шкале А, L_{pA} , дБА при временной характеристике прибора «медленно». Микрофон устанавливался в 24 точках, расположенных на расстоянии $(7,5 \pm 0,05)$ м от оси измерительного участка пути с обеих сторон электровоза. Поскольку длина электровозов превышает 20 м, то были установлены дополнительные точки измерения на расстоянии не более 4,5 м друг от друга и напротив лобовых частей кабины машиниста под углом 45° к продольной оси пути.

Точки расположения измерительного микрофона выбирались с учетом размещения на электровозах оборудования, работающего на стоянке в режиме длительного отстоя.

В период проведения измерений на соседних путях других подвижных составов не находилось. Определение уровня звука внешнего шума проводилось при двух положениях микрофона в точках измерения: на высоте 1,2 м и 3,5 м от головки рельса.

До и после каждой серии измерений в данных точках проводилась калибровка измерительного тракта, а также измерялся уровень звука фонового шума.

Измеренные уровни звука L_{Ai} , дБА усреднялись для каждой точки в отдельности. Поскольку разность между наибольшим и наименьшим значениями уровня звука не превышает 3 дБА, то среднее значение уровня звука $\bar{L}_{Am}$ определяется по формуле:

$$\overline{L_{Am}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n L_{Ai}, \text{ дБА.}$$

где L_{Ai} — i -й из измеренных в данной точке уровней звука, дБА; $i = 1, 2, 3 \dots n$, где n — общее количество измерений в данной точке.

Схема точек расположения измерительного микрофона около электровоза переменного тока приведена на рисунке.

Результаты испытаний. Усредненные значения измеренных уровней звука $\overline{L_{Am}}$, дБА внешнего шума электровоза на стоянке и их нормативная оценка представлены в табл. 1 и 2. Нормативные значения уровня звука (не более 65 дБА) регламентированы ГОСТ Р 55364–2012 «Электровозы. Общие технические требования».

Таблица 1

Уровни звука внешнего шума электровоза переменного тока на стоянке (высота установки микрофона от уровня головки рельса 1,2 м)

Table 1

The sound levels of the external noise of the AC electric locomotive at standing (the height of the installation of the microphone from the level of the rail head is 1.2 m)

Номер точки измерения	Измеренные значения уровня звука L_{Ai} , дБА			Усредненные значения измеренных уровней звука $\overline{L_{Am}}$, дБА	Оценка соответствия требованиям ГОСТ Р 55364–2012
1	61,0	62,0	61,0	61,4	Соответствие
2	62,2	63,5	63,0	62,9	Соответствие
3	66,4	65,6	65,1	65,7	Превышение на 0,7 дБА
4	63,2	64,4	64,1	63,9	Соответствие
5	65,7	64,0	64,4	64,8	Соответствие
6	64,6	64,5	63,6	64,2	Соответствие
7	65,0	64,8	65,0	64,9	Соответствие
8	63,9	65,0	64,1	64,4	Соответствие
9	62,7	62,2	62,8	62,6	Соответствие
10	58,9	57,1	57,3	57,8	Соответствие
11	54,1	54,3	55,0	54,5	Соответствие
12	60,5	60,5	60,4	60,5	Соответствие
13	63,0	62,6	62,1	62,6	Соответствие
14	65,8	65,1	65,9	65,6	Превышение на 0,6 дБА
15	67,4	66,6	66,7	66,9	Превышение на 1,9 дБА
16	67,1	66,0	67,0	66,7	Превышение на 1,7 дБА
17	64,9	65,5	63,6	64,7	Соответствие
18	65,8	64,3	65,0	65,1	Превышение на 0,1 дБА
19	65,6	65,4	66,2	65,7	Превышение на 0,7 дБА
20	64,2	64,7	64,5	64,5	Соответствие
21	62,5	62,1	62,7	62,4	Соответствие
22	55,9	57,5	56,9	56,8	Соответствие
23	54,7	54,0	53,7	54,2	Соответствие
24	60,6	61,3	60,1	60,7	Соответствие

Таблица 2

Уровни звука внешнего шума электровоза переменного тока на стоянке (высота установки микрофона от уровня головки рельса 3,5 м)

Table 2

The sound levels of the external noise of the AC electric locomotive at standing (the height of the installation of the microphone from the level of the rail head is 3.5 m)

Номер точки измерения	Измеренные значения уровня звука L_{Ai} , дБА			Усредненные значения измеренных уровней звука $\overline{L_{Am}}$, дБА	Оценка соответствия требованиям ГОСТ Р 55364–2012
1	60,6	61,1	61,7	61,2	Соответствие
2	60,7	61,3	60,8	60,9	Соответствие
3	64,4	64,1	64,4	64,3	Соответствие
4	61,1	61,6	61,1	61,3	Соответствие
5	63,6	62,9	63,0	63,2	Соответствие
6	64,5	65,1	64,4	64,7	Соответствие
7	63,7	64,2	64,6	64,2	Соответствие
8	62,6	62,2	62,4	62,4	Соответствие
9	60,2	59,8	60,4	60,1	Соответствие
10	59,2	58,9	60,0	59,4	Соответствие
11	52,7	52,8	53,1	52,9	Соответствие
12	56,2	57,0	56,6	56,6	Соответствие
13	61,1	58,6	60,9	60,3	Соответствие
14	61,2	61,7	61,7	61,5	Соответствие
15	63,7	63,9	64,3	64,0	Соответствие
16	62,8	63,2	62,7	62,9	Соответствие
17	60,7	60,7	60,5	60,6	Соответствие
18	64,2	63,9	64,1	64,1	Соответствие
19	62,8	63,5	63,3	63,2	Соответствие
20	61,2	61,1	61,7	61,3	Соответствие
21	61,7	60,3	60,5	60,9	Соответствие
22	56,6	56,1	56,5	56,4	Соответствие
23	53,7	54,2	51,7	53,3	Соответствие
24	54,5	54,3	54,4	54,4	Соответствие

ки охлаждения преобразователя двигателей первой тележки (слева) и компрессора (справа);

– возле лобовых частей секций электровоза А и Б уровни звука внешнего шума составили от 54,2 до 54,5 дБА.

По результатам нормативной оценки данных испытаний внешнего шума электровоза было установлено следующее: уровень внешнего шума электровоза при работе оборудования в режиме длительного отстоя, измеренный на высоте 1,2 м от уровня головки рельсов, в точках 3, 14, 18, 19 (секция А) и 14 (секция Б) незначительно превышает требования ГОСТ Р 55364–2012 (менее 1 дБА), при этом погрешность измерения шумомера составляет ($\pm 0,7$ дБ). В точках 15 и 16 (секция Б) измеренные уровни звука превышают нормативные требования ГОСТ Р 55364–2012 на 1,9 и 1,7 дБА соответственно.

Уровень внешнего шума электровоза при работе оборудования в режиме длительного отстоя, измеренный на высоте 3,5 м от уровня головки рельсов, соответствует нормативным требованиям ГОСТ Р 55364–2012.

Сравнительный анализ результатов измерений значений уровней внешнего шума секций А и Б электровоза показал:

– в точках 3 и 4 (секция А), расположенных аналогично точкам 15 и 16 (секция Б), уровень шума (генерируемого оборудованием электровоза) ниже на 1,2 дБА в точках 3 и 15, а в точках 4 и 16 — на 2,8 дБА по отношению к его нормативному значению.

– в точке 2 (секция А), расположенной аналогично точке 14 (секция Б), шум, генерируемый оборудованием электровоза, ниже на 4,7 дБА по отношению к его нормативному значению;

– в точке 7 (секция Б), расположенной аналогично точке 19 (секция А), шум, генерируемый оборудованием электровоза, ниже на 0,8 дБА по отношению к его нормативному значению.

Это обстоятельство с учетом идентичности оборудования секций А и Б электровоза может свидетельствовать о правильности основных технических решений, заложенных в конструкцию электровоза переменного тока в части снижения уровня его внешнего шума.

В связи с этим было предложено привести в соответствие с требованиями нормативной технической документации техническое состояние оборудования машинного отделения, генерирующего шум при работе на стоянке, и повторно произвести измерения уровня внешнего шума.

После проведения дополнительного осмотра и технического обслуживания оборудования секций А и Б были произведены повторные измерения уровня внешнего шума на стоянке электровоза при установке микрофона на высоте 1,2 м от уровня головки рельса. В результате было установлено снижение уровня звука в вышеуказанных точках до нормативных тре-

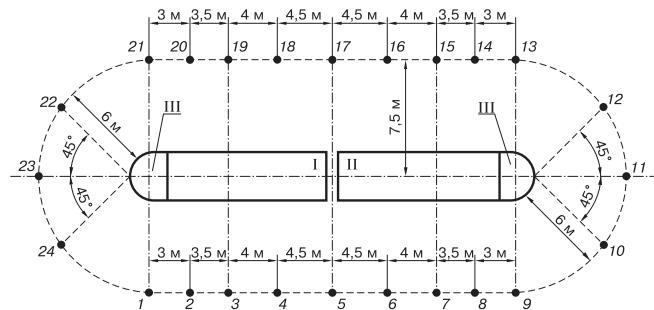


Схема расположения точек измерения внешнего шума (1–24) электровоза переменного тока на стоянке: I — секция А; II — секция Б; III — кабина машиниста
The layout of the measurement points for external noise (1–24) of an AC electric locomotive at the standing: I — section A; II — section B; III — driver's cab

бований — усредненные значения измеренных уровней звука в точках 3, 14, 18, 19 напротив секции А и в точках 15 и 16 напротив секции Б составили от 64,7 до 65 дБА (см. табл. 3).

Поскольку измеренные значения уровня звука $\overline{L_{Am}}$, дБА внешнего шума при работе оборудования в режиме длительного отстоя электровоза переменного тока находятся на пределе нормативного значения 65 дБА или ниже, но с незначительным запасом, то с целью снижения внешнего шума оборудования на пути его распространения во внешнюю среду необходимо применить дополнительные технические решения.

Использование звукопоглощающих конструкций. Независимо от пути, по которому шум проникает в помещение, одной из мер его уменьшения является звукопоглощение [6].

Под звукопоглощением понимается процесс преобразования энергии звуковых волн в тепловую энергию при распространении звука в среде или при

Таблица 3

Уровни звука внешнего шума электровоза на стоянке после технического обслуживания, при высоте установки микрофона от уровня головки рельса на 1,2 м

Table 3

The sound levels of the external noise of an electric locomotive at standing after maintenance, with the height of the microphone installation from the level of the railhead at 1.2 m

Номер точки измерения	Измеренные значения уровня звука L_{Ai} , дБА			Усредненные значения измеренных уровней звука $\overline{L_{Am}}$, дБА	Оценка соответствия требованиям ГОСТ Р 55364–2012
3	65,1	64,8	64,9	64,9	Соответствие
14	65,0	64,9	64,9	64,9	Соответствие
15	65,0	65,0	65,1	65,0	Соответствие
16	64,8	65,1	65,0	65,0	Соответствие
18	64,8	64,8	64,6	64,7	Соответствие
19	65,0	64,7	64,8	64,8	Соответствие

падении звука на границу двух сред. Звукопоглощающие материалы применяются в большинстве средств защиты от шума. Они входят в состав всех известных устройств для непосредственного поглощения звука, например, звукопоглощающая облицовка ограждающих конструкций. Звукопоглощающий материал в качестве заполнителя и уплотнителя щелей и отверстий используют для снижения шума, распространяющегося в каналах вентиляционных систем, для изоляции структурного звука и вибраций.

Известен опыт использования панелей из звукопоглощающих материалов в машинном отделении электровозов. В работе [7] отмечено, что повышенные уровни шума, создаваемые работающими агрегатами в отсеках компрессора, выпрямительного инверторного преобразователя, трансформатора, вспомогательной машины, в условиях заводов-изготовителей практически могут быть устранены только установкой звукопоглощающих панелей. Расчеты показывают, что такая эффективность в снижении уровней звукового давления может быть достигнута при использовании, например, шумоизоляционного облицовочного материала с липким монолитным слоем, обладающим коэффициентами звукопоглощения в высоком диапазоне частот 0,7–0,95.

Подбор звукопоглощающего материала осуществляется в зависимости от частотного диапазона, в котором наблюдается наибольшее превышение уровней шума над предельно допустимыми значениями, и от звукопоглощающих свойств материалов. Основным этапом определения указанного частотного диапазона является проведение измерений уровней звукового давления генерируемого шума в октавных полосах со среднегеометрическими частотами от 31,5 до 8 000 Гц. В отдельных случаях для уточнения границ частотного диапазона с превышением нормативных требований представляется целесообразным проведение измерений уровня звукового давления в третьоктавных полосах со среднегеометрическими частотами от 25 до 10 000 Гц или в полосах с более узкой шириной пропускания. Необходимо проводить определение спектрального состава шума, генерируемого работающим на стоянке оборудованием электровоза, как внутри машинного отделения, так и снаружи локомотива.

Выводы. 1. В результате проведенных исследований установлены основные источники внешнего шума при работе электровозов переменного тока (вентиляторы, предназначенные для охлаждения электрооборудования и тяговых электродвигателей, воздушные компрессоры, тяговый трансформатор и др.), его фактические значения, а также характер звукового поля вокруг электровозов.

2. Внешний шум при работе оборудования электровоза переменного тока на стоянке находится практически на пределе нормативного значения.

3. Одним из условий поддержания соответствия электровозов нормативным требованиям по уровню внешнего шума является надлежащий контроль технического состояния оборудования каждой его секции.

4. Перспективным направлением в части снижения внешнего шума электровозов представляется оборудование машинного отделения звукопоглощающими конструкциями. С целью снижения шума от оборудования в источнике его возникновения и на пути распространения шума во внешнюю среду необходимо проработать вопрос о дополнительном оборудовании машинного отделения электровоза звукопоглощающими конструкциями.

5. Рекомендуются для расчета акустических характеристик звукопоглощающих материалов проведение экспериментального исследования спектрального состава шума оборудования электровоза, работающего на стоянке, и результирующего внешнего шума в точках, расположенных снаружи и вокруг локомотива. Также звукопоглощающий материал необходимо подбирать и в зависимости от частотного диапазона, в котором наблюдается наибольшее превышение уровня шума над предельно допустимыми значениями, с использованием известных эмпирических и полуэмпирических зависимостей, на основании которых возможно предварительное определение его звукопоглощающих свойств в установленном нормативными документами частотном диапазоне.

6. После оборудования машинного отделения электровоза опытными звукопоглощающими конструкциями целесообразно провести повторные испытания по оценке уровня внешнего шума электровоза на стоянке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Способы снижения шума и вибраций при проектировании, производстве и эксплуатации железнодорожного подвижного состава / И. В. Колесников [и др.]. М.: ВНИИТ РАН, 2015. 216 с.
2. Подуст С. Ф. Анализ закономерностей шумообразования электропоездов // Вестник РГУПС. 2012. № 4. С. 42–45.
3. Колесников И. В., Пронников Ю. В. Экспериментальные исследования шума и вибрации в кабинах локомотивов // Вестник РГУПС. 2011. № 3. С. 153–156.
4. Vos Paul de. Railway Noise in Europe – State of the art report // International Union of Railways (UIC). Paris, March 2016. URL: https://docviewer.yandex.ru/?url=http%3A%2F%2Fwww.uic.org%2FIMG%2Fpdf%2Frailway_noise_in_europe_2016_final.pdf&name=railway_noise_in_europe_2016_final.pdf&lang=en&c=58de0aae5f4 (дата обращения: 14.12.2016 г.).
5. Commission Regulation (EU) No. 1304/2014 of 26 November 2014 on the technical specification for interoperability relating to the subsystem 'rolling stock — noise' amending Decision 2008/232/EC and repealing Decision 2011/229/EU. URL: <http://www.era.europa.eu/Document-Register/Pages/Noise-NOI-TSI.aspx> (дата обращения: 14.12.2016 г.).
6. Способы защиты от шума и вибрации железнодорожного подвижного состава / под ред. Г. В. Бутакова. М.: Транспорт, 1978. 231 с.
7. Подуст С. Ф. Обеспечение виброакустической безопасности локомотивных бригад при расчете и проектировании грузовых

электровозов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.26.01, 05.02.02. Ростов-на-Дону, 2013. 18 с.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

НОСКОВ Михаил Юрьевич,
заведующий лабораторией, АО «ВНИИЖТ»

ГИНШПАРГ Михаил Маркусович,
заведующий лабораторией, АО «ВНИИЖТ»

НЕСТЕРОВ Никита Сергеевич,
младший научный сотрудник, АО «ВНИИЖТ»

Статья поступила в редакцию 30.03.2017 г., актуализирована 15.06.2017 г., принята к публикации 01.07.2017 г.

Results of tests on the indicator of external noise of electric locomotives in the standing time

M. Yu. NOSKOV, M. M. GINSHPARG, N. S. NESTEROV

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

Abstract. The authors of the Test Loop of the JSC "VNIIZhT" had conducted tests of mainline electric locomotives intended for handling freight trains on sections of the road electrified with alternating current at a voltage of 25 kV (electric locomotives of an alternating current). Tests were conducted in terms of the level of external noise at the standing time.

The results of tests of AC electric locomotive, which was in a stationary mode, are presented in terms of the external noise index, and a methodology for performing these tests is described.

As a result of the conducted researches, the article establish the main sources of external noise in the operation of AC electric locomotives (fans intended for cooling electrical equipment and traction motors, air compressors, traction transformers, etc.), its actual values, as well as the nature of the sound field around electric locomotives. The analysis of the obtained sound field made it possible to identify the points where the excess of the standard noise values (more than 65 dBA) is observed. It is proposed to bring the technical condition of the equipment, such as traction transformer, converter and cooling module of the traction engine of the power compartment of an electric locomotive in accordance with the normative documentation. The repeated measurements of the external noise level after technical completion did not reveal the excess of its normative values in accordance with the regulatory documentation. In order to provide a normative margin in terms of the external noise of an electric locomotive, it is proposed to use sound-absorbing material in the construction of its body. It is recommended to perform an experimental study of the spectral composition of the noise of the equipment of an electric locomotive operating at the standing time and the resulting external noise at points located outside and around the locomotive in order to calculate the acoustic characteristics of sound-absorbing materials. Sound absorbing material is expedient to be selected depending on the frequency range in which the greatest excess is observed above the maximum permissible values using known empirical and semi-empirical dependences, on the basis of which it is possible to preliminary determine its sound-absorbing properties in the frequency range established by regulatory documents. After equipping the power compartment of the locomotive with soundproof materials, tests on the evaluation of the external noise of an electric locomotive at standing should be repeated.

Keywords: electric locomotive; alternative current; external noise; measuring equipment; measurement; noise at standing; methods

DOI: <http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2017-76-5-301-305>

E-mail: noskov.mikhail@vniizht.ru (M. Yu. Noskov)

REFERENCES

1. Kolesnikov I. V., Dugin G. S. *Sposoby snizheniya shuma i vibratsiy pri proektirovanii, proizvodstve i ekspluatatsii zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava* [Methods of reducing noise and vibration in the design, manufacture and operation of railway rolling stock]. Moscow, VINITI RAN Publ., 2015, 216 p.
2. Podust S. F. *Analiz zakonomernostey shumooobrazovaniya elektropoezdov* [Analysis of the patterns of noise generation of electric trains]. Vestnik RGUPS, 2012, no. 4, pp. 42–45.
3. Kolesnikov I. V., Pronnikov Yu. V. *Eksperimental'nye issledovaniya shuma i vibratsii v kabinakh lokomotivov* [Experimental studies of noise and vibration in cabins of locomotives]. Vestnik RGUPS, 2011, no. 3, pp. 153–156.
4. Vos P. *Railway Noise in Europe – State of the art report*. International Union of Railways (UIC). Paris, March 2016. URL: https://docviewer.yandex.ru/?url=http%3A%2F%2Fwww.uic.org%2FIMG%2Fpdf%2Frailway_noise_in_europe_2016_final.pdf&name=railway_noise_in_europe_2016_final.pdf&lang=en&c=58de0aaae5f4 (retrieved on 14.12.2016).
5. *Commission Regulation (EU) No 1304/2014 of 26 November 2014 on the technical specification for interoperability relating to the subsystem 'rolling stock – noise' amending by Decision 2008/232/EC and repealing by Decision 2011/229/EU*. URL: <http://www.era.europa.eu/Document-Register/Pages/Noise-NOI-TSI.aspx> (retrieved on 14.12.2016).
6. Butakov G. V. *Sposoby zashchity ot shuma i vibratsii zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava* [Ways of protection from noise and vibration of railway rolling stock]. Moscow, Transport Publ., 1978, 231 p.
7. Podust S. F. *Obespechenie vibroakusticheskoy bezopasnosti lokomotivnykh brigad pri raschete i proektirovanii gruzovykh elektrovozov*. Kand. tekhn. nauk diss. avtoref. [Providing vibroacoustic safety of locomotive crews in the calculation and design of freight electric locomotives. Cand. tech. sci. diss. synopsis], Rostov-on-Don, 2013, 13 p.

ABOUT THE AUTHORS

Mikhail Yu. NOSKOV,
Head of the Laboratory, JSC "VNIIZhT"

Mikhail M. GINSHPARG,
Head of the Laboratory, JSC "VNIIZhT"

Nikita S. NESTEROV,
Junior Researcher, JSC "VNIIZhT"

Received 30.03.2017

Revised 15.06.2017

Accepted 01.07.2017

Разработка алгоритма по определению коэффициента теплопередачи кузова изотермического транспортного средства на основе результатов анализа происходящих в нем теплообменных процессов

А.А. ГОЛУБИН¹, С.Н. НАУМЕНКО²

¹ Общество с ограниченной ответственностью «Центр безопасности информации» (ООО «ЦБИ»), Королев, 141090, Россия

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

Аннотация. В статье проанализированы теплообменные процессы, происходящие в кузове изотермического транспортного средства при определении коэффициента теплопередачи K методом внутреннего подогрева. Предложен алгоритм определения K , позволяющий вычислить его значение с точностью, не превышающей 5 %, при этом сократив длительность проведения эксперимента не менее чем в 6 раз. Приведены экспериментальные данные и результаты расчетов искомых значений K для кузовов изотермических транспортных средств.

Ключевые слова: определение коэффициента теплопередачи; экспресс-метод определения коэффициента теплопередачи; равновесный и неравновесный методы определения коэффициента теплопередачи; изотермические транспортные средства; теплотехнические испытания

Введение. В последние годы в нашей стране особенно остро встал вопрос экономии топливно-энергетических ресурсов. В связи с этим возросли требования к эффективности строительных материалов и конструкций, позволяющих обеспечить более высокое сопротивление теплопередаче и, соответственно, меньшие затраты на отопление в зданиях и сооружениях.

Применительно к изотермическим транспортным средствам, к которым прежде всего следует отнести кузова пассажирских вагонов, моторвагонного подвижного состава и кабин локомотивов, корпуса рефрижераторных контейнеров и вагонов, необходимо подчеркнуть, что от эффективности используемых в их конструкциях теплоизолированных материалов зависит продолжительность работы обеспечивающих заданный в них температурно-влажностный режим систем отопления и охлаждения воздуха, а следовательно, и величина затрат, приходящаяся на электро- и топливопотребление.

Только при соответствии режимов работы энергетических установок нормативным параметрам теплоограждающих конструкций изотермическое

транспортное средство (ИТС) может быть признано энергоэффективным. Любой дебаланс в этой области в сторону ухудшения нормативных показателей теплоограждающих конструкций приведет в первую очередь к снижению ресурса или преждевременному выходу из строя энергетического оборудования, а в ряде случаев и к невозможности обеспечения в ИТС требуемых параметров микроклимата или заданного для перевозки скоропортящихся грузов с должным качеством температурного режима.

Поэтому нормативные характеристики, присущие теплоограждающим конструкциям ИТС, а также показатели эффективности работы энергетических установок во всем мире подлежат периодическому контролю и регламентируются соответствующими документами [1–4].

Основной нормативной величиной, характеризующей изотермические свойства теплоограждающих конструкций кузовов и корпусов ИТС, является значение коэффициента теплопередачи K (Вт/м²К), описываемое следующим выражением [5]:

$$K = \frac{Q}{H\theta}, \quad (1)$$

где Q — тепловой поток, расходуемый внутри кузова (корпуса), средняя поверхность которого равна H , и необходимый для поддержания при постоянном режиме абсолютной разности θ между средней внутренней температурой и средней наружной температурой, когда средняя наружная температура является постоянной.

Здесь следует пояснить, что в настоящее время в мировой практике применяются два принципиально различных способа для оценки теплотехнических качеств ограждений внутренних помещений кузовов ИТС, имеющих свои преимущества и недостатки.

По первому способу под K подразумевается общий коэффициент теплопередачи, учитывающий суммар-

ный теплообмен внутреннего помещения ИТС с окружающей средой как за счет теплопроводности λ элементов ограждения, так и за счет воздухообмена через неплотности кузова. Указанный способ не позволяет производить сравнительную оценку теплотехнических качеств каждого из отдельных элементов ограждения ИТС. Эта задача решается с помощью второго способа — с использованием тепловизора. В этом случае определяется не общий коэффициент теплопередачи K , а качественно оценивается коэффициент теплопроводности λ тех элементов ограждения, на которые направлена специальная видеокамера тепловизора, в которой интенсивность, а также цвет изображения элементов ограждения показывают, какой из элементов по отношению к другим пропускает больше или меньше тепла. Таким способом достаточно точно определяются дефектные элементы ограждений. Стремления исследователей различными способами применить получаемые результаты наблюдений видеокамерой для определения значений коэффициента λ и через него коэффициента K по целому ряду причин (субъективность цветового восприятия, зависимость цвета от температуры окружающей среды, трудность учета воздухообмена через неплотности кузова ИТС и т. д.) не дали необходимой точности результатов.

Поэтому в настоящее время в мировой практике оценка теплотехнического соответствия кузова ИТС осуществляется по первому способу.

Порядок проведения испытаний по определению K состоит в том, что воздух внутри кузова ИТС, помещенного в атмосферу с постоянной температурой, нагревают источником тепла определенной мощности P до такого состояния, при котором температура этого воздуха перестает расти и остается постоянной во времени. Достигнутое таким образом состояние воздуха представляет собой равновесный тепловой режим (равновесный метод). Величина K по равновесному методу определяется из выражения (1). Равновесный метод достаточно точный, максимальная погрешность определения K указанным методом не превышает +5 % [6].

Несмотря на очевидную простоту и мировое признание, опыты по определению K равновесным методом не только трудоемки, но и связаны со значительными простоями испытуемого транспортного средства в специальной теплоизолированной испытательной станции. Только непосредственно эксперимент продолжается не менее 3 сут. На практике, длительность проведения эксперимента равновесным методом не позволяет заводам-изготовителям ИТС проводить повсеместный контроль теплотехнического состояния кузовов. Кроме того, из-за невписывания по времени указанной процедуры в технологические процессы ремонта ИТС, в частности изотермических вагонов, контроль теплотехнических

характеристик кузовов вынужденно осуществляется выборочно [7]. Таким образом, минимизация продолжительности процедуры проведения испытаний ИТС по определению K является достаточно актуальной.

Способы решения. Ранее предпринимались многочисленные попытки определения K без использования специальной испытательной станции [8, 9], или при помощи менее длительных неравновесных методов, основанных на исключении из программы испытаний периода установившегося стационарного режима теплопередачи [10–12]. Но их общими недостатками в сравнении с равновесным методом стали значительная погрешность при определении K и несущественное сокращение длительности испытаний.

Решение. Предлагаемый в настоящей статье алгоритм определения K позволяет определить его с относительной погрешностью не более 5%, при этом значительно — до 11 ч — сократить время проведения испытаний.

Так, известно дифференциальное уравнение теплового баланса нагреваемых тел [13]

$$Wd\theta = (P - KH\theta)d\tau, \quad (2)$$

где W — водяной эквивалент тела, Вт/К; P — мощность нагревателя тела, Вт; K — коэффициент теплопередачи тела, Вт/м²К; H — геометрическая (средне-геометрическая) поверхность тела, м²; θ — перепад температур внутри и снаружи тела, К; τ — текущее время, ч.

Преобразуем его в виде

$$\frac{d\theta}{d\tau} = v_1 = \frac{P}{W} - \frac{KH}{W}\theta, \quad (3)$$

где v_1 — скорость изменения перепада температур тела.

При $v_1 = 0$ обеспечивается равновесный режим.

Обозначим в (3):

$$\frac{P}{W} = a; \quad \frac{KH}{W} = b,$$

тогда выражение запишется как

$$v_1 = a - b\theta. \quad (4)$$

Таким образом, получаем, что v_1 линейно зависит от θ .

Ранее [14] было замечено, что с момента включения нагревателя и до момента, когда выполняются условия уравнения (2), проходит некоторое время, в течение которого перепад температур θ изменяется в соответствии с уравнением

$$\theta = A\tau^B, \quad (5)$$

где τ — текущее время от момента включения нагревателя; A и B — параметры уравнения.

Тогда из (5) находим

$$\tau = \left(\frac{\theta}{A} \right)^{\frac{1}{B}}; d\tau = \frac{1}{A^{\frac{1}{B}}} \frac{1}{B} \theta^{\frac{1}{B}-1} d\theta; \quad (6)$$

$$v_2 = \frac{d\theta}{d\tau} = A^{\frac{1}{B}} B \theta^{\frac{1}{B}-1},$$

где v_2 — скорость изменения перепада температур тела на начальном участке после включения нагревателя.

Таким образом, с момента включения нагревателя до момента, при котором выполняются условия уравнения (2), изменение скорости v_2 происходит по кривой, описываемой степенной функцией уравнения (6). В момент, когда начинают выполняться условия уравнения (2), скорость v_1 начинает изменяться по прямой, описываемой уравнением (4). В этот момент происходит касание криволинейной степенной функции уравнения (6) и прямолинейной функции уравнения (4). При этом $v_2 = v_1$, и далее v_1 изменяется прямолинейно в соответствии с уравнением (4).

Обозначим параметры v , θ и τ точки касания соответственно через v_k , θ_k и τ_k .

Тогда

$$v_{2k} = A^{\frac{1}{B}} B \theta_k^{\frac{1}{B}-1} = v_{1k} = a - b\theta_k. \quad (7)$$

При известных параметрах точки касания можно уравнение касательной прямой выразить через параметры касаемого криволинейного уравнения исходя из равенства

$$v_2 - v_{2k} = v'_{2k} (\theta - \theta_k), \quad (8)$$

где v_2 и θ — текущие значения параметров; v_{2k} , v'_{2k} и θ_k — известные значения параметров в точке касания.

Отсюда

$$v_2 = v_{2k} - v'_{2k} (\theta - \theta_k). \quad (9)$$

Дальнейшие преобразования с учетом (4–6) позволяют получить выражение для K

$$K = (1-B) \frac{P}{A H \tau_k^B}. \quad (10)$$

Следует, однако, иметь в виду, что во время включения нагревательных элементов, начальная разность температур может не равняться нулю, а быть несколько выше нуля. В этом случае выражения (5) и (10) запишутся соответственно в виде

$$\theta = A(\tau_0 + \tau)^B; \quad (11)$$

$$K = (1-B) \frac{P}{A H (\tau_0 + \tau_k)^B}, \quad (12)$$

где τ_0 — время, соответствующее начальному значению разности температур θ_0 на момент включения нагревательных элементов: $\theta_0 = A\tau_0^B$.

Из выражения (12) видно, что значение K зависит от параметра B , который входит как в числитель, так и в знаменатель.

Известно [12], что при нагреве функция (5) является выпуклой. Это возможно только при значениях $B < 1$, т. к. при значениях $B = 1$ функция превращается в линейную типа $\theta = A\tau$, а при значениях $B > 1$ — в вогнутую функцию.

Таким образом, параметр B изменяется в пределах от 0 до 1.

При $B = 0$ значение разности температур $\theta = A\tau^0$ перестает зависеть от времени τ . Это означает, что перепад температур остается постоянным во времени и процесс нагрева не происходит.

Исследование зависимости параметра P/A [15] в уравнении (12) от параметра B , выполненное по результатам проведенных сравнительных экспериментов по определению K равновесным и экспресс-методом продолжительностью не более 11 ч (см. таблицу, п. 1–4, 7 и рисунок, поз. 1), показало его линейную зависимость вида

$$P/A = 1,237 B. \quad (13)$$

Обозначим

$$P/1,237 B = A_\alpha, \quad (14)$$

а значения τ_0 , соответствующее значению A_α , через $\tau_{0\alpha}$ и предположим, что среднее за эксперимент значение перепада температур θ_{cp} должно оставаться неизменным как при значениях τ_0 , так и при значениях $\tau_{0\alpha}$:

$$\begin{aligned} \theta_{cp} &= \sqrt{A(\tau_0)^B A(\tau_0 + \tau_n)^B} = \theta_{cp} = \\ &= \sqrt{A_\alpha(\tau_{0\alpha})^B A_\alpha(\tau_{0\alpha} + \tau_n)^B}, \end{aligned} \quad (15)$$

где τ_n — время окончания эксперимента.

Отсюда

$$\tau_{0\alpha} = -\tau_n \pm \sqrt{\tau_n^2 + 4(A/A_\alpha)^{\frac{2}{B}} (\tau_0^2 + \tau_0 \tau_n)}. \quad (16)$$

Данные о величинах τ_0 и $\tau_{0\alpha}$ приведены в таблице, п. 8 и 9. Из сравнения этих данных видно, что τ_0 и $\tau_{0\alpha}$ отличаются друг от друга на величину $\pm 0,2–0,3$ ч, что соответствует 4–5 % от величины τ_n и не превосходит принятую величину относительной погрешности.

В то же время известно, что K может меняться в пределах от нуля, когда теплообмен тела с окружающей средой отсутствует, до 1, когда вся мощность нагревательных элементов беспрепятственно уходит в окружающую среду через ограждающую поверхность тела.

Сравнение параметров B и K показывает, что при $B = 0$, когда разность температур остается неизменной, K равен 1, т. к. вся мощность нагревателей уходит в окружающую среду. Вместе с тем при $B = 1$ перепад

Составляющие уравнения теплового баланса при внутреннем нагреве ИТС
The components of the heat balance equation for internal heating of the ITS

№ п/п	Показатель	№ опыта											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	P , кВт	4,20	6,90	7,55	4,24	3,38	2,74	5,03	8,93	5,07	5,35	15,20	6,73
2	B	0,33	0,43	0,47	0,51	0,52	0,52	0,54	0,56	0,57	0,68	0,69	0,70
3	A	9,18	13,07	13,29	7,39	5,12	5,19	7,91	12,16	7,62	6,93	15,23	6,32
4	P/A	0,46	0,53	0,57	0,57	0,66	0,53	0,64	0,73	0,67	0,77	0,97	1,00
5	P/A_α	0,41	0,54	0,58	0,63	0,65	0,65	0,67	0,69	0,71	0,84	0,85	0,87
6	A_α	10,15	12,73	12,99	6,72	5,23	4,23	7,49	12,96	7,15	6,35	17,95	7,74
7	τ_n , ч	5,0	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0	5,5	11,0	7,0	5,5	11,0
8	τ_0 , ч	0,43	1,68	1,45	0,90	0,20	0,19	1,09	0,10	0,17	0,03	0,40	0,14
9	$\tau_{0\alpha}$, ч	0,24	1,86	1,57	1,29	0,19	0,39	1,29	0,08	0,13	0,04	0,26	0,08
10	$(1/1,237 B)/10$	2,41	1,85	1,72	1,59	1,55	1,54	1,49	1,45	1,41	1,19	1,18	1,15
11	$(\tau_0 + \tau_k)/10$	6,80	7,99	8,06	8,03	8,01	8,00	7,94	7,89	7,83	7,28	7,26	7,16
12	K_α , Вт/м ² К	0,67	0,56	0,53	0,49	0,48	0,48	0,46	0,44	0,43	0,32	0,32	0,29
13	K_p , Вт/м ² К	0,34	0,59	0,55	0,43	0,41	0,55	0,44	0,41	0,37	0,34	0,46	0,46
14	$(K_p - K_\alpha)/K_\alpha$, %	-0,49	-0,01	0,04	-0,13	-0,14	0,16	-0,04	-0,07	-0,12	0,06	0,47	0,56

температур прямо пропорционален времени нагрева. Это возможно только при отсутствии теплообмена с окружающей средой, когда $K = 0$.

Отсюда следует, что коэффициент теплопередачи K и параметр B взаимнопротивоположны, т. е.

$$K = 1 - B. \quad (17)$$

Как видно из выражения (12), в его правую часть входят комплексы $(1 - B)$, P/A и $1/H(\tau_0 + \tau_k)^B$.

Ранее (13) было показано, что комплекс $P/A = 1,237 B$. Очевидно, что для равенства K и $(1 - B)$ в выражении (12), произведение комплекса P/A и комплекса $1/H(\tau_0 + \tau_k)^B$ должно быть всегда равно 1.

Отсюда

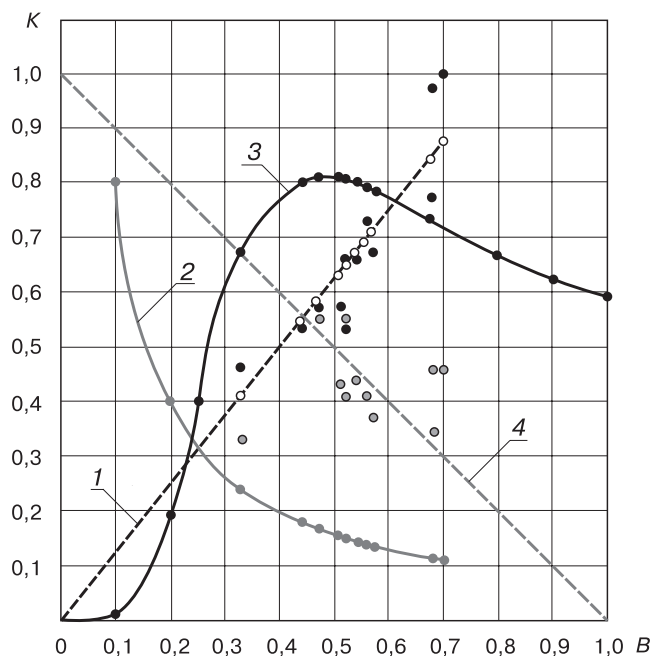
$$1/1,237 B = 1/H(\tau_0 + \tau_k)^B; \quad (18)$$

$$\tau_0 + \tau_k = \left(\frac{1,237 B}{H} \right)^{\frac{1}{B}}. \quad (19)$$

В таблице (п. 10 и 11) приведены значения параметров, рассчитанных по выражениям (18) и (19). Предлагаемый метод поясняется графическим изображением. На рисунке (поз. 2 и 3) приведены их графические изображения.

В таблице (п. 12 и 13) приведены значения коэффициента теплопередачи, определенные из выражения (12) — K_α , и методом равновесных режимов — K_p соответственно, а на рисунке (поз. 4) представлено графическое изображение K_α .

В таблице (п. 14) приведены значения величины $(K_p - K_\alpha)/K_\alpha$, из которых следует, что среднее отклонение K_p от K_α не превышает 2,4%.



Зависимость составляющих уравнения (12), определяющих величину коэффициента теплопередачи K : 1 — зависимость $P/A_\alpha = 1,237 B$; 2, 3 — кривые, описанные выражениями 18 и 19 соответственно; 4 — прямая, характеризуемая уравнением $K_\alpha = 1 - B$

The dependence of the components of equation (12), which determine the value of the heat transfer coefficient K : 1 — dependence $P/A_\alpha = 1,237 B$; 2, 3 — the curves described by expressions 18 and 19 respectively; 4 — straight line characterized by the equation $K_\alpha = 1 - B$

Таким образом, для определения коэффициента теплопередачи K необходимо определить параметр B и затем вычислить его по выражению (17).

Выводы. Использование алгоритма расчета по определению коэффициента теплопередачи изотермического транспортного средства позволит:

- значительно сократить длительность проведения испытаний;
- увеличить производительность испытательных станций;
- перейти от практикуемого в настоящее время выборочного контроля изготавливаемых или ремонтируемых изотермических транспортных средств к их сплошному контролю.

Применение экспресс-метода по определению K открывает возможности для эксплуатирующих компаний к организации электронного паспорта теплотехнического состояния для каждого кузова изотермического транспортного средства, контроль над которым дает возможность обеспечения энергооптимальных режимов работы энергетического оборудования, а следовательно, и увеличения его ресурса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р 55182–2012. Вагоны пассажирские локомотивной тяги. Общие технические требования. М.: Стандартинформ, 2013. 24 с.
2. СТ ССФЖТ ЦТ–ЦП129–2002. Локомотивы, моторвагонный и специальный подвижной состав железных дорог. Кабины, салоны, служебные и бытовые помещения. Методики испытаний по показателям систем обеспечения микроклимата. М., 2002. 56 с.
3. Соглашение о международных перевозках скоропортящихся пищевых продуктов и о специальных транспортных средствах, предназначенных для этих перевозок (СПС) / ООН. Нью-Йорк; Женева, 2015. 86 с.
4. Типовая методика по установлению температурных режимов и предельных сроков перевозки ОАО «РЖД» новых видов скоропортящихся грузов в изотермических транспортных средствах, кроме изотермических цистерн и контейнеров-цистерн, на особых условиях: утв. вице-президентом ОАО «РЖД» 04.12.2012 № 355.
5. Ибраев К. А., Дынга И. Г., Кондратьев А. В. Контроль и освидетельствование изотермических транспортных средств // Автотранспортное предприятие. 2006. № 9. С. 20–24.
6. Теймуразов Н. С., Науменко С. Н. Ускоренные методы оценки коэффициента теплопередачи кузовов изотермических транспортных средств // Вестник ВНИИЖТ. 2009. № 5. С. 18–21.

7. Коковихин А., Науменко С., Теймуразов Н. Перевозки продовольствия — нужны действия // РЖД — Партнер. 2006. № 2. С. 50–51.
8. Науменко С. Н., Теймуразов Н. С., Голубин А. А. Оценка точности определения в деполевских условиях коэффициента теплопередачи кузова изотермического вагона // Энергосбережение и защита окружающей среды на теплоэнергетических объектах железнодорожного транспорта, промышленности и жилищно-коммунального хозяйства: сб. докладов участников объединенной научной сессии советов РАН по проблемам «Тепловые режимы машин и аппаратов», «Теплофизика и теплоэнергетика», «Химико-физические проблемы энергетики». М.: МИИТ, 2008. С. 189–192.
9. Науменко С. Н., Теймуразов Н. С., Голубин А. А. Точность определения коэффициента теплопередачи // Железнодорожный транспорт на современном этапе. Задачи и пути их решения: сб. тр. молодых ученых и аспирантов по результатам работы конф. / под ред. А. Е. Семечкина. М.: ОАО «ВНИИЖТ», 2008. С. 76–78.
10. Иванов К. В., Лукшин А. Е. Оценка влияния тепловой инерции кузова рефрижераторного вагона при нестационарном подогреве // Труды ЦНИИ МПС. М.: Транспорт, 1972. Вып. 456. С. 80–87.
11. Бартош Е. Т., Иванов К. В. Метод неравновесных режимов для оценки инфильтрации кузова вагона // Труды ЦНИИ МПС. М.: Транспорт, 1972. Вып. 456. С. 100–109.
12. Бартош Е. Т. Энергетика изотермического подвижного состава. М.: Транспорт, 1976. 304 с.
13. Михеев М. А., Михеева И. М. Основы теплопередачи. М.: Энергия, 1977. 343 с.
14. Способ определения среднего коэффициента теплопередачи кузова транспортного средства: а.с. № 1730572 СССР / И. П. Екимовский, А. В. Коковихин, Н. С. Теймуразов и др. Опубл. 30.04.1992. Бюл. № 16. 11 с.
15. Голубин А. А. Анализ методов экспериментального определения коэффициента теплопередачи // Вопросы развития железнодорожного транспорта в условиях рыночной экономики: сб. статей молодых ученых и аспирантов / ВНИИЖТ; под ред. к.т.н. Ю. М. Черкашина и д.т.н. Г. В. Гогричиани. М.: Интекст, 2007. С. 99–107.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

ГОЛУБИН Алексей Александрович, инженер-испытатель отдела испытаний программных средств испытательной лаборатории, ООО «ЦБИ»

НАУМЕНКО Сергей Николаевич, д-р техн. наук, главный научный сотрудник, АО «ВНИИЖТ»

Статья поступила в редакцию 02.06.2017 г., принята к публикации 10.08.2017 г.

Development of an algorithm for determining the heat transfer coefficient of the body of an isothermal vehicle based on the results of analysis of the heat exchange processes occurring in it

A. A. GOLUBIN¹, S. N. NAUMENKO²

¹ Limited Liability Company "Information Security Center" (LLC "CBI"), Korolev, 141090, Russia

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

Abstract. The article analyzes the heat exchange processes occurring in the body of an isothermal vehicle when determining the heat transfer coefficient K by the internal heating method. The differences are shown in the values of the heat transfer coefficients obtained by the equilibrium internal heating method and

the thermal imaging method using a thermal imaging device. An algorithm for determining the heat transfer coefficient is proposed, which makes it possible to calculate its value with an accuracy not exceeding 5 %, which is regulated by a number of international normative documents, while reducing the duration of the experi-

ment by at least 6 times. The study gives comparative experimental data and results of calculating the unknown values of K for bodies of isothermal vehicles obtained by the equilibrium method and an express method based on the algorithm described in the article. It is shown that the use of the algorithm for calculating the heat transfer coefficient of the body of an isothermal vehicle will not only increase the productivity of testing stations, but will also lead to the organization of an electronic passport for the thermo-technical state for each body of an isothermal vehicle, the control of which will enable timely diagnosing the thermo-technical condition of the bodies of isothermal vehicles, providing energy-optimal operating modes of energy equipment and, hence, increasing its resource.

Keywords: determination of the heat transfer coefficient; express method for determining the heat transfer coefficient; equilibrium and non-equilibrium methods for determining the heat transfer coefficient; isothermal vehicles; heat engineering tests

DOI: <http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2017-76-5-306-311>

REFERENCES

1. GOST P 55182–2012. *Passenger cars of locomotive traction. General technical requirements*. Moscow, Standartinform Publ., 2013, 24 p. (in Russ.).
2. ST SSFZHT TsT–TsP129–2002. *Locomotives, motorized and special rolling stock of railways. Cabins, salons, service and household premises. Test methods for indicators of microclimate maintenance systems*. Moscow, 2002, 56 p. (in Russ.).
3. *Agreement on the International Carriage of Perishable Foodstuffs and on the Special Equipment to be Used for such Carriage (ATP)*. UN, New York and Geneva, 2015, 86 p.
4. *Typical methodology for establishing temperature regimes and the time limits for the transportation of new types of perishable goods by Russian Railways in isothermal vehicles, in addition to insulated tanks and tank-containers, under special conditions*. Approved by Vice-President of JSC “Russian Railways” on 04.12.2012 no. 355 (in Russ.).
5. Ibraev K. A., Dynga I. G., Kondrat'ev A. V. *Kontrol' i osvidetel'stvovanie izotermicheskikh transportnykh sredstv* [Inspection and inspection of insulated vehicles]. *Avtotransportnoye predpriyatiye*, 2006, no. 9, pp. 20–24.
6. Teymurazov N. S., Naumenko S. N. *Uskorennyye metody otsenki koeffitsienta teploperedachi kuzovov izotermicheskikh transportnykh sredstv* [Accelerated methods for estimating the coefficient of heat transfer of bodies of isothermal vehicles]. *Vestnik VNIIZhT* [Vestnik of the Railway Research Institute], 2009, no. 9, pp. 18–21.
7. Kokovikhin A. N., Naumenko S. N., Teymurazov N. S. *Perevozki prodovol'stviya – nuzhny deystviya* [Transportation of food – need action]. *RZD Partner*, 2006, no. 2, pp. 50–51.
8. Naumenko S. N., Teymurazov N. S., Golubin A. A. *Otsenka tochnosti opredeleniya v depovskikh usloviyakh koeffitsienta teploperedachi kuzova izotermicheskogo vagona* [Accuracy evaluation of determination in depot conditions of the heat transfer coefficient of the body of an isothermal car]. *Energoberezhenie i zashchita okruzhayushchey sredy na teploenergeticheskikh ob'ektakh zheleznodorozhnogo transporta, promyshlennosti i zhilishchno-kommunal'nogo khozyaystva*. Sb. dokladov uchastnikov ob"edinennoy nauchnoy sessii sovetov RAN po problemam “Teplovye rezhimy mashin i apparatov”, “Teplofizika i teploenergetika”, “Khimiko-fizicheskie problemy energetiki” [Energy saving and environmental protection at heat power facilities of railway transport, industry and housing and communal services. Coll. reports of the participants of the joint scientific session of the Councils of the Russian Academy of Sciences on the problems “Thermal regimes of machines and apparatuses”, “Thermophysics and heat power engineering”, “Chemical-physical problems of power engineering”]. Moscow, MIIT Publ., 2008, pp. 189–192.
9. Naumenko S. N., Teymurazov N. S., Golubin A. A. *Tochnost' opredeleniya koeffitsienta teploperedachi* [Accuracy of determination of heat transfer coefficient]. *Zheleznodorozhnyy transport na sovremennom etape. Zadachi i puti ikh resheniya* Sb. trudov molodykh uchennykh i aspirantov po rezul'tatam raboty konferentsii pod redaktsiei A. E. Semechkina [Railway transport at the present stage. Tasks and ways of their solution. Collection of works of young scientists and graduate students on the results of the conference, edited by A. E. Semechkin]. Moscow, JSC “VNIIZhT” Publ., 2008, pp. 76–78.
10. Ivanov K. V., Lukshin A. E., Bartosh E. T. *Otsenka vliyaniya teplovoi inertsii kuzova refrizheratornogo vagona pri nestatsionarnom podogreve*. *Trudy TsNII MPS*, vyp. 456. [Evaluation of the influence of thermal inertia of the body of a refrigerator car under non-stationary heating. Proc. of the Central Research Institute of the Ministry of Railways, no. 456]. Moscow, Transport Publ., 1972, pp. 80–87.
11. Bartosh E. T., Ivanov K. V. *Metod neravnovesnykh rezhimov dlya otsenki infil'tratsii kuzova vagona*. *Trudy TsNII MPS*, vyp. 456. [The method of nonequilibrium modes for evaluating the infiltration of the car body. Proc. of the Central Research Institute of the Ministry of Railways, no. 456]. Moscow, Transport Publ., 1972, pp. 100–109.
12. Bartosh E. T. *Energetika izotermicheskogo podvizhnogo sostava* [Energy of isothermal rolling stock]. Moscow, Transport Publ., 1976, 304 p.
13. Mikheev M. A., Mikheeva I. M. *Osnovy teploperedachi* [Fundamentals of Heat Transfer]. Moscow, Energiya Publ., 1977, 343 p.
14. Ekimovskiy I. P., Kokovikhin A. V., Krylov A. A., Kulikov S. K., Teymurazov N. S. *Sposob opredeleniya srednego koeffitsienta teploperedachi kuzova transportnogo sredstva*. A.s. no. 1730572 SSSR, published 30.04.1992, Bul. no. 16, 11 p. (in Russ.).
15. Golubin A. A. *Analiz metodov eksperimental'nogo opredeleniya koeffitsienta teploperedachi* [Analysis of methods for the experimental determination of the heat transfer coefficient]. *Voprosy razvitiya zheleznodorozhnogo transporta v usloviyakh rynochnoy ekonomiki*. Sb. statei molodykh uchennykh i aspirantov [Issues of the development of rail transport in a market economy. Coll. of articles by young scientists and graduate students]. Moscow, Intext Publ., 2007, pp. 99–107.

ABOUT THE AUTHORS

Aleksey A. GOLUBIN,

Test Engineer of the software testing department of the Test Laboratory of the Information Security Center, LLC “CBI”

Sergey N. NAUMENKO,

Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher, JSC “VNIIZhT”

Received 02.06.2017

Accepted 10.08.2017

■ E-mail: naumenko.sergey@vniizht.ru (S. N. Naumenko)

Моделирование вибродемпфирующих свойств упруговязкопластических слоев земляного полотна. Постановка задачи 2

В. М. БЕЛЬКОВ

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

Аннотация. Настоящая статья является продолжением работы [1], где рассмотрена модель вибродемпфирующих свойств земляного полотна на основной площадке подошвы балластной призмы нормированной толщины, защитной песчаной подушки и глинистых грунтов в условиях воздействия гармонических колебаний на основе физико-химической механики.

На базе линейного гармонического анализа волновых процессов в слоистых системах для балластного пути показано, что амплитуда смещения на границе «песок — суглинок» снижается в 26 раз в диапазоне частот 1–250 Гц. Вдоль шпалы возникают вторичные продольные и поперечные волны за счет «перекачки» энергии основной продольной волны в поперечную по контуру шпалы. В результате появляются циркуляционные потоки вдоль длины шпалы, необратимая деформация призмы и накопление дефектов в земляном полотне, возрастает пористость и вероятность выплесков балласта.

Устойчивость движения на балластной призме и ее межремонтный срок зависят от правильной организации водостоков, особенно в весенне-осеннее время.

Использование аппарата линейного гармонического анализа объясняется тем, что влияние нелинейных эффектов распространения волн в дисперсных материалах не успевает проявиться из-за крайне малых толщин материалов, составляющих земляное полотно.

Ключевые слова: вибродемпфирование; земляное полотно; упруговязкопластические свойства; гармонический анализ; вертикальные вибрационные волны

Введение. В работе [1] показано, что при анализе взаимодействия вагона и железнодорожного пути в каждом слое амплитуда и поглощение энергии гармонических колебаний за счет отражения на границе раздела слоистой механической системы будут иметь различные значения, отличные от начальной амплитуды смещения рельсов. Поэтому представлять земляное полотно как некую приведенную сосредоточенную массу, участвующую в колебаниях со шпалами и рельсами, неправильно для слоистых систем, не имеющих принципиально сосредоточенных масс. Кроме того, для возникновения колебаний в глинистом слое необходимо, чтобы под ним находилась среда, отражающая вертикальную продольную волну. Иначе обратная полуволна не сформируется, а ком-

прессионная волна уйдет вглубь грунта и превратится в итоге в тепло. Моделирование колебаний земляного полотна телом Кельвина — Фойгта может давать значительные погрешности и не выявляет истинные физические механизмы на стадии демпфирования упруговязкопластических свойств земляного полотна. За счет отражения деформационных волн от внешних поверхностей: торцов, боковых поверхностей шпалы — и их компенсации моделирование колебаний земляного полотна сводится к одномерной задаче.

Определения. Во всех средах распространяющаяся волна затухает вследствие потерь энергии колебаний, связанных с неупругими свойствами сред и рассеянием на неоднородностях среды. В самом общем случае с расстоянием амплитуда волны $A_i(x)$ меняется по закону [2, 3]

$$A_i(x) = A^0 e^{-\alpha_i z}; \quad \alpha_i = \frac{\omega}{v_i} \eta_i. \quad (1)$$

где A^0 — начальная амплитуда волны; z — вертикальная координата; ω — частота волны.

Для количественной оценки поглощения вибрационной волны на практике используют коэффициент потерь η , определяемый отношением энергии, поглощенной за один период колебаний $W_{\text{полг.}}$, к максимальной потенциальной энергии в системе $W_{\text{пот.}}$ [2]

$$\eta = \frac{1}{2\pi} \frac{W_{\text{полг.}}}{W_{\text{пот.}}}, \quad (2)$$

а также обратную величину — добротность $1/\eta$. Для конструкционных материалов (сталь, дюраль) коэффициент потерь имеет порядок 10^{-4} . Для реальных конструкций, выполненных из этих материалов, коэффициент потерь резко возрастает и составляет 10^{-2} , 10^{-3} , что объясняется дополнительными потерями в узлах соединений отдельных элементов конструкции. Для стали $\eta = 1,2 \cdot 10^{-4}$, для бетона $\eta = 10^{-3}$.

Условия на границе слоистой механической системы требуют равенства смещений (неразрывность сред) и равенства напряжений — условие неподвиж-

ности границы. Из этих условий вытекают равенства для границы раздела фаз [4]

$$(A_i + B_i) = A_{i+1} + B_{i+1}; \Omega_i = \frac{z_{i+1} - z_i}{z_{i+1} + z_i}, \quad (3)$$

где Ω_i — коэффициент отражения от границы раздела сред.

Знак минус у коэффициента отражения означает, что фаза отраженной волны меняется на противоположную по отношению к фазе падающей волны (рис. 1 а, б). Коэффициенты отражения вибрационной волны Ω_i на границах «металл — воздух», «бетон — воздух», «щебень — воздух», «полимерный материал — воздух» считаем равными 1. Эти допущения, как показывают оценки, справедливы для границ «твердое тело — воздух» с погрешностью $\sim 5 \cdot 10^{-4} \%$, для границ «полимер — воздух» $\sim 0,1 \%$. Величина Ω_2 (сталь/резина) с учетом данных в таблице равна

$$\begin{aligned} \Omega_2 &= \frac{z_2 - z_1}{z_2 + z_1} = \frac{\rho_2 v_2 - \rho_1 v_1}{\rho_2 v_2 + \rho_1 v_1} = \\ &= \frac{\rho_2 \sqrt{\frac{E_2(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)\rho_2}} - \rho_1 \sqrt{\frac{E_1(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)\rho_1}}}{\rho_2 \sqrt{\frac{E_2(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)\rho_2}} + \rho_1 \sqrt{\frac{E_1(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)\rho_1}}} = \\ &= \frac{1479 \sqrt{\frac{0,21 \cdot 10^{10} \cdot 0,62}{1479 \cdot 1,38 \cdot 0,24}} - 7870 \sqrt{\frac{20 \cdot 10^{10} \cdot 0,84}{7870 \cdot 0,75 \cdot 0,5}}}{1479 \sqrt{\frac{0,21 \cdot 10^{10} \cdot 0,62}{1479 \cdot 1,38 \cdot 0,24}} + 7870 \sqrt{\frac{20 \cdot 10^{10} \cdot 0,84}{7870 \cdot 0,75 \cdot 0,5}}} = -0,8. \end{aligned} \quad (4)$$

Величина Ω_3 (резина/бетон) равна

$$\Omega_3 = \frac{2700 \sqrt{\frac{6,7 \cdot 10^{10} \cdot 0,84}{2700 \cdot 1,16 \cdot 0,68}} - 1479 \sqrt{\frac{0,21 \cdot 10^{10} \cdot 0,62}{1479 \cdot 1,38 \cdot 0,24}}}{2700 \sqrt{\frac{6,7 \cdot 10^{10} \cdot 0,84}{2700 \cdot 1,16 \cdot 0,68}} + 1479 \sqrt{\frac{0,21 \cdot 10^{10} \cdot 0,62}{1479 \cdot 1,38 \cdot 0,24}}} = 0,29. \quad (5)$$

Периодическая сила, создающая колебания в резонаторах 1 и 2, приложена к рельсу (граница $z=0$, рис. 2). Механические напряжения T_i в слое определяются как [2, 3]

$$T_i = E_i S_i; S_i = \frac{du_i}{dz}; S_{yvi} = \frac{dU_i}{dz}, \quad (6)$$

где S_i — деформация в i -ом слое упругого материала; S_{yvi} — упруговязкая деформация в упруговязкопластичном материале.

Граничные условия для задачи моделирования. Дополним поставленную задачу взаимодействия деформационных волн в слоистой акустической системе (уравнения (1–7) [1]) граничными условиями для составного резонатора Р1 (рис. 3 [1]):

1) На границе $z=0$

$$T_1(0, \tau) = \frac{F(\tau)}{a_p a_{ш}}; u_1(0, \tau) = u_1(\tau); \quad (7)$$

$$S_1(0, \tau) = S_1(\tau) = \frac{du_1(\tau)}{dz},$$

где $F(\tau)$ — сила, нагружающая рельс в расчете на одну колесную пару, Н; $a_p, a_{ш}$ — ширина подошвы рельса и шпалы; u_1 — амплитуда смещения рельса; S_1 — деформация рельса.

2) На границе $z = h_p$

$$\begin{aligned} k_{pn} T_1(h_p) &= T_2(h_p); k_{pn} E_1 \frac{du_1}{dz} = E_2^* \frac{dU_2}{dz}; \\ u_1(h_p) &= U_2(h_p), \end{aligned} \quad (8)$$

где k_{pn} — коэффициент изменения акустической площади резиновой прокладки на шпале (20 см/27 см = 0,74; T_1, T_2 — напряжения в рельсе и в резиновой прокладке; h_p — высота рельса; E_1, E_2^* — модули Юнга рельса и резиновой прокладки; U_2 — амплитуда смещения упруговязкопластичной резиновой прокладки.

3) На границе $z = h_p + h_{np}$

$$\begin{aligned} k_{ш} T_2(h_p + h_{np}) &= T_3(h_p + h_{np}); k_{ш} E_2^* \frac{\partial S_2}{\partial z} = E_3 \frac{\partial S_3}{\partial z}; \\ U_2(h_p + h_{np}) &= u_3(h_p + h_{np}), \end{aligned} \quad (9)$$

где $k_{ш} = \frac{a_p a_{ш}}{a_{шш} L_{ш}}$ — коэффициент изменения акустической площади шпалы; $a_{шш}$ — ширина подошвы шпалы; $L_{ш}$ — длина шпалы; h_{np} — толщина резиновой прокладки; T_3 — напряжение в шпале; S_2 — деформация резиновой прокладки; S_3 — деформация шпалы; u_3 — амплитуда смещения шпалы.

Для составного резонатора Р2:

4) На границе $z = h_p + h_{np} + h_{ш}$

$$\begin{aligned} T_3(h_p + h_{np} + h_{ш}) &= k_{ш} T_4(h_p + h_{np} + h_{ш}); \\ E_3 \frac{\partial S_3}{\partial z} &= k_{ш} E_4^* \frac{\partial S_4}{\partial z}; u_3(h_p + h_{np} + h_{ш}) = \\ &= U_4(h_p + h_{np} + h_{ш}), \end{aligned} \quad (10)$$

где $k_{ш} = 0,2(1-\beta)$ — коэффициент изменения активной акустической площади щебеночного слоя или средняя удельная поверхность контакта щебня для среднего диаметра гранул (~ 45 мм) с плоскостью подошвы шпалы [5]; β — пористость щебня (0,45...0,6) [6]; T_4 — напряжение в щебеночном слое; E_3 — модуль Юнга шпалы; U_4 — амплитуда смещения щебеночного слоя; $h_{ш}$ — высота щебеночного слоя; S_4 — деформация щебеночного слоя.

5) На границе $z = h_p + h_{np} + h_{ш} + h_{шш}$

$$\begin{aligned} T_4(h_p + h_{np} + h_{ш} + h_{шш}) &= T_5(h_p + h_{np} + h_{ш} + h_{шш}); \\ E_4^* \frac{\partial S_4}{\partial z} &= E_5^* \frac{\partial S_5}{\partial z}; U_4(h_p + h_{np} + h_{ш} + h_{шш}) = \\ &= U_5(h_p + h_{np} + h_{ш} + h_{шш}), \end{aligned} \quad (11)$$

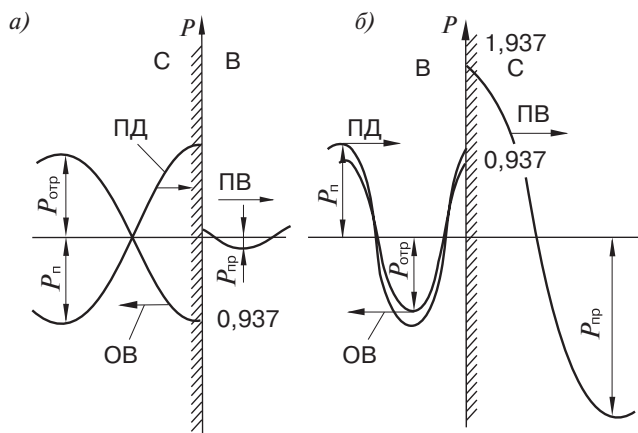


Рис. 1. Изменение величины амплитуды при отражении от границы «сталь—вода». Падающая волна: а — в стали; б — в воде; С — сталь; В — вода; ПД — падающая волна; ПВ — прошедшая волна; ОВ — отраженная волна; P — относительная амплитуда волны; P_n — амплитуда падающей волны; $P_{отр}$ — амплитуда отраженной волны; $P_{пр}$ — амплитуда волны, прошедшей через среду

Fig. 1. The change in magnitude of the amplitude upon reflection from the steel—water boundary. The incident wave: а — in steel; б — in the water; С — steel; В — water; ПД — falling wave; ПВ — transmitted wave; ОВ — reflected wave; P — relative wave amplitude; P_n — amplitude of the incident wave; $P_{отр}$ — amplitude of the reflected wave; $P_{пр}$ — amplitude of the wave transmitted through the medium

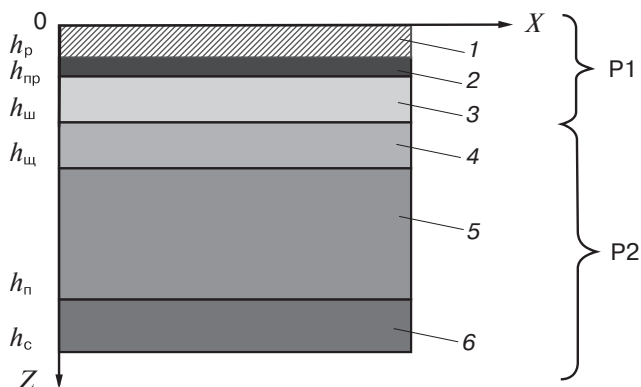


Рис. 2 (рис. 3 [1]). Схематическое изображение слоистой системы: 1 — рельс; 2 — подкладка; 3 — шпала; 4 — щебень; 5 — песчаная подушка; 6 — суглинок; P1, P2 — резонаторы

Fig. 2 (fig. 3 [1]). Schematic representation of a layered system: 1 — rail; 2 — pad; 3 — sleeper; 4 — crushed ballast; 5 — sand cushion; 6 — loam; P1, P2 — resonators

где E_4^* — модуль Юнга щебеночного слоя; E_5^* — модуль Юнга песчаного слоя; $h_{щ}$ — толщина щебеночного слоя; T_5 — напряжение в песчаном слое; S_5 — деформация песчаного слоя; U_5 — амплитуда смещения песчаного слоя.

Коэффициент изменения активной акустической площади границы между щебнем и песком примем равным 1, так как из-за вибрации при движении поездов происходит сепарация мелких фракций щебня вблизи границы $z = h_p + h_{пр} + h_{щ} + h_{ш}$, кроме того, песчаная фракция проникает в поровое пространство щебня, образуя не плоскую и резкую, а размытую границу.

б) На границе $z = h_p + h_{пр} + h_{щ} + h_{ш} + h_n$

$$T_5(h_p + h_{пр} + h_{щ} + h_{ш} + h_n) = T_6(h_p + h_{пр} + h_{щ} + h_{ш} + h_n);$$

$$E_5^* \frac{\partial S_5}{\partial z} = E_6^* \frac{\partial S_6}{\partial z}; U_5(h_p + h_{пр} + h_{щ} + h_{ш} + h_n) = U_6(h_p + h_{пр} + h_{щ} + h_{ш} + h_n), \quad (12)$$

где T_6 — напряжение в глинистом слое; E_6^* — модуль Юнга глинистого слоя; U_6 — амплитуда смещения глинистого слоя; S_6 — деформация глинистого слоя.

Коэффициент изменения активной акустической площади границы между песком и суглинком также примем равным единице, так как из-за вибрации при движении поездов происходит проникновение вязкоупругой глинистой среды в поровое пространство песчаной фракции с образованием размытой границы с плавным изменением импеданса среды вблизи границы $z_{5,6}$ песчаного и глинистого слоев соответственно.

Найдем функцию амплитуды смещения глинистого слоя $U_6(z)$ на границе $z = h_p + h_{пр} + h_{щ} + h_{ш} + h_n$, где h_n — толщина песчаного слоя.

Коэффициент ослабления вертикального смещения равен $K_{oi} = U_6(z) / u_1(0)$, и для этого решим совместно систему уравнений (1–7) [1], учитывая различные состояния щебня, песка и суглинка. Коэффициент ослабления вертикальных деформаций и напряжений на границе раздела в соответствии с данным уравнением будет равен

$$K_{osi} = \frac{dU_6}{du_1}; K_{oni} = \frac{E_6 dU_6}{E_1 du_1}. \quad (13)$$

Напряжение на границе «песок—суглинок» приводит к выплескам пути. Напряжение $E_6 dU_6$ — это давление, действующее в элементарном объеме на границе раздела. Вдоль оси X напряжения от каждой шпалы, как было показано выше, в основном компенсируются. По оси Y вблизи контура подошвы шпал при превышении суммы напряжения $E_6 dU_6$ и квазипостоянного напряжения величины предельного напряжения сдвига суглинка будет наблюдаться выплеск и уширение земляного полотна.

1) На границе 1 — поверхности катания ($z = 0$) рельс над шпалой смещается по оси Z при накатывании колеса

$$u_1(0, \tau) = u^0 e^{j\omega\tau}; S_1(0, \tau) = S_1(\tau) = \frac{du_1(\tau)}{dz};$$

$$T_1(0, \tau) = \frac{F(\tau)}{a_p a_{ш}}, \quad (14)$$

где u^0 — амплитуда смещения рельса. Для $z = 0$ и коэффициента отражения, равного 0, на поверхности контакта колеса и рельса из уравнения (14) находим уравнение падающей волны

$$u^0 e^{j\omega\tau} = A_1 e^{j\omega\tau}; A_1 = u^0, \quad (15)$$

где A_1 — амплитуда падающей волны в рельсе.

Смещение падающей волны $u_1(z, \tau)$ в рельсе отражается от границы 2, $z = h_p$ (поглощением энергии в металле рельса пренебрегаем, так как коэффициент поглощения $\eta_1 = 1,2 \cdot 10^{-4}$), высота рельса типа Р65 составляет 0,18 м, а величина $e^{-k_1 \eta_1 h_p} = e^{-10^{-6}} \cong 1$ для угловой частоты колебаний $\omega = 1570$ рад/с, тогда

$$B_1 e^{j(\omega \tau + k_1 h_p)} = u^0 \Omega_2 e^{j(\omega \tau - k_1 h_p)}; \quad B_1 = \Omega_2 u^0 e^{-2jk_1 h_p}, \quad (16)$$

где B_1 — амплитуда отраженной волны в рельсе; Ω_2 — коэффициент отражения резиновой прокладки.

Решая совместно (15) и (16), находим выражение для проходящей волны в слой 2 (резиновую прокладку) $u_1(h_p, \tau)$

$$u_1(h_p, \tau) = u^0 [1 + \Omega_2] e^{j[\omega \tau - k_1 h_p]}. \quad (17)$$

Волновое число для диапазона частот 1...250 Гц и металла (таблица) равно $k_1 = \omega / v_i = (6...1570) / 5100 = 1,2 \cdot 10^{-3} \dots 0,31$, произведение $k_1 h_p = 2,2 \cdot 10^{-4} \dots 5,6 \cdot 10^{-2}$, а фаза $Re(e^{-jk_1 h_p}) \approx 0$. Поэтому уравнение (17) на границе 2 для $\Omega_2 = -0,8$ [1] упрощается

$$u_1(h_p, \tau) = u^0 [1 + \Omega_2] e^{j\omega \tau} = 0,2 u^0 e^{j\omega \tau}. \quad (18)$$

Резиновая накладка между рельсом и шпалой уменьшает амплитуду смещения в 5 раз, а в системе «колесо — рельс» падающая и отраженная волны частично компенсируются, и возникнет волна вида

$$\Delta u = u^0 e^{j\omega \tau} - 0,8 u^0 e^{j\omega \left(\tau - \frac{h_p}{v}\right)} \cong 0,2 u^0 e^{j\omega \tau}.$$

2) На границе 2 (рельс — резиновая подкладка, $z = h_p$) с учетом уравнения (18)

$$u_1(h_p, \tau) = U_2(h_p, \tau) = 0,2 u^0 e^{j\omega \tau} = (C_2 e^{-j\Gamma_2 h_p} + D_2 e^{j\Gamma_2 h_p}) e^{j\omega \tau}, \quad (19)$$

где C_2, D_2 — комплексные коэффициенты падающей и отраженной от границы волны для второго слоя; Γ_2 — постоянная распространения в резиновой прокладке.

Падающая волна смещения $C_2 e^{-j\Gamma_2 z} e^{j\omega \tau}$ частично отражается от границы 3 ($z = h_p + h_{np}$)

$$\Omega_3 C_2 e^{j(\omega \tau - \Gamma_2 z)} = D_2 e^{j(\omega \tau + \Gamma_2 z)}; \quad D_2 = \Omega_3 C_2 \times e^{-2j\Gamma_2 (h_p + h_{np})}, \quad (20)$$

где Ω_3 — коэффициент отражения шпалы.

Тогда суммарное уравнение с учетом (19) и (20) на границе 3 будет иметь вид

$$U_2[(h_p + h_{np}), \tau] = \frac{0,2 u^0 (1 + \Omega_3) e^{-j\Gamma_2 h_{np}}}{1 + \Omega_3 e^{-2j\Gamma_2 h_{np}}} e^{j\omega \tau}. \quad (21)$$

Волновое число для резиновой подкладки (уравнение (7) [1]) равно

$$\Gamma_2 = \frac{\omega}{v_2} \eta_2 + j\gamma_2 = \frac{(6...1570)}{1479} [0,35 - 1,6 \cdot 10^{-4} (6...1570)] + j \frac{6...1570}{1479} = (4,1 \cdot 10^{-3} \dots 0,11) (0,35 \dots 0,05) + j (4,1 \cdot 10^{-3} \dots 1,1 \cdot 10^{-1}) = (1,44 \cdot 10^{-3} \dots 5,5 \cdot 10^{-3}) + j (4,1 \cdot 10^{-3} \dots 1,1 \cdot 10^{-1}). \quad (22)$$

Толщина подкладки составляет 0,01 м, а произведение в показателе степени выражения $e^{-j\Gamma_2 h_{np}}$ в правой части числителя (20) $\alpha_2 h_{np} = 1,44 \cdot 10^{-5} \dots 5 \cdot 10^{-5}$, а величина $\exp\left(-\frac{\omega h_{np}}{v_2} \eta_2\right) \cong 1$. В таких тонких подкладках ослабление амплитуды вибрации крайне мало, то же относится и к смещению фазы гармоник. Произведение $\gamma_2 \Omega_3 = -3,3 \cdot 10^{-3} \dots 8,8 \cdot 10^{-6} \ll 1$ в знаменателе уравнения (20). Поэтому с учетом оценок уравнение (20) упрощается

$$U_2[(h_p + h_{np}), \tau] = 0,2 (1 + 0,26) u^0 e^{j\omega \tau} = 0,25 u^0 e^{j\omega \tau}. \quad (23)$$

3) На границе 3 (резиновая подкладка — шпала, $z = h_p + h_{np}$) с учетом уравнения (23)

$$U_2(h_p + h_{np}) = u_3(h_p + h_{np}) = A_3 e^{j[\omega \tau - k_3 (h_p + h_{np})]} + B_3 e^{j[\omega \tau + k_3 (h_p + h_{np})]} = 0,25 u^0 e^{j\omega \tau}. \quad (24)$$

Падающая волна смещения $A_3 e^{j(\omega \tau - k_3 z)}$ отражается от границы 4

$$\Omega_4 A_3 e^{-jk_3 z} e^{j\omega \tau} = B_3 e^{j(\omega \tau + k_3 z)}; \quad B_3 = \Omega_4 A_3 e^{-j2k_3 (h_p + h_{np} + h_{ш})}; \quad z = h_p + h_{np} + h_{ш}. \quad (25)$$

Величина коэффициента отражения щебеночного слоя Ω_4 с учетом выражений (5–7) [1] рассчитывается по формуле

$$\Omega_4 = \frac{z_4 - z_3}{z_4 + z_3} = \frac{\rho_4 v_4 - \rho_3 v_3}{\rho_4 v_4 + \rho_3 v_3} = \frac{\rho_4 \sqrt{\frac{E_4(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)\rho_4^*}} - \rho_3 \sqrt{\frac{E_3(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)\rho_3}}}{\rho_4 \sqrt{\frac{E_4(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)\rho_4^*}} + \rho_3 \sqrt{\frac{E_3(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)\rho_3}}} = \frac{2700 \cdot 5000 - 950 \cdot 1479}{2700 \cdot 5000 + 950 \cdot 1479} = 0,81.$$

Уравнение смещения с учетом (24–26) на границе 4 будет иметь вид

$$u_3(h_p + h_{np} + h_{ш}) = \frac{0,25 u^0 (1 + \Omega_4)}{1 + \Omega_4 e^{-2jk_3 h_{ш}}} e^{j\omega \tau - jk_3 h_{ш}} \quad (27)$$

Волновое число для бетонной шпалы (таблица) равно $k_3 = \omega / v_3 = 6 \dots 1570 / 5000 = 1,2 \cdot 10^{-3} \dots 3,1 \cdot 10^{-1}$, толщина шпалы составляет 0,23 м, произведение $k_3 h_{ш} = 2,8 \cdot 10^{-4} \dots 7,1 \cdot 10^{-2}$. Фаза ($e^{-jk_3 h_p}$) в уравнении (5) [1] изменяется в интервале $2,8 \cdot 10^{-4} \dots 7,1 \cdot 10^{-2}$, что значительно меньше $\omega\tau = 6,28 \text{ с}^{-1} \cdot 1 \text{ с}$. В знаменателе уравнения (27) фаза ($e^{-2jk_3 h_p}$) изменяется в интервале $5,6 \cdot 10^{-4} \dots 0,14$, а значения $\sin(5,6 \cdot 10^{-4} \dots 0,14) \in (5,6 \cdot 10^{-4} \dots 0,14)$. Поэтому уравнение (27) можно упростить

$$u_3(h_p + h_{np} + h_{ш}) \cong 0,25u^0(1 + \Omega_4)e^{j\omega\tau} = 0,45u^0e^{j\omega\tau}. \quad (28)$$

4) На границе 4 (шпала — щебень, $z = h_p + h_{np} + h_{ш}$) с учетом уравнения (28)

$$u_3(h_p + h_{np} + h_{ш}) = U_4(h_p + h_{np} + h_{ш}) = C_4 e^{-j\Gamma_4(h_p + h_{np} + h_{ш})} e^{j\omega\tau} = 0,45u^0 e^{j\omega\tau}. \quad (29)$$

Коэффициент отражения на границе 5 между шпалой и щебнем равен

$$\Omega_5 = \frac{z_5 - z_4}{z_5 + z_4} = \frac{\rho_5^* v_5 - \rho_4 v_4}{\rho_5^* v_5 + \rho_4 v_4} = \frac{2040 \cdot 500 - 2700 \cdot 5000}{2040 \cdot 500 + 2700 \cdot 5000} = -0,86. \quad (30)$$

Падающая волна смещения $A_4 e^{j(\omega\tau - k_4 z)}$ отражается от границы 5

$$\Omega_5 A_4 e^{-jk_4 z} e^{j\omega\tau} = B_4 e^{j(\omega\tau + k_4 z)}; \\ B_4 = \Omega_5 A_4 e^{-j2k_4(h_p + h_{np} + h_{ш} + h_{ш})}; \\ z = h_p + h_{np} + h_{ш} + h_{ш}. \quad (31)$$

Уравнение смещения с учетом выражений (29–31) на границе 5 будет иметь вид

$$U_4(h_p + h_{np} + h_{ш} + h_{ш}) = \frac{0,45u^0(1 + \Omega_5)}{1 + \Omega_5 e^{-2jk_4 h_{ш}}} e^{j\omega\tau - jk_4 h_{ш}}. \quad (32)$$

Волновое число для слоя щебня (таблица) равно $k_4 = \omega / v_3 = 6 \dots 1570 / 500 = 1,2 \cdot 10^{-2} \dots 3,1$, толщина слоя щебня составляет 0,4 м, произведение $k_4 h_{ш} = 4,8 \cdot 10^{-3} \dots 1,2$. Фаза ($e^{-jk_4 h_p}$) в уравнении (5) [1] изменяется в интервале $4,8 \cdot 10^{-3} \dots 3,1$, что значительно меньше $\omega\tau = 6,28 \text{ с}^{-1} \cdot 1 \text{ с}$, а следовательно, фазу $\sin(\omega\tau - k_4 z)$ можно считать близкой к 0. Приведенные оценки для фазы ($e^{-jk_4 h_p}$) справедливы и для ($e^{-2jk_4 h_p}$). Поглощением энергии волны в бетоне можно пренебречь (см. таблицу). Поэтому уравнение (32) можно упростить

$$u_4(h_p + h_{np} + h_{ш} + h_{ш}) = 0,45u^0(1 + \Omega_5)e^{j\omega\tau} = 0,063u^0 e^{j\omega\tau}. \quad (33)$$

Для снижения амплитуды изгибных деформаций в шпале следует установить промежуточный материал — полимерную прокладку, выравнивающую на-

пряжения в объеме бетона между шпалой и щебнем и увеличивающую площадь акустического контакта [5]. При этом следует учитывать, что модуль упругости полимера заметно повышается, начиная со 100 Гц, и срок службы такой прокладки будет не выше пяти-шести лет.

5) На границе 5 (щебень—песок, $z = h_p + h_{np} + h_{ш} + h_{ш}$) с учетом уравнения (33)

$$u_4(h_p + h_{np} + h_{ш} + h_{ш}) = U_5(h_p + h_{np} + h_{ш}) = C_5 e^{-j\Gamma_5(h_p + h_{np} + h_{ш})} e^{j\omega\tau} = 0,063u^0 e^{j\omega\tau}. \quad (34)$$

Коэффициент отражения на границе 6 между песчаным слоем и щебнем равен

$$\Omega_6 = \frac{z_6 - z_5}{z_6 + z_5} = \frac{\rho_6^* v_6 - \rho_5 v_5}{\rho_6^* v_6 + \rho_5 v_5} = \frac{1750 \cdot 350 - 2040 \cdot 500}{1750 \cdot 350 + 2040 \cdot 500} = -0,25. \quad (35)$$

Поэтому для параметров из таблицы падающая волна смещения $C_5 e^{j(\omega\tau - \Gamma_5 z)} = 0,063u^0 e^{-\alpha_5 z} e^{j(\omega\tau - \gamma_4)}$ на границе 5 примет вид

$$U_5(h_p + h_{np} + h_{ш} + h_{ш}) = 0,063u^0(1 + \Omega_6)10e^{-\omega\eta_4 \frac{h_{ш}}{v_4}} e^{j\omega\tau} = 0,063(1 - 0,25)u^0 e^{-(6 \dots 1570) \cdot 0,1 \cdot 0,4 / 500} e^{j(\omega\tau)} = 0,047(1 \dots 0,93)u^0 e^{j\omega\tau} \cong 0,045u^0 e^{j\omega\tau}. \quad (36)$$

6) На границе 6 (песок — суглинок, $z = h_p + h_{np} + h_{ш} + h_{ш} + h_{ш} + h_{ш}$) с учетом уравнения (36)

$$U_5(h_p + h_{np} + h_{ш} + h_{ш}) = U_6(h_p + h_{np} + h_{ш} + h_{ш} + h_{ш}) = C_6 e^{-j\Gamma_6(h_p + h_{np} + h_{ш} + h_{ш})} e^{j\omega\tau} = 0,045u^0 e^{j\omega\tau}. \quad (37)$$

Для строительного песка снижение амплитуды составит $e^{-\alpha_5 \cdot 1} \approx 0,998 \dots 0,7$, или в среднем 0,85. В окончательном виде

$$U_6(h_p + h_{np} + h_{ш} + h_{ш} + h_{ш} + h_{ш}) = 0,038u^0 e^{j\omega\tau}. \quad (38)$$

Зная величину смещения рельса $u^0 e^{j\omega\tau}$ по оси Z, легко рассчитать напряжение, действующее по контуру шпалы и вызывающее просадку. Условием начала просадки является превышение напряжения T_6 предельного напряжения сдвига суглинка G_0 , т. е. $T_6 > G_0$. Для неуплотненных глинистых грунтов $G_0 = 0,03$ МПа, для уплотненных — $G_0 = 0,04 - 0,06$ МПа [7].

Продифференцировав уравнение (38), находим деформацию и напряжение уравнение (12) на границе «песок — суглинок» (п. 6 таблицы)

$$S_6 = \frac{dU_6}{dz} = 0,038u^0 \omega e^{j\omega\tau}; \quad T_6 = |E_5^*| e^{-j\delta_5} \frac{dU_6}{dz} \approx 14,5 \cdot 10^6 \omega u^0 e^{j(\omega\tau - 0,05)}. \quad (39)$$

Найдем величину напряжения на границе «песок — суглинок» для двух состояний песчаной подушки:

п. 9 таблицы $T_5 = E_5 \frac{dU_6}{dz} = 2,4 \cdot 10^6 \omega u^0 e^{j(\omega\tau - 0,1)}$; (40)

п. 10 таблицы $T_5 = E_5 \frac{dU_6}{dz} = 1,9 \cdot 10^4 \omega u^0 e^{j(\omega\tau - 0,6)}$. (41)

Снижение амплитуды для случая п. 9 таблицы составит $e^{-\alpha_{s,1}} = 0,99...0,11$, и, следовательно, произойдет перекачка энергии продольной волны в поперечную и возникнет течение песка вдоль длины шпалы в обе стороны, а соответственно, возрастет пористость в слое песка и повысится вероятность выплеска.

Таким образом, амплитуда смещения на границе «песок — суглинок» снижается в 26 раз в диапазоне частот 1–250 Гц. Для песка с повышенной влажностью вблизи торцов шпалы возникают вторичные поперечные волны, способствующие течению песка. Между шпалами встречные вторичные поперечные волны компенсируются, но возрастает пористость песчаного слоя за счет выноса песка вверх.

Как было обосновано выше, из-за «размытой» границы между песком и суглинком коэффициент отражения можно принять равным 0. При этом результаты расчетов изменятся незначительно и на 15 % уменьшится степень демпфирования.

В заключение для сравнения рассмотрим задачу, когда верхнее строение пути помещается в бетонный короб, который устанавливается на слой гравелисто-песчаной смеси и суглинок, а в подшпальные углубления в нем установлены резиновые прокладки. Песочно-гравийная смесь в качестве защитного слоя для безбалластного пути имеет худшие прочностные и деформативные свойства при вибродинамических воздействиях, чем щебень [8]. По аналогии с рассмотренной выше задачей можно записать, что на границах 1, 2 те же выражения. А на границе 3 будет действительно уравнение (20).

На границе 3 ($z = h_p + h_{np}$) с учетом уравнения (20)

$$U_2(h_p + h_{np}) = u_3(h_p + h_{np}) = A_3 e^{j[\omega\tau - k_3(h_p + h_{np})]} + B_3 e^{j[\omega\tau + k_3(h_p + h_{np})]} = 0,25u^0 e^{j\omega\tau}. \quad (42)$$

Падающая волна смещения $A_3 e^{j(\omega\tau - k_3 z)}$ отражается от границы 4 (шпала — резиновая прокладка, $z = h_p + h_{np} + h_{ш}$)

$$\Omega_4 A_3 e^{-jk_3 z} e^{j\omega\tau} = B_3 e^{j(\omega\tau + k_3 z)}; \quad B_3 = \Omega_4 A_3 e^{-j2k_3(h_p + h_{np} + h_{ш})}. \quad (43)$$

Величина Ω_4 с учетом выражений (9–11) рассчитывается по формуле

$$\Omega_4 = \frac{z_4 - z_3}{z_4 + z_3} = \frac{\rho_4 v_4 - \rho_3 v_3}{\rho_4 v_4 + \rho_3 v_3} = \frac{2700 \cdot 5000 - 950 \cdot 1479}{2700 \cdot 500 + 950 \cdot 14790} = 0,81. \quad (44)$$

Уравнение смещения с учетом выражений (42–44) на границе 4 будет иметь вид

$$u_3(h_p + h_{np} + h_{ш}) = \frac{0,25u^0(1 + \Omega_4)}{1 + \Omega_4 e^{-2jk_3 h_{ш}}} e^{j\omega\tau - jk_3 h_{ш}}. \quad (45)$$

Далее следуют такие же оценки, как для границы 3 предыдущей задачи. Поэтому уравнение (45) можно упростить

$$u_3(h_p + h_{np} + h_{ш}) \cong 0,25u^0(1 + 0,81)e^{j\omega\tau} = 0,45u^0 e^{j\omega\tau}. \quad (46)$$

На границе 4 (шпала — резиновая прокладка, $z = h_p + h_{np} + h_{ш}$) с учетом уравнения (46)

$$u_3(h_p + h_{np} + h_{ш}) = 0,45u^0 e^{j\omega\tau} = U_4(h_p + h_{np} + h_{ш}) = C_4 e^{-j\Gamma_4(h_p + h_{np} + h_{ш})} e^{j\omega\tau}. \quad (47)$$

Коэффициент отражения на границе 5 между шпалой и резиновой прокладкой равен

$$\Omega_5 = \frac{z_5 - z_4}{z_5 + z_4} = \frac{\rho_5^* v_5 - \rho_4 v_4}{\rho_5^* v_5 + \rho_4 v_4} = \frac{950 \cdot 1479 - 2700 \cdot 5000}{950 \cdot 1479 + 2700 \cdot 5000} = -0,81. \quad (48)$$

Падающая волна смещения $A_4 e^{j(\omega\tau - k_4 z)}$ отражается от границы 5

$$\Omega_5 C_4 e^{-jk_4 z} e^{j\omega\tau} = D_4 e^{j(\omega\tau + k_4 z)}; \quad D_4 = \Omega_5 C_4 e^{-j2k_4(h_p + h_{np} + h_{ш} + h_{ш})}; \quad z = h_p + h_{np} + h_{ш} + h_{ш}. \quad (49)$$

Уравнение смещения с учетом выражений (46–48) на границе 5 будет иметь вид

$$U_4(h_p + h_{np} + h_{ш} + h_{ш}) = \frac{0,45u^0(1 + \Omega_5)}{1 + \Omega_5 e^{-2jk_4 h_{ш}}} e^{j\omega\tau - jk_4 h_{ш}}. \quad (50)$$

Волновое число для резиновой прокладки выражения (6, 7) [1] равно

$$\Gamma_2 = \frac{\omega}{v_2} \eta_2 + j\gamma_2 = (1,44 \cdot 10^{-3} \dots 5,5 \cdot 10^{-3}) + j(4,1 \cdot 10^{-3} \dots 1,1 \cdot 10^{-1}). \quad (51)$$

Толщина прокладки пусть составляет 0,02 м, а произведение в показателе степени выражения $e^{-j\Gamma_2 h_{ш}}$ в правой части числителя (6) [1] $\alpha_4 h_{ш} = 2,9 \cdot 10^{-5} \dots 1,1 \cdot 10^{-4}$. Выбираем ребристую многослойную резину с $\eta_4 = 2$, а величина $\exp\left(-\frac{\omega h_{ш}}{v_2} \eta_2\right) = \exp\left(-\frac{(6 \dots 1570) \cdot 0,02 \cdot 2}{1479}\right) = e^{-1,6 \cdot 10^{-4}} \dots e^{-0,042} \cong 0,98$. В таких тонких прокладках ослабление амплитуды вибрации крайне мало, то же относится и к смещению фазы гармоник. На основании проведенных оценок можно упростить уравнение (50)

$$U_4(h_p + h_{np} + h_{ш} + h_{ш}) = 0,085u^0 e^{j\omega\tau}. \quad (52)$$

Физико-механические характеристики материалов, используемых в верхнем и нижнем строении пути
 Physico-mechanical characteristics of materials used in the subgrade and superstructure of the track

№ п/п	Материал среды, грунты	Модуль Юнга материала E , Па	Скорость распространения волны v , м/с	Коэффициент потерь энергии η	Плотность материала ρ , кг/м ³	Коэффициент Пуассона μ
1	Сталь [15]	$20 \cdot 10^{10}$	5100	$1,2 \cdot 10^{-4}$	7870	0,25–0,33
2	Бетон [9–11]	$6,7 \cdot 10^{10}$	5000	$\sim 10^{-3}$	2700	0,16–0,18
3	Резина пористая [9, 11–14]	$5 \cdot 10^4$	30	1,5–2,0	700	0,47
4	Резиновая прокладка [9]	$5 \cdot 10^6$ (10 Гц) $1,2 \cdot 10^7$ (300 Гц)	1479	0,35 (1 Гц) 0,25 (100 Гц), 0,04 (300 Гц) при $\delta = 0,2$	950	0,38
5	Щебень гранитный [11, 12–19]	$350 \cdot 10^6$	100–1000	0,1 при $\delta = 0,1$	2040	0,15
6	Гравелисто-песчаная смесь [5]	$370 \cdot 10^6$	200–500	0,1 при $\delta = 0,05$	1600–1900	0,25
7	Песок крупный и средней крупности со степенью влажности $< 0,8$ [5]	$120 \cdot 10^6$	500	0,1 при $\delta = 0,03$	1700	0,25
8	Песок строительный (ГОСТ 8736–93) [5, 13]	$120 \cdot 10^6$	500	0,1 при $\delta = 0,1$	1680	0,25
9	Насыпные рыхлые пески, супеси [5]	$62 \cdot 10^6$	100–300	0,2 при $\delta = 0,1$	700–1400	0,25
10	Водонасыщенный песок [5, 9]	$0,49 \cdot 10^6$	290	0,4 при $\delta = 0,7$	1700	0,25
11	Гравий [5]	$150 \cdot 10^6$	100–1000	0,1 при $\delta = 0,05$	1400	0,18
12	Суглинок тугопластичный и плотнопластичный [5]	$43 \cdot 10^6$	1500	0,15	1700	0,35
13	Суглинок средний [5]	$37 \cdot 10^6$	140	0,15	1810	0,35
14	Суглинок водонасыщенный [5]	—	300–1400	0,2	1600–2100	0,4
15	Супесь водонасыщенная [5]	—	300–1200	0,2	1600–2000	0,35
16	Глина твердая и полутвердая [5]	$25 \cdot 10^6$	1500	0,15	1700	0,40–0,42
17	Глина водонасыщенная [5]	—	500–2800	0,5	1700–2200	0,45
18	Насыпной грунт, уплотненный со степенью влажности $< 0,5$ [5]	—	300	0,1	1600	0,35
19	Грунт песчаный маловлажный [5]	—	150–900	0,1	700–1400	0,35
20	То же средней влажности [5]	—	250–1300	0,15	1600–1900	0,35
21	То же водонасыщенный [5]	—	300–1600	0,2	1700–2000	0,35
22	Водонасыщенный грунт ниже уровня грунтовых вод при степени влажности $> 0,9$ [5]	—	1750	0,3	2000	0,35
23	Деревянная шпала [12]	$0,9 \cdot 10^{10}$	3600	0,14	960	0,35

δ — коэффициент затухания (угол потерь).

Таким образом, амплитуда смещения на границе «резиновая подкладка — бетонный короб» снижается в ~12 раз в диапазоне частот 1–250 Гц. Учитывая, что бетон не обладает демпфирующими свойствами, амплитуда смещения на суглинке описывается тем же уравнением (52).

Для расчета напряжений, действующих на границе «бетонный короб — суглинок», необходимо записать напряжение $T_s = E_s \frac{dU_4}{dz}$ как функцию, распределенную по всем шпалам в секции бетонного короба при прохождении по нему грузового состава, далее проинтегрировав по длине секции можно найти среднюю силу, действующую на секцию.

Выводы. 1. Разработан аппарат определения степени демпфирования гармонических напряжений в земляном полотне в зависимости от состава грунта, его влажности и пористости. Включение в анализ стоимостных показателей позволит оценивать экономическую эффективность проекта.

2. Наилучшие демпфирующие и стоимостные свойства имеют конструкции с щебеночным балластом. Однако устойчивость таких конструкций и их межремонтный срок зависят от правильной организации водоотводов, особенно в весенне-осеннее время.

3. Для повышения демпфирования конструкций верхнего строения пути следует:

- установить для снижения амплитуды изгибных деформаций в шпале промежуточный материал — полимерную прокладку, выравнивающую напряжения в объеме бетона между шпалой и щебнем. Однако срок службы такой прокладки будет невысоким.

- наносить на конструкции вибродемпфирующие покрытия (ВДП);

- использовать вибродемпфирующие засыпки из сухого песка или чугушной дробы в резиновые конструкции;

- применять в качестве прокладок композиционный материал: песок или гранулы графита в резине, имеющие угол потерь $\delta \approx \pi/2$ и ослабляющие напряжение в десять раз при толщине слоя 10 мм.

4. Песочно-гравийная смесь в качестве защитного слоя для безбалластного пути имеет худшие прочностные и деформативные свойства при вибродинамических воздействиях, чем щебень.

5. Разработанный аппарат определения степени демпфирования гармонических напряжений в конструкции земляного полотна и верхнего строения пути может служить основой для разработки методики выбора типа конструкции железнодорожного полотна в зависимости от геологических, климатических условий, среднегодового уровня грунтовых вод и количества демпфирующих слоев.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бельков В. М. Моделирование вибродемпфирующих свойств упруговязкопластических слоев земляного полотна. Постановка задачи 1 // Вестник ВНИИЖТ. 2017. Т. 76. № 3. С. 187–192. DOI: <http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2017-76-3-187-192>.
2. Филиппов В. Релаксация в растворах полимеров, полимерных жидкостях и гелях // Физическая акустика / под ред. У. Мезона. М.: Мир, 1969. Ч. 2Б. С. 9–109.
3. Литовиц Т., Девис К. Свойства газов, жидкостей и растворов // Физическая акустика / под ред. У. Мезона. М.: Мир, 1968. Ч. 2А. С. 298–370.
4. Савельев И. В. Курс общей физики. Механика, колебания и волны, молекулярная физика. М.: Наука, 1970. Т. 1. 506 с.
5. СП 23–105–2004. Оценка вибрации при проектировании, строительстве и эксплуатации объектов метрополитена. Свод правил по проектированию и строительству: утв. постановлением Госстроя России № 20 от 09.03.2004.
6. Повышение стабильности пути в зоне стыков за счет применения упругих подпальных прокладок / В. О. Певзнер [и др.] // Вестник ВНИИЖТ. 2016. Т. 75. № 3. С. 140–146. DOI: 10.21780/2223-9731-2016-75-3-140-146.
7. Колос А. Ф., Турсунов Х. И., Николайтис Д. С. Исследование прочностных свойств балластного материала, засоренными барханными песками // Инженерный вестник Дона. 2007–2012. URL: www.ivdon.ru/magazine (дата обращения: 14.05.2013 г.).
8. Вялов С. С. Реологические основы механики грунтов: учеб. пособие для строит. вузов. М.: Высшая школа, 1978. 447 с.
9. Корчагин Г. Е., Журавлев А. А., Стегин Ю. М. Физика волновых процессов: учеб.-метод. пособие. Казань: Изд-во Казанского Федерального университета, 2014. 77 с.
10. Физика пласта, добыча и подземное хранение / О. М. Ермилов [и др.]. М.: Наука, 1996. 541 с.
11. Фролов А. Д. Электрические и упругие свойства пород. М.: Высшая школа, 1976. 474 с.
12. Машенко А. В., Пономарев А. Б., Сычкина Е. Н. Специальные разделы механики грунтов и механики скальных грунтов: учеб. пособие. Пермь: Изд-во Пермского нац.-исслед. политехн. ун-та, 2014. 176 с.
13. Вайнштейн Е. В. Технология строительства лесовозных дорог из щебеночно-мастичных асфальтобетонов: автореф. ... дис. канд. техн. наук. Йошкар-Ола, 2010. 16 с.
14. Радзишевский А. Ю. Основы аналогового и цифрового звука. М.: Вильямс, 2006. 320 с.
15. Электронный справочник химика. URL: 21 <http://chem21.info/> (дата обращения: 10.05.2016 г.).
16. Кикоин И. К. Таблицы физических величин. Справочник. М.: Атомиздат, 1976. 1008 с.
17. Кэй Дж., Лэби Т. Таблицы физических и химических постоянных / под ред. К. П. Яковлева. М.: Физматлит, 1962. 247 с.
18. Шахунянц Г. М. Железнодорожный путь: учеб. для вузов. М.: Транспорт, 1987. 479 с.
19. Попов С. Н. Балластный слой железнодорожного пути. М.: Транспорт, 1965. 184 с.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

БЕЛЬКОВ Владимир Максимович,

д-р физ.-мат. наук, научный консультант НКЦ, АО «ВНИИЖТ»

Статья поступила в редакцию 03.06.2016 г., актуализирована 30.10.2016 г., принята к публикации 17.11.2016 г.

Modelling of vibration-damping properties of elastic-viscoplastic layers of the roadbed. Problem statement 2

V. M. BEL'KOV

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

Abstract. The present article is a continuation of the article [1], where was considered a model of the vibration damping properties of the subgrade at the main area of the sole of a ballast prism of normalized thickness, a protective sand cushion and clay soils under conditions of harmonic vibrations on the basis of physical and chemical mechanics. It was noted that the Kelvin—Vogt model, currently used for modeling, is not applicable for layered systems that do not have, in principle, concentrated masses. For the occurrence of oscillations in the clay layer, it is necessary that under it there would be a medium reflecting the vertical longitudinal wave. Otherwise, the reverse half-wave will not form, and the compression wave will go deep into the ground and turn into heat in the end. Such problems can be solved only using the theory of wave processes.

On the basis of the harmonic analysis of wave processes in layered systems for the ballast track, it is shown that the displacement amplitude at the sand-loam boundary decreases 26 times in the frequency range 1–250 Hz. Along the sleeper, secondary longitudinal and transverse waves arise due to the "transfer" of the energy of the main longitudinal wave into the transverse along the sleepers. As a result, circulation flows along the length of the sleeper occurred as well as irreversible deformation of the prism and the accumulation of defects in the subgrade, the porosity and the probability of splashes of ballast are increased. The best damping and cost properties have constructions with crushed stone in comparison with a ballastless design. However, the stability of the motion on the ballast prism and its inter-repair period depends on the correct organization of drains, especially in spring and autumn.

Developed apparatus for determining the degree of stress damping in the structure of the track subgrade and the superstructure can be used to develop a normative document for selecting the design of the subgrade structure of the track, depending on the geological, climatic conditions and the average annual groundwater level. The use of the apparatus of linear harmonic analysis is explained by the fact that the influence of nonlinear effects of wave propagation in dispersed materials does not have time to appear because of the extremely small thicknesses of materials constituting the subgrade.

Keywords: vibro damping; subgrade; elastic-viscoplastic properties; harmonic analysis; vertical vibrating waves

DOI: <http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2017-76-5-312-320>

REFERENCES

1. Bel'kov V. M. *Modelirovanie uprugovязkoplasticheskikh svoystv zemlyanogo polotna. Postanovka zadachi 1* [Modelling of vibration-damping properties of elastic-viscoplastic layers of the roadbed. Problem statement 1]. Vestnik VNIIZhT [Vestnik of the Railway Research Institute], 2017, Vol. 76, no. 3, pp. 187–192. DOI: <http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2017-76-3-187-192>.
2. Filippov V. *Relaksatsiya v rastvorakh polimerov, polimernykh zhidkostyakh i gelyakh*. Fizicheskaya akustika [Relaxation in solutions of polymers, polymer liquids and gels. Physical acoustics]. Moscow, Mir Publ., 1969, Part 2B, pp. 9–109.
3. Litovits T., Devis K., Meson U. *Svoystva gazov, zhidkostey i rastvorov*. Fizicheskaya akustika [Properties of gases, liquids and solutions. Physical acoustics]. Moscow, Mir Publ., 1968, Part 2A pp. 298–370.
4. Savel'ev I. V. *Kurs obshchey fiziki. Mekhanika, kolebaniya i volny, molekulyarnaya fizika* [Course of General Physics. Mechanics, oscillations and waves, molecular physics]. Moscow, Nauka Publ., 1970, Vol. 1, 506 p.
5. SP 23–105–2004. *Assessment of vibration in the design, construction and operation of metro facilities. Code of rules for de-*

sign and construction. Approved by Gosstroy of Russia no. 20 from March 09, 2004. (in Russ.).

6. Pevzner V. O., Zheleznov M. M., Kaplin V. N., Tret'yakov V. V., Myslivets M. N., Tomilenko A. S. *Povyshenie stabil'nosti puti v zone stykov za schet primeneniya uprugikh podshpal'nykh prokladok* [Increasing track stability in the zone of joints due to the use of elastic under sleeper pads]. Vestnik VNIIZhT [Vestnik of the Railway Research Institute], 2016, Vol. 75, no. 3, pp. 140–146. DOI: 10.21780/2223-9731-2016-75-3-140-146.

7. Kolos A. F., Tursunov Kh. I., Nikolaytist D. S. *Issledovanie prochnostnykh svoystv ballastnogo materiala, zasorennymi barkhannymi peskami* [Investigation of strength properties of ballast material, clogged barchan sands]. Inzhenernyy vestnik Dona [The engineer's messenger of the Don]. URL: www.ivdon.ru/magazine (retrieved on 14.05.2013).

8. Vyalov S. S. *Reologicheskie osnovy mekhaniki gruntov*. Ucheb. posobie dlya stroit. vuzov [Rheological basics of soil mechanics. A manual for schools for construction engineers], Moscow, Vysshaya shkola [Higher school] Publ., 1978, 447 p.

9. Korchagin G. E., Zhuravlev A. A., Stegin Yu. M. *Fizika volnovykh protsessov*. Ucheb.-metod. posobie [Physics of wave processes. Educational-methodical manual]. Kazan, Kazan Federal University Publ., 2014, 77 p.

10. Ermirov O. M., Remizov V. V., Chugunov L. S., Shirkovskiy A. I. *Fizika plasta, dobycha i podzemnoe khranenie* [Reservoir physics, production and underground storage]. Moscow, Nauka Publ., 1996, 541 p.

11. Frolov A. D. *Elektricheskie i uprugie svoystva porod* [Electrical and elastic properties of rocks]. Moscow, Vysshaya shkola [Higher School] Publ., 1976, 474 p.

12. Mashchenko A. V., Ponomarev A. B., Sychkina E. N. *Spezial'nye razdely mekhaniki gruntov i mekhaniki skal'nykh gruntov*. Ucheb. posobie [Special sections of soil mechanics and mechanics of rocky soils. A tutorial]. Perm, Perm National Research Polytechnical University Publ., 2014, 176 p.

13. Vaynshteyn E. V. *Tekhnologiya stroitel'stva lesovoznykh dorog iz shchebenochno-mastichnykh asfal'tobetonov*. Kand. tekhn. nauk diss. avtoref. [Technology of construction of forest roads from gravel-mastic asphalt concrete. Cand. tech. sci. diss. synopsis]. Ioshkar-Ola, 2010, 16 p.

14. Radzishevskiy A. Yu. *Osnovy analogovogo i tsifrovogo zvuka* [Basics of analog and digital sound]. Moscow, Williams Publ., 2006, 320 p.

15. *Elektronnyy spravochnik khimika* [Electronic reference book of the chemist]. URL: <http://chem21.info/> (retrieved on 10.05.2016).

16. Kikoin I. K. *Tablitsy fizicheskikh velichin*. Spravochnik [Tables of physical quantities. Directory]. Moscow, Atomizdat Publ., 1976, 1008 p.

17. Kay J., Laby T., Yakovlev K. P. *Tablitsy fizicheskikh i khimicheskikh postoyannykh* [Tables of physical and chemical constants]. Moscow, State publishing Fizmatliteratura, 1962, 247 p.

18. Shakhunyan G. M. *Zheleznodorozhnyy put'* [Railway track]. Moscow, Transport Publ., 1987, 479 p.

19. Popov S. N. *Ballastnyy sloy zheleznodorozhnogo puti* [Ballast layer of railway track]. Moscow, Transport Publ., 1965, 184 p.

ABOUT THE AUTHOR

Vladimir M. BEL'KOV,

Dr. Sci. (Phys.-Math.), Scientific Consultant of Science and consultancy center (NKTs), JSC "VNIIZhT"

Received 03.06.2016

Revised 30.10.2016

Accepted 17.11.2016

■ E-mail: belkov.vladimir@vniizht.ru (V. M. Bel'kov)