

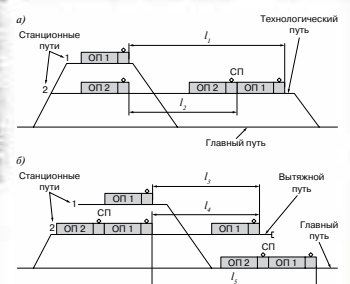
Вестник

Научно-исследовательского института
железнодорожного транспорта

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

Издается с 1942 г.

Том 80, № 1, 2021





I Международная научно-практическая конференция
НАУКА 1520 ВНИИЖТ
ЗАГЛЯНИ ЗА ГОРИЗОНТ

2021

ТЕМЫ МЕРОПРИЯТИЙ

- /// Контейнеризация перевозок
- /// Городские пассажирские перевозки железнодорожным транспортом
- /// Развитие линий с высоким использованием пропускной способности
- /// Инфраструктура железнодорожного транспорта
- /// Тяговый подвижной состав
- /// Техническая диагностика на транспорте

Также вас ждут

ТЕХНИЧЕСКИЕ ТУРЫ

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



Вестник
Научно-исследовательского института
железнодорожного транспорта
 Научно-технический журнал
 Периодичность: 6 номеров в год
Учредитель — АО «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта».
www.vniizht.ru
 Свидетельство о регистрации
 ПИ № ФС77-35600 от 17.03.2009.
 Журнал включен в Перечень рецензируемых научных изданий ВАК.
 Журнал включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ).
 Издается с 1942 г.
 Подписной индекс 70116
 ISSN 2223–9731 (Print)
 ISSN 2713–2560 (Online)

Редакционный совет
 Виноградов С. А., председатель, канд. техн. наук, АО «ВНИИЖТ», Москва, Россия,
 Косарев А. Б., зам. председателя, д-р техн. наук, проф., АО «ВНИИЖТ», Москва, Россия,
 Горячева И. Г., д-р физ.-мат. наук, проф., академик РАН, ИПМех РАН, Москва, Россия,
 Дынькин Б. Е., д-р техн. наук, проф., ФГБОУ ВО РГУПС, Ростов-на-Дону, Россия,
 Колесников В. И., д-р техн. наук, проф., академик РАН, ФГБОУ ВО РГУПС, Ростов-на-Дону, Россия,
 Куммер С., д-р экономики, проф., Венский экономический университет, Институт транспорта и логистики, Вена, Австрия,
 Лапидус Б. М., д-р экон. наук, проф., Объединенный ученый совет ОАО «РЖД», Москва, Россия,
 Лёвин Б. А., д-р техн. наук, проф., ФГАОУ ВО РУТ (МИИТ), Москва, Россия,
 Махутов Н. А., д-р техн. наук, проф., член-корреспондент РАН, ИММАШ РАН, Москва, Россия,
 Мачерет Д. А., д-р экон. наук, проф., АО «ВНИИЖТ», Москва, Россия,
 Назаров О. Н., канд. техн. наук, ОАО «РЖД», Москва, Россия,
 Розенберг Е. Н., д-р техн. наук, проф., АО «НИИАС», Москва, Россия,
 Смольянинов А. В., д-р техн. наук, проф., ФГБОУ ВО УрГУПС, Екатеринбург, Россия,
 Сюэвей Ли, д-р наук, проф., Пекинский объединенный университет, Пекин, Китайская Народная Республика,
 Ушкалов В. Ф., д-р техн. наук, член-корреспондент НАН, Институт технической механики НАН, Днепр, Украина,
 Фокс-Рабинович Г. С., д-р техн. наук, Университет Макмастера, Гамильтон, Канада,
 Шенфельд К. П., д-р техн. наук, АО «ВНИИЖТ», Москва, Россия,
 Эсвельд К., проф. железнодорожной инженерии, Технологический университет Делфта, Зальтбоммел, Нидерланды

Редакционная коллегия
 Косарев А. Б., главный редактор, д-р техн. наук, проф.,
 Римская О. Н., зам. главного редактора, канд. экон. наук, доцент,
 Глюзберг Б. Э., д-р техн. наук, проф.,
 Гогричани Г. В., д-р техн. наук,
 Захаров С. М., д-р техн. наук, проф.,
 Коган А. Я., д-р техн. наук, проф.,
 Кучумов В. А., д-р техн. наук, проф.,
 Мирошниченко О. Ф., д-р экон. наук, проф.,
 Мугинштейн Л. А., д-р техн. наук, проф.,
 Савин А. В., д-р техн. наук, проф.,
 Сирина Н. Ф., д-р техн. наук, доцент,
 Фёдоров С. В., д-р техн. наук, проф.,
 Шур Е. А., д-р техн. наук, проф.,
 Анохов И. В., выпускающий редактор, канд. экон. наук, доцент
www.journal-vniizht.ru
 © АО «ВНИИЖТ», 2021

Вестник

Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта

Вестник ВНИИЖТ | Том 80, 1/2021
 DOI: <https://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-1>

СОДЕРЖАНИЕ

Contents	2
Обращение главного редактора	3

Автоматизация и управление технологическими процессами на железнодорожном транспорте

Оптимизация условий организации движения соединенных поездов на постоянной основе на Транссибирской магистрали Восточного полигона сети железных дорог М. И. Мехедов, Е. А. Сотников, П. С. Холодняк, Д. А. Курсин, Н. В. Корниенко	4–12
--	------

Технические средства железнодорожного транспорта

Метод построения адаптивного субоптимального стационарного регулятора движения поезда на основе искусственных нейронных сетей С. В. Малахов, М. Ю. Капустин	13–19
Метод регулировки топливной аппаратуры тепловозного дизеля по характеристике тепловыделения в условиях эксплуатации А. Ю. Коньков, А. И. Трунов, А. Д. Гурьянова	20–29
Разработка системы кондиционирования с индивидуальным регулированием температуры и расхода воздуха в купе пассажирского вагона Г. М. Стоякин, А. В. Костин, С. Н. Науменко	30–34
Повышение пропускной способности железной дороги с установкой компенсации реактивной мощности Л. А. Герман	35–44

Наука — транспорту

О регрессионном подходе к прогнозированию пассажирского спроса на железнодорожном транспорте Г. Л. Венедиктов, В. М. Кочетков	45–52
Определение предельной численности работников ОАО РЖД, занятых в перевозочной деятельности, при планировании мероприятий программ по повышению производительности труда Е. Н. Ефимова, П. А. Шанченко, Е. В. Ершова	53–58

Мнение редакции может не совпадать с мнением авторов статей.
 Адрес учредителя, издателя, редакции журнала «Вестник ВНИИЖТ»:
 129626, Москва, 3-я Мытищинская ул., 10.
 Тел. (495) 602-80-37, 602-81-10.
 Подписано к печати 26.02.2021.
 Цена свободная.

Формат бумаги 60×90 1/8.
 Офсетная печать. Усл. печ. л. 7,5.
 Тираж 350 экз. Заказ 6049.
 Отпечатано на издательско-полиграфическом предприятии ООО «ИПП «КУНА»,
 125167, Москва, Ленинградский пр., д. 47, стр. 4. Тел. (495) 795-02-97.

VNIIZHT Scientific Journal

Vol. 80, 1/2021

DOI: <https://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-1>

Contents

Letter of the Editor-in-Chief 3

Automation and control of technological processes in railway transport

Condition optimization for organizing the operation of connected
trains on an ongoing basis on the Trans-Siberian Railway
of the Eastern operational range of the railway network
by M. I. Mekhedov, E. A. Sotnikov, P. S. Kholodnyak,
D. A. Kursin, N. B. Kornienko 4–12

Technical means of railway transport

Method for constructing an adaptive suboptimal stationary
train traffic controller based on artificial neural networks
by S. V. Malakhov, M. Yu. Kapustin 13–19

Method of adjusting fuel equipment of a diesel locomotive
by heat release feature under operating conditions
by A. Yu. Kon'kov, A. I. Trunov, A. D. Gur'yanova 20–29

Development of an air conditioning system with individual
regulation of temperature and air flow rate in a compartment
of a passenger car
by G. M. Stoyakin, A. V. Kostin, S. N. Naumenko 30–34

Increasing railway capacity with the installation of reactive
power compensation
by L. A. German 35–44

Science towards transport

On regression approach to forecasting passenger demand
in railway transport
by G. L. Venediktov, V. M. Kochetkov 45–52

Determination of the maximum number of employees
of the JSC Russian Railways engaged in transportation activities
when planning measures for programs to increase labor
productivity
by E. N. Efimova, P. A. Shanchenko, E. V. Ershova 53–58

Editorial Board:

Alexander B. Kosarev
Editor-in-Chief,
Dr. Sci. (Eng.), Prof.,
Olga N. Rimskaya
Deputy Editor-in-Chief,
Cand. Sci. (Econ.),
Associate Prof.,
Boris E. Glyuzberg
Dr. Sci. (Eng.), Prof.,
Georgiy V. Gogrichiani
Dr. Sci. (Eng.),

Sergey M. Zakharov
Dr. Sci. (Eng.), Prof.,
Alexander Ya. Kogan
Dr. Sci. (Eng.), Prof.,
Vladislav A. Kuchumov
Dr. Sci. (Eng.), Prof.,
Olga F. Miroshnichenko
Dr. Sci. (Econ.), Prof.,
Lev A. Muginshtein
Dr. Sci. (Eng.), Prof.,
Alexander V. Savin
Dr. Sci. (Eng.), Prof.,

Nina F. Sirina
Dr. Sci. (Eng.),
Associate Prof.,
Sergey V. Fedorov
Dr. Sci. (Eng.), Prof.,
Evgeniy A. Shur
Dr. Sci. (Eng.), Prof.,
Anokhov I. V.
Executive editor,
Cand. Sci. (Econ.),
Associate Prof.

Passed for printing 26.02.2021.
Format 60×90 1/8.
Circulation 350 copies.
+7 (495) 602 8037, 602 8110
E-mail: journal@vniizht.ru

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

VNIIZHT Scientific Journal

is published six times per year
First published in 1942
www.journal-vniizht.ru

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

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

Publisher:

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

Advisory Board:

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

Alexander B. Kosarev,
Deputy Chairman, Dr. Sci. (Eng.), Professor,
JSC "VNIIZHT", Moscow, Russian Federation

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

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

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

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

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

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

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

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

Oleg N. Nazarov,
Cand. Sci. (Eng.), Deputy Head of technical policy department,
JSC RZD, Moscow, 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

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

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

Herman S. Fox-Rabinovich,
Dr. Sci. (Eng.), Chief researcher of McMaster University
Engineering, Hamilton, Ontario, Canada

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

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

© JSC Railway Research Institute, 2021

ОБРАЩЕНИЕ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА



Дорогие авторы и читатели!

Научно-технический журнал «Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта» имеет славную историю — первый номер журнала вышел в свет в далеком 1942 году. Облик, содержание и оформление журнала претерпели с тех пор существенные изменения, в полной мере отражая на своих страницах историю развития железнодорожной отрасли России.

Сегодня, в Год науки и технологий, перед журналом стоят амбициозные задачи, направленные на развитие международного научного сотрудничества и неразрывно связанные с использованием последних достижений и инноваций в области железнодорожного транспорта. Задача Года — привлечь талантливую молодежь в сферу науки и технологий, повысить вовлеченность профессионального сообщества в реализацию Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации. По результатам реализации национального проекта «Наука» Россия должна войти в пятерку мировых научных лидеров по приоритетным направлениям.

Наш журнал непрерывно развивается как научное издание, он включен в перечень ВАК и индексируется в РИНЦ. Все статьи издания находятся в открытом доступе на сайте журнала и на портале eLibrary. В ближайших планах редакции журнала — включение издания в международные наукометрические базы.

Журнал открыт для интеллектуальных дискуссий и обмена мнениями по широкому кругу научных вопросов, относящихся к техническим средствам железнодорожного транспорта, автоматизации процессов, транспортного материаловедения и инноваций в железнодорожной отрасли. Уверен, что печатная и электронная версии издания уже сейчас являются интересной и содержательной площадкой для обсуждения актуальных вопросов, связанных с развитием науки, техники и технологий в железнодорожной отрасли России и мира.

Приглашаю к публикации научных статей в журнале «Вестник ВНИИЖТ» коллег из России, стран ближнего и дальнего зарубежья.

Желаю всем авторам и читателям журнала творческих успехов в научных исследованиях и новых свершений!

С уважением,
главный редактор журнала «Вестник ВНИИЖТ»,
первый заместитель Генерального директора
АО «ВНИИЖТ», профессор, доктор технических наук
Александр Косарев

Dear Authors and Readers!

The scientific and technical journal “VNIIZHT Scientific Journal” has a glorious history — the first issue was published back in 1942. The appearance, content and design of the journal have undergone significant changes since then, fully reflecting on its pages the history of the development of the Russian railway industry.

Today, in the Year of Science and Technology, the journal faces ambitious challenges aimed at developing international scientific cooperation and inextricably linked with the use of the latest achievements and innovations in the field of railway transport. The Challenge of the Year is to attract talented youth to the field of science and technology, to increase the involvement of the professional community in the implementation of the Strategy for the scientific and technological development of the Russian Federation. According to the results of the implementation of the national project “Science”, Russia should become one of the five world scientific leaders in priority areas.

Our journal is continuously developing as a scientific publication; it is included in the list of the Higher Attestation Commission and is indexed in the RSCI. All articles of the publication are available for public on the journal's website and on the eLibrary portal. The nearest plans of the editorial office of the journal are inclusion of the publication in the international scientometric bases.

The journal is open for intellectual discussions and exchange of views on a wide range of scientific issues related to technical means of railway transport, process automation, transport materials science and innovations in the railway industry. I am sure that the printed and electronic versions of the publication are already an interesting and informative platform for discussing topical issues related to the development of science and technology in the railway industry in Russia and worldwide.

I would like to invite colleagues from Russia, countries of near and far abroad to publish scientific articles in the VNIIZHT Scientific Journal.

I wish all authors and readers of the journal creative success in scientific research and new achievements!

Kind regards,
Alexander Kosarev
Editor-in-Chief of the VNIIZHT Scientific Journal,
First Deputy General Director of the JSC VNIIZHT,
Professor, Doctor of Technical Sciences

Оптимизация условий организации движения соединенных поездов на постоянной основе на Транссибирской магистрали Восточного полигона сети железных дорог

М. И. МЕХЕДОВ, Е. А. СОТНИКОВ, П. С. ХОЛОДНЯК, Д. А. КУРСИН, Н. В. КОРНИЕНКО

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

Аннотация. Разработана целевая функция решения задачи повышения провозной способности загруженных линий за счет организации движения соединенных (сдвоенных) поездов на постоянной основе, предусматривающая минимизацию инвестиционных и текущих расходов. Рассмотрены условия постоянного обращения соединенных поездов на линии Сковородино—Смоляниново Транссибирской магистрали, где перспективные грузопотоки превышают наличную пропускную способность. Все решения разработаны для этой линии. Учитывается, что основные инвестиции на реализацию нового метода связаны с развитием станций для работы с соединенными поездами, а также с усилением системы электроснабжения для вождения соединенных поездов двойной массы. Дополнительные текущие расходы определяются необходимостью выполнения различных технологических операций с соединенными поездами. Установлено расчетное количество соединенных поездов $N_{сп}^{расч}$ для обеспечения потребной перспективной провозной способности. Величина $N_{сп}^{расч}$ в целях экономии расходов минимизируется на основе сравнения значений максимально возможного количества соединенных, а также одинарных поездов с потребной провозной способностью на различных участках линии. Рассмотрена методика размещения станций соединения/разъединения поездов, максимально совмещенных со станциями смены локомотивных бригад, обеспечивающая экономию инвестиций и текущих расходов. Из трех возможных вариантов размещения таких станций выбран оптимальный. Рассмотрены две принципиальные схемы станций для соединения/разъединения поездов — с последовательным и параллельным выполнением операций. Показано, что минимизацию расходов обеспечивает последовательное (поточное) выполнение этих операций. В целях экономии инвестиций разработка технического проекта для реализации нового метода должна предусматривать возможность использования для выполнения операций соединения/разъединения поездов и смены локомотивных бригад вспомогательных станций, имеющих более благоприятные топографические условия и расположение пристанционной застройки для их развития. Даны конкретные предложения по данному вопросу для рассматриваемой линии Транссибирской магистрали. С учетом действующих положений разработана методика расчета эксплуатируемого парка локомотивов, обслуживающих соединенные поезда, размеры которого минимизируются. Организация вождения соединенных поездов на постоянной основе обеспечивает эффективное освоение перспективного грузопотока.

Ключевые слова: соединенные поезда; провозная способность; исчерпание провозной способности; оптимальные

решения; выбор станций соединения поездов; потребное количество локомотивов; освоение объемов перевозок

Введение. В АО «ВНИИЖТ» разработан новый метод повышения провозной способности высокозагруженных двухпутных электрифицированных линий, перспективные грузопотоки на которых превышают их наличную провозную способность. Новый метод предусматривает организацию движения соединенных (сдвоенных) поездов (СП) на постоянной основе. На ряде зарубежных железных дорог [1, 2] используется соединение трех и более поездов, но такие соединения применяются на специализированных для тяжеловесного движения линиях. На существующих неспециализированных линиях при увеличении числа соединяемых поездов существенно возрастают трудности с удлинением станционных путей, усилением системы электроснабжения, обеспечением безопасности движения.

На основе разработанных в АО «ВНИИЖТ» и утвержденных ОАО «РЖД» концепции создания таких линий [3] и типовой технологии их работы [4] ниже рассмотрены условия практического использования данного метода на Транссибирской магистрали.

По данным о перспективных грузопотоках на Транссибе в пределах Восточного полигона установлено, что новый метод может использоваться на линии Сковородино—Смоляниново. Здесь с учетом развития БАМ прогнозируется особо значительный рост грузопотока — на различных участках от 25 до 46 % с исчерпанием провозной способности.

Целевая функция выбора оптимальных решений. Выбор наилучших технических и технологических условий развития существующих линий для организации движения СП на постоянной основе требует принятия оптимизационных решений, перечень которых и основные влияющие факторы могут быть установлены на основе комплексной оценки возможностей снижения расходов по всем инвестиционным и изменяющимся текущим расходам в виде целевой

функции. При этом учитываются принятые в [5] условия построения целевой функции для решения задач организации перевозочного процесса. При построении целевой функции (1) используются данные [4, 6] о том, что основные инвестиции на реализацию нового метода связаны: с развитием станций, где выполняются технологические операции по соединению/разъединению поездов, смене локомотивных бригад; усилением системы электроснабжения на участках для обеспечения постоянного обращения СП двойной массы. Дополнительные текущие расходы определяются необходимостью выполнения технологических операций с СП.

Рассматриваемая целевая функция для условий полного освоения предъявляемых перевозок СП, определяемая расходами, имеет следующий вид:

$$C_{\text{сп}} = \min \left\{ \begin{array}{l} K_{\text{инв}}^{\min} \left[K_{\text{ст}}^{\min} (n_{\text{сп}}^{\min}, n_{\text{лб}}^{\min}, n_{\text{всп}}^{\min}, n_{\text{обг}}^{\min}), \right. \\ \left. K_{\text{эл}}^{\min} (N_{\text{сп}}^{\min}, L_{\text{эл}}^{\min}) \right], \text{руб.}, \\ E_{\text{техн}}^{\min} \left[E_{\text{сп}}^{\min} (T_{\text{сп}}^{\min}, T_{\text{пто}}^{\min}), \right. \\ \left. E_{\text{м}}^{\min} (M_{\text{эп}}^{\min}, T_{\text{об}}^{\min}) \right], \text{руб./год} \end{array} \right. \quad (1)$$

при

$$G_{\text{сп}} \geq G_{\text{потр}};$$

$$N_{\text{сп}} \rightarrow \min,$$

где $C_{\text{сп}}$ — расходы на инвестиции и текущие затраты, приведенные к значениям, используемым при определении дисконтированных денежных потоков, руб. [7]; $G_{\text{потр}}$ — потребная перспективная провозная способность линии, измеряемая в одинарных поездах (ОП), ОП/сут; $G_{\text{сп}}$ — провозная способность линии [8], где организуется движение СП на постоянной основе, измеряемая в ОП, ОП/сут; $N_{\text{сп}}$ — количество СП, обеспечивающее достижение потребной провозной способности, СП/сут; $K_{\text{инв}}^{\min}$ — капитальные инвестиционные расходы на развитие инфраструктуры; $K_{\text{ст}}^{\min}$ — минимизируемые расходы на развитие станций на соединение/разъединение поездов и смену локомотивных бригад, достигаемые за счет минимизации количества таких станций $n_{\text{сп}}^{\min}, n_{\text{лб}}^{\min}$, использования вспомогательных станций $n_{\text{всп}}$, а также минимизации количества станций постановки СП на обгон пассажирскими поездами $n_{\text{обг}}^{\min}$; $K_{\text{эл}}^{\min}$ — минимизируемые инвестиционные расходы на усиление системы электроснабжения, достигаемые за счет минимизации количества СП $N_{\text{сп}}^{\min}$ и длины участков обращения СП $L_{\text{эл}}^{\min}$; $E_{\text{техн}}^{\min}$ — эксплуатационные расходы; $E_{\text{сп}}^{\min}$ — минимизируемые расходы на соединение/разъединение поездов, достигаемые за счет использования технологии, обеспечивающей минимальное время выполнения собственно операций соединения/разъединения $T_{\text{сп}}^{\min}$ и операций, связанных с работой пунктов техни-

ческого обслуживания (ПТО) вагонов по обработке СП $T_{\text{пто}}^{\min}$; $E_{\text{м}}^{\min}$ — минимизируемые расходы, связанные с тягой СП локомотивами эксплуатируемого парка, обслуживающими СП $M_{\text{эп}}^{\min}$, оборудованием локомотивов устройствами для обеспечения вождения СП, а также минимизацией времени оборота локомотивов $T_{\text{об}}^{\min}$.

Из функции (1) могут быть определены требующие решения оптимизационные задачи, наиболее значимые из которых рассмотрены далее применительно к линии Сковородино—Смоляниново Транссибирской магистрали.

Определение потребного количества СП. Прежде всего, должно быть обеспечено достижение потребной провозной способности $G_{\text{потр}}$. В свою очередь, достижение значения $G_{\text{сп}}$ должно выполняться при соблюдении условия $N_{\text{сп}} \rightarrow \min$, что минимизирует расходы на строительство дополнительных станционных путей двойной длины, усиление системы электроснабжения, а также на задержки поездов, связанные с выполнением дополнительных технологических операций с СП.

На основании разработанной методики с учетом изменения поездопотока по станциям примыкания других линий к Транссибирской магистрали определены потребные перспективные размеры движения СП $N_{\text{сп}}^{\text{потр}}$ и ОП $N_{\text{оп}}^{\text{потр}}$ на участках линии Сковородино—Смоляниново (рис. 1).

Полученные результаты необходимо сравнить с возможностями участков по пропуску такого количества СП и ОП. Для этого была разработана имитационная модель движения поездов на линии Сковородино—Смоляниново [9, 10], учитывающая особенности движения СП, определенные в [3, 4]. С использованием данной модели получены максимально возможные размеры движения СП и ОП — $N_{\text{сп}}^{\text{возм}}$ и $N_{\text{оп}}^{\text{возм}}$ (рис. 1). Сравнение потребных и максимально возможных размеров движения показывает, что использование СП на постоянной основе обеспечивает освоение перспективных грузопотоков. Эти же данные показывают и на возможность минимизации значений $N_{\text{сп}}^{\text{потр}}$.

Например, на участке Хабаровск II—Барановский $N_{\text{сп}}^{\text{потр}} = 30$ СП/сут. В то же время на данном участке в графике движения возможно проложить только 27 СП/сут, что, однако, компенсируется дополнительной прокладкой 7 ОП/сут. С учетом этого расчетное количество СП и ОП составит $N_{\text{сп}}^{\text{расч}} = 27$ СП/сут, $N_{\text{оп}}^{\text{расч}} = 56$ ОП/сут.

В целом количество СП минимизируется по условию

$$N_{\text{гр}}^{\text{потр}} = 2N_{\text{сп}}^{\text{расч}} + N_{\text{оп}}^{\text{расч}}, \text{ ОП/сут}, \quad (2)$$

где $N_{\text{гр}}^{\text{потр}}$ — потребное перспективное количество грузовых поездов в одинарном исчислении.

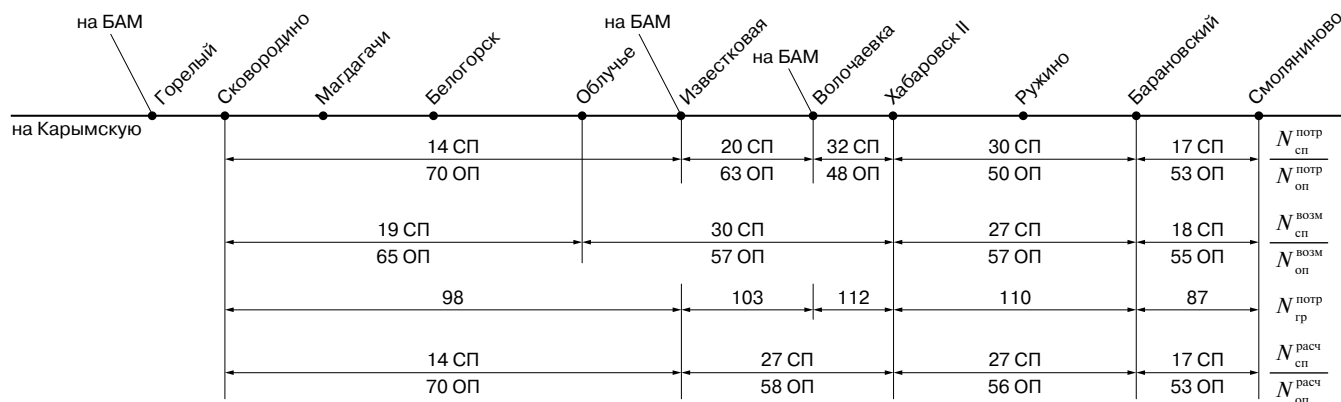


Рис. 1. Принятые расчетные значения количества СП и ОП для участков линии Сковородино—Смоляниново

Fig. 1. Stated calculated values of the number of double trains (DT) and single trains (ST) for sections of the Skovorodino—Smolyaninovo line

При определении значений $N_{\text{сп}}^{\text{расч}}$ должно быть учтено условие максимально возможного совмещения станций смены локомотивных бригад со станциями соединения/разъединения поездов [3]. По этому условию между станциями Известковая и Хабаровск II должно быть одинаковое количество СП, поскольку на расположенных здесь станциях не выполняются операции по соединению и разъединению поездов. Несоблюдение этого условия приведет к увеличению потребности в инвестициях на развитие станций, строительство новых домов отдыха локомотивных бригад, устройство новых ПТО вагонов. На участке Волочаевка—Хабаровск II количество СП сокращено с 32 до 27, на участке Хабаровск II—Барановский — с 30 до 27.

Выбор станций соединения/разъединения поездов и смены локомотивных бригад. В соответствии с (1) необходимо определить размещение станций соединения/разъединения поездов $n_{\text{сп}}^{\text{мин}}$ для экономии инвестиций и текущих расходов. Прежде всего, должно быть обеспечено их максимально возможное совмещение со станциями смены локомотивных бригад. Станциями смены локомотивных бригад на линии Сковородино—Смоляниново являются: Сковородино, Магдагачи, Белогорск, Облучье, Хабаровск II, Ружино. Из этих же станций следует выбирать и варианты размещения станций соединения/разъединения.

При выборе вариантов учитывается, что часть ОП поступает на линию Сковородино—Смоляниново со станции Карымская (рис. 1). Такие поезда после смены локомотивных бригад на станции Уруша следуют без остановки до станции Сковородино. Из этих поездов формирование СП целесообразно выполнять на станции Облучье. ОП, следующие с БАМ, проходят смену локомотивных бригад в Смоляниново, где их и целесообразно соединять в СП.

Также учтено, что из-за сложного профиля пути необходимо максимально сокращать количество СП на участке Барановский—Смоляниново.

На рис. 2 представлены возможные варианты выбора станций соединения/разъединения поездов.

При сравнении вариантов необходимо учитывать следующие меры усиления технического оснащения станций и участков:

а) устройство специализированных технологических путей с целью обеспечения поточного с минимальными затратами времени выполнения операций соединения/разъединения поездов, а также минимизации задержек в поездной и маневровой работе на таких станциях;

б) устройство путей двойной длины на станциях смены локомотивных бригад у СП;

в) усиление устройств электроснабжения на участках, где предусматривается обращение СП на постоянной основе;

г) развитие ПТО вагонов на станциях соединения/разъединения поездов и станциях смены в СП локомотивных бригад.

При определении мер по усилению технического оснащения учитывается, что общее расчетное количество СП и ОП, следующих по участкам, не изменяется по вариантам. Поэтому и общее количество локомотивов и локомотивных бригад по участкам для различных вариантов практически не изменяется. Также одинаковым является и общее количество операций по соединению/разъединению поездов.

Рассмотрим значения переменных величин, участвующих в расчете, по составляющим группам.

а) Дополнительное количество специализированных технологических путей для соединения/разъединения поездов определяется по данным рис. 2 и по вариантам 1, 2, 3, представленным в табл. 1. На этапе сравнения вариантов принимается, что при

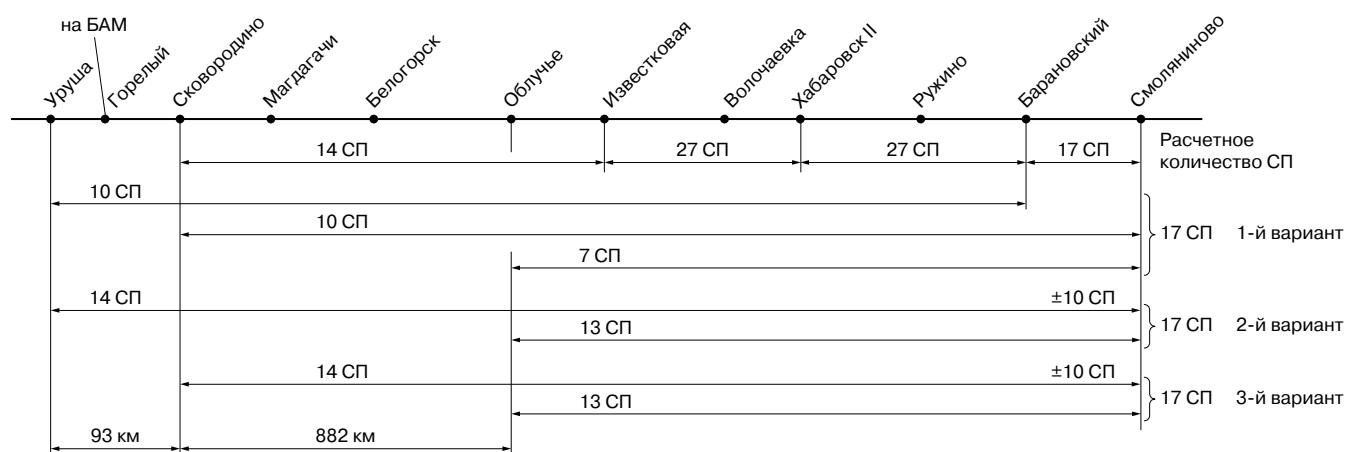


Рис. 2. Возможные варианты выбора станций соединения/разъединения поездов на линии Уруша—Смоляниново
Fig. 2. Possible options for choosing stations for connecting/disconnecting trains on the Urusha—Smolyaninovo line

соединении более 10 СП в сутки требуется два специализированных пути. Затраты времени на разъединение поездов примерно в два раза меньше, поэтому второй путь требуется при разъединении более 20 поездов.

Например, на станции Сковородино в третьем варианте требуется соединение/разъединение 14 СП/сут. В этом случае требуются два специализированных пути для соединения и один специализированный путь для разъединения поездов. По станции Облучье во втором варианте требуются соединение/разъединение 13 СП/сут. В этом случае также требуется два специализированных пути для соединения и один специализированный путь для разъединения поездов.

б) Дополнительное количество путей двойной длины для выполнения операций смены локомотивных бригад определяется по данным рис. 2 и по вариантам 1, 2, 3, представленным в табл. 2. Для вариантных расчетов принимается, что при количестве операций по смене локомотивных бригад более 10 СП в сутки требуются два пути двойной длины.

Например, в первом варианте по станции Облучье осуществляется смена локомотивных бригад у 20 СП/сут, а во втором варианте у 14 СП/сут. В обоих вариантах требуется по два пути двойной длины.

в) Определение мер по усилению устройств электроснабжения [11] выполняется на основе данных рис. 2, на котором указаны расстояния между станциями Уруша, Сковородино и Облучье.

В табл. 3 приведены данные по вариантам количества СП, следующих по участкам ($N_{сп}$), и протяженности главных путей, требующих усиления устройств электроснабжения при пропуске СП ($L_{эл}$).

г) Дополнительные ПТО вагонов [12, 13] могут потребоваться при устройстве специализированных путей для соединения поездов. Они обязательны для обслуживания СП на путях двойной длины при смене локомотивных бригад. Соответственно, затраты по развитию ПТО вагонов определяются количеством путей для соединения поездов и для смены локомотивных бригад, т. е. по данным табл. 1 и 2. По первому

Таблица 1

Дополнительное количество специализированных технологических путей для соединения/разъединения поездов по вариантам 1, 2, 3

Table 1

Additional number of specialized technological tracks for connecting/disconnecting trains according to options 1, 2, 3

№ варианта	Операции	Станции, направление движения						Всего дополнительных путей		Всего путей по вариантам на всех станциях
		Уруша		Сковородино		Облучье		четное	нечетное	
		четное	нечетное	четное	нечетное	четное	нечетное			
1	Соединение	1	—	1	—	1	—	3	—	6
	Разъединение	—	1	—	1	—	1	—	3	
2	Соединение	2	—	—	—	2	—	4	—	6
	Разъединение	—	1	—	—	—	1	—	2	
3	Соединение	—	—	2	—	2	—	4	—	6
	Разъединение	—	—	—	1	—	1	—	2	

Таблица 2

Количество операций по смене локомотивных бригад $n_{\text{лб}}$ и количество путей двойной длины $n_{\text{пут}}$ на станциях смены локомотивных бригад по вариантам 1, 2, 3

Table 2

Number of operations $n_{\text{лб}}$ to change locomotive crews and number $n_{\text{пут}}$ of double-length tracks at stations for changing locomotive crews according to options 1, 2, 3

№ варианта	Показатель	$n_{\text{лб}}$ и $n_{\text{пут}}$ по станциям				Всего $n_{\text{лб}}$ и $n_{\text{пут}}$ по вариантам
		Сковородино	Магдагачи	Белогорск	Облучье	
1	$n_{\text{лб}}$	10	20	20	20	70
	$n_{\text{пут}}$	1	2	2	2	7
2	$n_{\text{лб}}$	14	14	14	14	56
	$n_{\text{пут}}$	2	2	2	2	8
3	$n_{\text{лб}}$	—	14	14	14	42
	$n_{\text{пут}}$	—	2	2	2	6

Таблица 3

Значения $N_{\text{сп}}$ и $L_{\text{гл}}^{\text{эл}}$ по вариантам 1, 2, 3

Table 3

$N_{\text{сп}}$ and $L_{\text{гл}}^{\text{эл}}$ values for options 1, 2, 3

№ варианта	Показатель	Значения $N_{\text{сп}}$, СП/сут и $L_{\text{гл}}^{\text{эл}}$, км по участкам и вариантам	
		Уруша—Сковородино	Сковородино—Облучье
1	$N_{\text{сп}}$	10	20
	$L_{\text{гл}}^{\text{эл}}$	93	882
2	$N_{\text{сп}}$	14	14
	$L_{\text{гл}}^{\text{эл}}$	93	882
3	$N_{\text{сп}}$	—	14
	$L_{\text{гл}}^{\text{эл}}$	—	882

Таблица 4

Сводные данные по усилению технического оснащения линии Уруша—Смоляниново по вариантам 1, 2, 3

Table 4

Summary data on strengthening the technical equipment of the Urusha—Smolyaninovo line by options 1, 2, 3

№ варианта	$n_{\text{лб}} + n_{\text{пут}}$, ед.	$n_{\text{пто}}$, ед.	$L_{\text{гл}}^{\text{эл}}$ и $N_{\text{сп}}$ по вариантам	
			$L_{\text{гл}}^{\text{эл}}$, км	$N_{\text{сп}}$, СП/сут
1	13	10	93	10
			882	20
2	14	12	975	14
3	12	10	882	14

варианту дополнительное устройство ПТО вагонов требуется для 10 путей, по второму — для 12 путей, по третьему — для 10 путей (табл. 4).

Из сводных данных по усилению технического оснащения линии Уруша—Смоляниново по вариан-

там 1, 2, 3 (табл. 4) следует, что наиболее эффективным (оптимальным) является третий вариант.

Согласно (1) в случае затруднений с развитием станций соединения/разъединения поездов и смены локомотивных бригад (в целях экономии инвестиций) пути двойной длины могут устраиваться на близрасположенных вспомогательных станциях с доставкой к ним локомотивных бригад. Изучение на предпроектной стадии топографических условий и расположения пристанционной застройки показало, что вспомогательными станциями могут быть: Ядрин для станции Облучье, Лесозаводск для станции Ружино, Раздольное для станции Барановский и Шкотово для станции Смоляниново. Это минимизирует затраты на развитие станций ($K_{\text{ст}}^{\text{мин}}$).

Сокращение или даже исключение затрат на развитие промежуточных станций, где совершается обгон СП пассажирскими поездами, достигается за счет построения графика движения со специализированными «безобгонными» нитками для СП [14]. На линии Сковородино—Смоляниново такие возможности имеются вследствие небольших размеров пассажирского движения, что показали разработанные с использованием имитационной модели (АПК «ЭЛБРУС») графики движения поездов.

Специализированные технологические линии на станциях. Минимизация текущих затрат на соединение/разъединение поездов достигается за счет использования специализированных технологических линий на станциях для выполнения этих операций. Возможны две принципиальные схемы станций: с последовательным и параллельным выполнением маневровых передвижений. На рис. 3 представлены технологические схемы для последовательного (а) и параллельного (б) выполнения операций соединения поездов. На схеме а выполняется два передвижения — ОП 1 на технологический путь и после этого ОП 2 также на технологический путь с присоединением к ОП 1. По схеме б для образования СП выполняется два передвижения — ОП 1 на вытяжной путь, а затем на 2-й станционный путь с присоединением к поезду ОП 2. Для возможности сравнения затрат времени и расходов по этим вариантам во второй схеме необходимо привести СП в положение, которое он достигает в схеме а. Таким образом, в сравниваемых условиях в схеме а соединение поездов требует в расчете на один ОП преодоления расстояния $l_1 + l_2$, а в схеме б — $l_3 + l_4 + 2l_5$. Очевидно, что схема а эффективнее схемы б, в том числе и по длине потребных станционных путей. Поэтому схему а следует использовать для соединения поездов. Аналогичные расчеты показывают, что и при разъединении поездов должна использоваться схема станций с последовательным выполнением данной технологической операции.

Потребное количество локомотивов. Локомотивы, обслуживающие СП, должны оборудоваться устрой-

ствами для обеспечения их вождения — ИСАВП-РТ (или аналогичными системами по функциональным возможностям) [15]. Определение количества таких локомотивов $N_{\text{эл}}$ выполняется на основе действующих положений [7] с учетом особенности организации работы с СП:

$$N_{\text{эл}} = \frac{\sum pl}{Q S_{\text{сут}} \varphi_{\text{л}} 365}, \text{ локомотивов,} \quad (3)$$

где $\sum pl$ — грузооборот, выполняемый локомотивами, обслуживающими СП, т-км брутто; Q — средняя масса поездов (в одинарном исчислении), следующих с локомотивами, обслуживающими СП, т брутто; $S_{\text{сут}}$ — среднесуточный пробег локомотивов эксплуатируемого парка, занятых обслуживанием СП, км; $\varphi_{\text{л}}$ — коэффициент производительности локомотивов, учитывающий долю поезд-километров и локомотиво-километров линейного пробега.

Расчет эксплуатируемого парка локомотивов выполняется по графику движения поездов, построенному на основе имитационной модели, при условии движения минимального расчетного количества СП. Соответственно, в расчетах могут использоваться значения $\sum pl$, Q , $S_{\text{сут}}$, получаемые по результатам имитационного моделирования. Коэффициент $\varphi_{\text{л}}$ в этом случае становится равным единице, поскольку все составляющие формулы (3) относятся исключительно к локомотивам, обслуживающим СП. Для расчета потребного количества локомотивов $N_{\text{эл}}$ требуется дополнительно учесть локомотивы, обслуживающие СП и выполняющие пробег в одиночном следовании. Необходимо использовать показатели, характеризующие СП, — количество, массу на различных участках линии Сковородино (Уруша)—Смоляниново. Станция Уруша в расчетах учитывается, поскольку локомотивы, обслуживающие СП, следуют до этой станции с ОП. Например, СП, сформированные в Смоляниново (Шкотово), могут следовать до станции Облучье (Ядрин) и далее ОП до станции Сковородино без смены локомотивов, при этом тонно-километровая работа для локомотивов, обслуживающих СП, определяется по сумме максимального количества СП соответствующей массы на участке линии Сковородино (Уруша)—Смоляниново в обоих направлениях движения с учетом их следования с СП и ОП на всем ее протяжении.

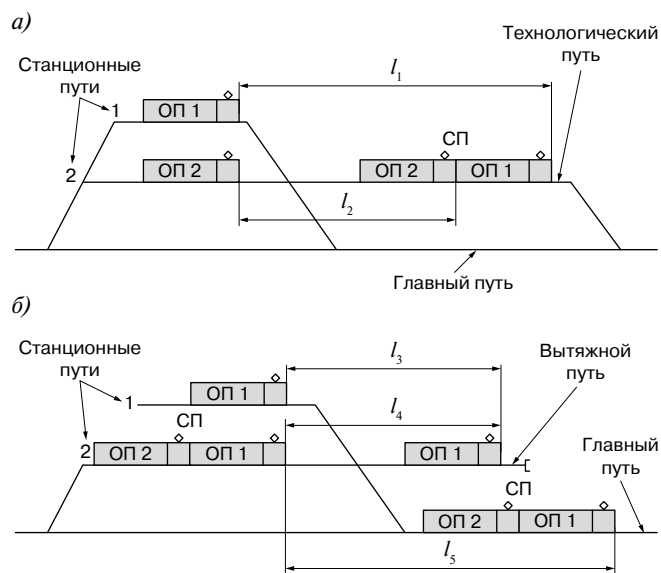


Рис. 3. Схемы станций:

а — с последовательным выполнением операций соединения поездов; б — с параллельным выполнением операций соединения поездов

Fig. 3. Station diagrams:

а — with sequential execution of train connection operations; б — with parallel execution of train connection operations

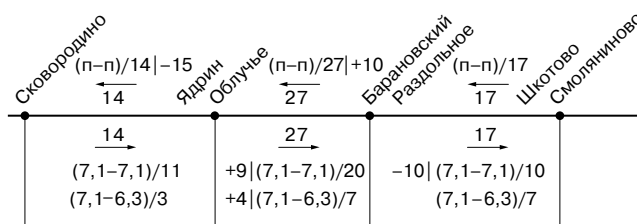
Принятые при построении графика движения сводные данные по количеству и схемам формирования СП приведены на рис. 4.

Из рис. 4 следует, что различные СП имеют массу: 7,1 + 7,1 = 14,2 тыс. т, 7,1 + 6,3 = 13,4 тыс. т и 1,7 + 1,7 = 3,4 тыс. т, причем в нечетном направлении следуют только СП из порожних маршрутов массой 3,4 тыс. т. С использованием этих данных определяются значения грузооборота $\sum pl$ и средней массы поездов Q в формуле (3). Для определения среднесуточного пробега $S_{\text{сут}}$ необходимо иметь данные о времени нахождения локомотивов, обслуживающих СП на линии Сковородино (Уруша)—Смоляниново. Расчетная схема для определения времени выполняемых операций с локомотивами, обслуживающими СП, для каждого назначения СП приведена на рис. 5.

Например, для назначения СП (4 СП) Сковородино—Смоляниново (Шкотово) перечень операций включает в себя:

Рис. 4. Принятые в графике движения сводные данные по количеству, массе и схемам формирования СП: 7,1 — ОП массой 7,1 тыс. т.; 6,3 — ОП массой 6,0–6,3 тыс. т.; п — порожний ОП массой 1,7 тыс. т; 14, 27, 17 — размеры движения СП на участке; +10 — увеличение (–15 — уменьшение) количества СП соответствующей схемы формирования

Fig. 4. Stated data on the number, mass and schemes of formation of DT adopted in the traffic schedule: 7,1 — ST weighing 7.1 thousand tons; 6,3 — ST weighing 6.0–6.3 thousand tons; п — empty ST weighing 1.7 thousand tons; 14, 27, 17 — traffic amount of DT on the section; +10 — increase (–15 — decrease) in the number of DT of the corresponding formation scheme



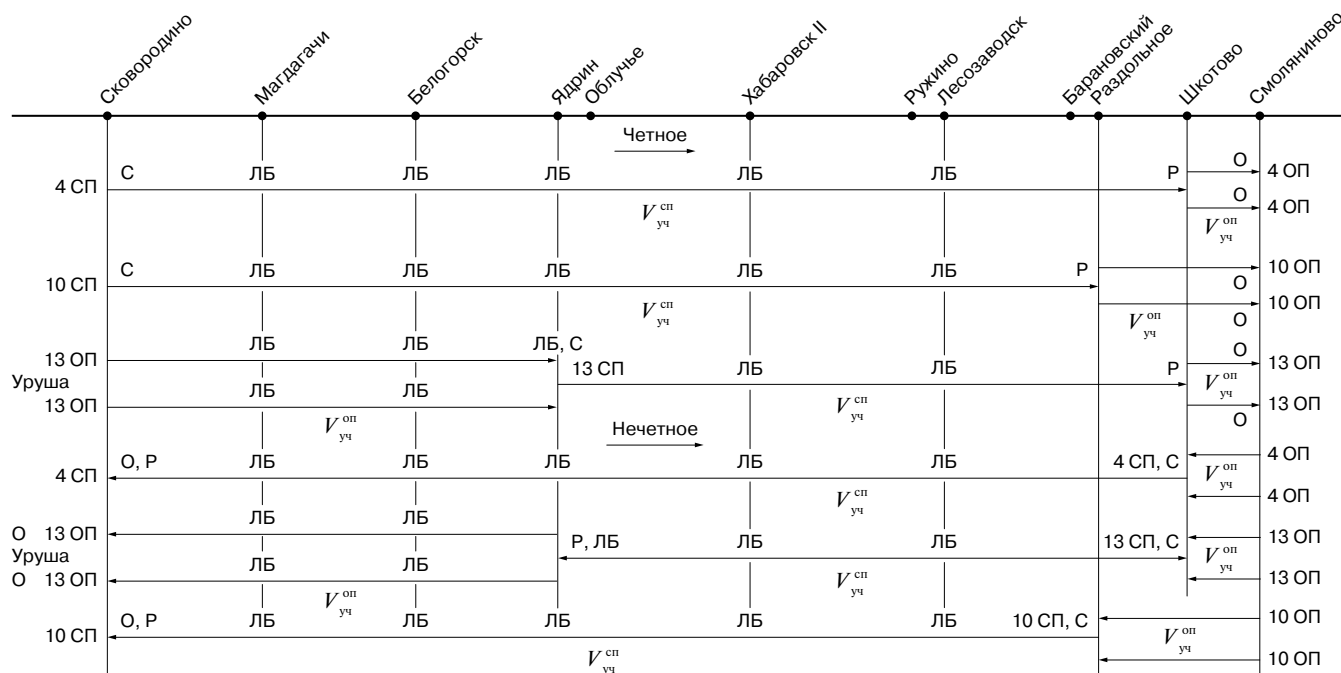


Рис. 5. Расчетная схема по назначениям СП для определения времени следования локомотивов, обслуживающих СП на линии Сковородино (Уруша)—Смоляниново: ЛБ — смена локомотивных бригад; С — соединение поездов; Р — разъединение СП; О — оборот локомотивов со сменой локомотивных бригад; $V_{уч}^{оп}$ — участковая скорость ОП; $V_{уч}^{сп}$ — участковая скорость СП

Fig. 5. Calculation scheme for directions of DT to determine travel time of locomotives handling the DT on the Skovorodino (Urusha)—Smolyaninovo line:

ЛБ — change of locomotive crews; С — train connection; Р — disconnection of DT; О — turnover of locomotives with a change of locomotive crews; $V_{уч}^{оп}$ — sectional speed of ST; $V_{уч}^{сп}$ — sectional speed of DT

1. Соединение (С) поездов на станции Сковородино.
2. Смена локомотивных бригад (ЛБ) на станциях Магдагачи, Белогорск, Ядрин (Облучье), Хабаровск II, Лесозаводск (Ружино).
3. Разъединение поездов (Р) на станции Шкотово.
4. Оборот локомотивов (О) на станции Смоляниново.

5. Следование по участкам от станции Сковородино до станции Шкотово с участковой скоростью $V_{уч}^{сп}$.
6. Следование от станции Шкотово до станции Смоляниново с участковой скоростью $V_{уч}^{оп}$.

Суммарное время, полученное на основании учета данных по операциям 1–6, определяет затраты времени локомотивов рабочего парка [16]. Полное значение этого времени для локомотивов эксплуатируемого парка [17] определяется по реальному соотношению количества локомотивов эксплуатируемого и рабочего парка. С учетом данных по всем назначениям СП величина $N_{эп}$ составила 279 локомотивов.

Вывод. Выполненные технико-экономические расчеты показали, что использование нового метода организации движения соединенных поездов на постоянной основе позволяет полностью обеспечить эффективное освоение перспективных объемов перевозок на линии Сковородино—Смоляниново Транссибирской магистрали.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шенфельд К.П., Захаров С.М. Конференция Международной ассоциации тяжеловесного движения в Кейптауне // Железные дороги мира. 2017. № 11. С. 63–66.
2. Захаров С.М., Шенфельд К.П. Развитие тяжеловесного движения в мире // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2013. № 4. С. 9–18.
3. Концепция освоения возрастающих объемов перевозок с применением технологии организации движения соединенных поездов на постоянной основе: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 18 августа 2020 г. № 1756/р.
4. Типовая технология организации и продвижения вагонопотока за счет формирования двоянных поездов на постоянной основе, утвержденная распоряжением ОАО «РЖД» от 14 сентября 2020 г. № 1963/р.
5. Поплавский А.А. Автоматизированная система управления перевозочным процессом железнодорожного транспорта в оперативном режиме: (сетевой и региональный уровни). Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Интекст, 2008. 192 с.
6. Сотников Е.А., Мехедов М.И., Холодняк П.С. Интенсификация загруженных направлений сети железных дорог // Железнодорожный транспорт. 2020. № 3. С. 17–20.
7. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов: утв. Минэкономики РФ, Минфин РФ, Госстрой РФ от 21 июня 1999 г. № ВК-477. 201 с.
8. Шенфельд К.П., Сотников Е.А. Пути научно-практического решения повышения провозной способности железных дорог // Управление товарными потоками и перевозочным процессом на железнодорожном транспорте на основе клиентоориентированности и логистических технологий: коллективная монография членов и научных партнеров Объединенного ученого

совета ОАО «РЖД» / под ред. Б. М. Лапидуса, А. Т. Осьминина. СПб.: Лема, 2019. С. 106–113.

9. Виноградов С. А., Кирякин В. Ю., Анфиногенов А. Ю. Прогнозные энергосберегающие графики движения поездов // Железнодорожный транспорт. 2011. № 8. С. 22–25.

10. Полигонные технологии движения поездов по графикам на основе автоматизированной системы «ЭЛЬБРУС» / Л. А. Мугинштейн [и др.] // Железнодорожный транспорт. 2015. № 3. С. 13–19.

11. Инструкция по организации обращения грузовых поездов повышенной массы и длины на железнодорожных путях общего пользования: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 1 сентября 2016 г. № 1799р в редакции распоряжения ОАО «РЖД» от 31 января 2019 г. № 166р.

12. Моделирование технологических процессов с повышением эффективности работы вагоноремонтных предприятий / Г. В. Райков [и др.] // Транспортное дело России. 2019. № 6. С. 143–144.

13. Кузнецов М. А., Райков Г. В. Повышение эффективности работы вагонного комплекса за счет оптимизации их параметров системы технического обслуживания и ремонта // Актуальные вопросы развития железнодорожного транспорта: материалы Всерос. науч.-практ. конф. к 75-летию аспирантуры Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта: в 2 ч. / ред. А. Б. Косарев, Г. В. Гогричани. М.: РАС, 2019. Ч. 2. С. 209–213.

14. Кирякин В. Ю., Новгородцева А. В. Полигонная технология формирования прогнозных вариантов графиков с использованием АПК «ЭЛЬБРУС» // Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО «РЖД». 2014. № 1. С. 16–21.

15. «ИСАВП РТ» — новая технология грузовых перевозок [Электронный ресурс] // Евразия Вести. 2004. № 1. URL: <https://www.eav.ru/publ1p.php?publit=2004-01a09> (дата обращения: 15.04.2020 г.).

16. Методика по определению потребных парков локомотивов для освоения прогнозируемых объемов перевозок грузов и пассажиров на долгосрочную перспективу: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 7 октября 2015 г. № 2993р.

17. Некрашевич В. И., Апатцев В. И. Управление эксплуатацией локомотивов: учеб. пособие. М.: Московский гос. ун-т путей сообщения, 2014. 340 с.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

МЕХЕДОВ Михаил Иванович,

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

СОТНИКОВ Евгений Александрович,

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

ХОЛОДНЯК Павел Сергеевич,

начальник отдела, НЦ «ЦМПЭ», АО «ВНИИЖТ»

КУРСИН Дмитрий Александрович,

канд. техн. наук, главный программист, НЦ «ЦМПЭ», АО «ВНИИЖТ»

КОРНИЕНКО Наталья Владимировна,

ведущий технолог, НЦ «ЦМПЭ», АО «ВНИИЖТ»

Статья поступила в редакцию 22.10.2020 г., принята к публикации 06.11.2020 г.

Для цитирования: Оптимизация условий организации движения соединенных поездов на постоянной основе на Транссибирской магистрали Восточного полигона сети железных дорог / М. И. Мехедов [и др.] // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2021. Т. 80. № 1. С. 4–12. DOI: <https://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-1-4-12>.

Condition optimization for organizing the operation of connected trains on an ongoing basis on the Trans-Siberian Railway of the Eastern operational range of the railway network

M. I. MEKHEDOV, E. A. SOTNIKOV, P. S. KHOLODNYAK, D. A. KURSIN, N. B. KORNIENKO

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

Abstract. A target function has been developed for solving the problem of increasing the carrying capacity of loaded lines by organizing the motion of connected (double) trains on an ongoing basis, providing for the minimization of investment and operating costs. Conditions of constant circulation of connected trains on the Skovorodino—Smolyaninovo line section of the Trans-Siberian Railway, where the prospective freight flows exceed the available carrying capacity, are considered. All solutions are designed especially for this section. It is taken into account that the main investments for the implementation of the new method are related to the development of stations for working with connected trains, as well as to strengthening the power supply system for driving connected trains of double mass. Additional operating costs are determined by the need to perform various technological operations with connected trains. Estimated number of connected trains $N_{\text{сч}}^{\text{расч}}$ has been established to ensure the required long-term carrying capacity. In order to save costs, the value of $N_{\text{сч}}^{\text{расч}}$ is minimized on the basis of

comparing the values of the maximum possible number of connected as well as single trains with the required carrying capacity on different sections of the line. The article considers methodology for the placement of stations for connecting/disconnecting trains, maximally combined with stations for changing locomotive crews, which provides savings in investment and operating costs. The optimal one was chosen from three possible options of such stations placement. Two schematic diagrams of stations for connecting/disconnecting trains are considered — with sequential and parallel execution of operations. It is shown that the minimization of costs is ensured by the sequential (flow) execution of these operations. In order to save investments, the development of a technical design for the implementation of a new method should provide the possibility of using auxiliary stations for connecting/disconnecting trains and changing locomotive crews of auxiliary stations with more favorable topographic conditions and the location of the station buildings for its development. Specific proposals on this issue are

given for the considered line section of the Trans-Siberian Railway. Taking into account the current provisions, a method has been developed for calculating the operating fleet of locomotives handling connected trains, the size of which is minimized. Organization of the driving of connected trains on an ongoing basis ensures the effective development of the prospective freight traffic.

Keywords: connected trains; carrying capacity; exhaustion of carrying capacity; optimal solutions; selection of train connection stations; required number of locomotives; development of traffic volumes

DOI: <https://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-1-4-12>

REFERENCES

- Shenfel'd K. P., Zakharov S. M. *Konferentsiya Mezhdunarodnoy assotsiatsii tyazhelovesnogo dvizheniya v Keyptaune* [Conference of the International Heavy Traffic Association in Cape Town]. Rail International, 2017, no. 11, pp. 63–66.
- Zakharov S. M., Shenfel'd K. P. *Razvitie tyazhelovesnogo dvizheniya v mire* [Development of heavy haul traffic in the world]. Vestnik VNIIZHT [Vestnik of the Railway Research Institute], 2013, no. 4, pp. 9–18.
- The concept of the development of increasing traffic volumes using the technology of organizing the motion of connected trains on an ongoing basis*. Approved by the Order of the JSC "Russian Railways" dated August 18, 2020 No. 1756/r (in Russ.).
- Typical technology for organizing and promoting car traffic through the formation of double trains on an ongoing basis. Approved by the Order of the JSC "Russian Railways" dated September 14, 2020 No. 1963/r (in Russ.).
- Poplavskiy A. A. *Avtomatizirovannaya sistema upravleniya perevozochnym protsessom zheleznodorozhnogo transporta v operativnom rezhime: (setevoy i regional'nyy urovni). Izd. 2-e, pererab. i dop.* [Automated control system of the transportation process of railway transport on-line: (network and regional levels). Ed. 2nd, revised and amended]. Moscow, Intext Publ., 2008, 192 p.
- Sotnikov E. A., Mekhedov M. I., Kholodnyak P. S. *Intensifikatsiya zagruzhennykh napravleniy seti zheleznikh dorog* [Intensification of loaded directions of the railway network]. Zheleznodorozhnyy transport, 2020, no. 3, pp. 17–20.
- Guidelines for assessing the effectiveness of investment projects*. Approved by the Ministry of Economy of the Russian Federation, the Ministry of Finance of the Russian Federation, the Gosstroy of the Russian Federation dated June 21, 1999 No. VK-477, 201 p. (in Russ.).
- Shenfel'd K. P., Sotnikov E. A. *Ways of scientific and practical solutions to increase the carrying capacity of railways*. Management of commodity flows and transportation process in railway transport based on customer focus and logistics technologies: collective monograph of members and scientific partners of the Joint Scientific Council of the JSC "Russian Railways"; edited by B. M. Lapidus, A. T. Os'minin. St. Petersburg, Lema Publ., 2019, pp. 106–113.
- Vinogradov S. A., Kiryakin V. Yu., Anfinogenov A. Yu. *Prognoznye energosberegayushchie grafiki dvizheniya poezdov* [Forecast energy-saving train schedules]. Zheleznodorozhnyy transport, 2011, no. 8, pp. 22–25.
- Muginstein L. A., Vinogradov S. A., Kiryakin V. Yu., Lyashko O. V., Anfinogenov A. Yu., Novgorodtseva A. V. *Polygon technologies for the train motion according to schedules based on the automated system "ELBRUS"*. Zheleznodorozhnyy transport, 2015, no. 3, pp. 13–19.

nologies for the train motion according to schedules based on the automated system "ELBRUS". Zheleznodorozhnyy transport, 2015, no. 3, pp. 13–19.

11. *Instructions for organizing the circulation of freight trains of increased weight and length on public railways*. Approved by the Order of the JSC "Russian Railways" on September 1, 2016 No. 1799r as amended by the Order of the JSC "Russian Railways" dated January 31, 2019 No. 166/r (in Russ.).

12. Raykov G. V., Sergeev K. A., Krivich O. Yu., Bombardirov A. P. *Modelirovaniye tekhnologicheskikh protsessov s povysheniye effektivnosti raboty vagonoremontnykh predpriyatiy* [Modeling of technological processes with increasing the efficiency of car repair enterprises]. Transport business of Russia, 2019, no. 6, pp. 143–144.

13. Kuznetsov M. A., Raykov G. V. *Improving the efficiency of the wagon complex by optimizing its parameters of the maintenance and repair system*. Actual problems of the development of railway transport: materials of the All-Russian scientific and practical conference for the 75th anniversary of the postgraduate study Institute of Railway Transport: in 2 parts. Edited by A. B. Kosarev, G. V. Gogrichiani. Moscow, RAS, 2019, P. 2, pp. 209–213.

14. Kiryakin V. Yu., Novgorodtseva A. V. *Poligonnaya tekhnologiya formirovaniya prognoznnykh variantov grafikov s ispol'zovaniem APK "EL'BRUS"* [Polygon technology for generating forecast options for graphs using the agro-industrial complex "ELBRUS"]. Byulleten' Ob'edinenennogo uchenogo soveta OAO "RZhD" [Bulletin of the Joint Scientific Council of the JSC "Russian Railways"], 2014, no. 1, pp. 16–21.

15. *"ISAVP RT" — novaya tekhnologiya gruzovykh perevozok* ["ISAVP RT" — a new technology for freight transportation]. Evraziya Vesti. [Eurasia. News], 2004, no. 1. URL: <https://www.eav.ru/publ1p.php?publit=2004-01a09> (retrieved on 15.04.2020) (in Russ.).

16. *Methodology for determining the required fleets of locomotives for the development of the projected volumes of freight and passenger traffic in the long term*. Approved by the Order of the JSC "Russian Railways" dated October 7, 2015 No. 2993r (in Russ.).

17. Nekrashevich V. I., Apattsev V. I. *Upravlenie ekspluatatsiey lokomotivov. Ucheb. posobie* [Management of the operation of locomotives. Tutorial]. Moscow, Moskovskiy gos. un-t putey soobshcheniya Publ., 2014, 340 p.

ABOUT THE AUTHORS

Mikhail I. MEKHEDOV,

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

Evgeniy A. SOTNIKOV,

Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief Researcher, JSC "VNIIZHT"

Pavel S. KHOLODNYAK,

Head of Department, SC "DMTE", JSC "VNIIZHT"

Dmitriy A. KURSIN,

Cand. Sci. (Eng.), Chief Programmer, SC "DMTE", JSC "VNIIZHT"

Natal'ya V. KORNIEENKO,

Leading Technologist, SC "DMTE", JSC "VNIIZHT"

Received 22.10.2020

Accepted 06.11.2020

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

For citation: Mekhedov M. I., Sotnikov E. A., Kholodnyak P. S., Kursin D. A., Kornienko N. B. Condition optimization for organizing the operation of connected trains on an ongoing basis on the Trans-Siberian Railway of the Eastern operational range of the railway network // VNIIZHT Scientific Journal. 2021. 80 (1): 4–12 (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-1-4-12>.

Метод построения адаптивного субоптимального стационарного регулятора движения поезда на основе искусственных нейронных сетей

С. В. МАЛАХОВ, М. Ю. КАПУСТИН

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

Аннотация. В статье рассмотрена современная методология выполнения синтеза субоптимального регулятора движения поезда с целью энергосбережения. Существующие методы оптимального управления тягой обладают рядом недостатков, главный из которых — отсутствие непосредственного использования в программе управления данных, полученных во время движения поезда. Математические модели, применяемые для решения оптимальной задачи, могут быть использованы корректно только в случае достаточной адекватности. Проверка на адекватность не является частью известных методов теории оптимального управления. Для устранения такого недостатка предлагается использовать метод оптимальных (субоптимальных) тяговых расчетов на основе искусственных нейронных сетей. Он позволяет повысить точность тяговых расчетов, что особенно важно в аспекте рассмотрения экономии энергозатрат, при этом сократив потребность в вычислительных мощностях. При использовании данного метода можно не только достичь результатов, близких к классическому методу Беллмана, но и проводить обучение или верификацию сети на основе зарегистрированных данных. В статье рассматривается процесс создания и обучения искусственной нейронной сети на модельных данных для решения задачи субоптимального управления. В качестве эталонных данных для обучения нейронной сети использовались режимы движения поезда, полученные методом Беллмана. Приведенные сравнительные результаты работы двух методов показывают применимость искусственных нейронных сетей для решения прикладных задач тяги поездов с возможностью непрерывного обучения, в том числе с использованием данных поездок, которые могут быть напрямую включены в обучающую или тестирующую выборку.

Ключевые слова: тяговые расчеты; оптимизация тяговых расчетов; нормирование расходов энергоресурсов на тягу поездов; искусственные нейронные сети; автоматические системы управления транспортными средствами; тяговые свойства локомотива; регулирование сил тяги и торможения

Введение. Железнодорожный транспорт является одним из основных потребителей электроэнергии и дизельного топлива в стране. Поэтому важной корпоративной задачей является снижение расхода топливно-энергетических ресурсов, в том числе на тягу поездов, позволяющее существенно сократить затраты компании. Затраты ОАО «РЖД» на электроэнергию по данным из годового отчета за 2018 г. составили 166,7 млрд руб., или 11 % от общих расходов, доля дизельного топлива составляет 8 % от общих рас-

ходов, или 110,7 млрд руб. Далее рассмотрим возможные пути снижения расхода электроэнергии на тягу поездов.

Решение задачи снижения расхода электроэнергии на тягу поездов может быть найдено при совершенствовании сети передачи, устройств преобразования электроэнергии и путем оптимального или квазиоптимального управления движением поезда. Первое направление представляется достаточно затратным и длительным по времени, так как требует серьезных капитальных вложений на реконструкцию тягово-энергетической сети, обновление оборудования тягового подвижного состава. Второе направление не предполагает существенных капитальных затрат и может быть реализовано двумя способами. Первый заключается в разработке бортовых систем автоматического ресурсосберегающего управления. Недостатками такого подхода являются: низкая производительность для реализации детального расчета; необходимость определенных капитальных затрат на внедрение таких систем, которое к тому же растянуто во времени; необходимость проведения обслуживания и актуализации данных бортовых систем (электронная карта, характеристики подвижного состава и т. д.). Второй способ заключается в применении стационарных комплексов оперативного планирования расхода энергоресурсов на поездку. Преимуществами этого способа являются:

- отсутствие необходимости в капитальных вложениях по причине использования действующих в компании высокопроизводительных вычислительных комплексов;
- агрегирование данных о поездках;
- автоматическая актуализация информации о характеристиках и начальных условиях движения подвижного состава из записанных в поездке данных;
- получение более точных результатов априорного и апостериорного тягового расчета за счет более детализированной математической модели поезда.

Недостатком такого способа является меньшая оперативность в случае отсутствия постоянной связи с подвижным составом. Однако после массового внедрения

надежной беспроводной связи с инфраструктурой данный недостаток будет исправлен.

Как правило, реализация энергосберегающей стратегии ведения поезда или планирование энергозатрат на движение по участку заключается в нахождении экстремумов целевой функции, например с точки зрения энергозатрат в заданных условиях. Для электрической тяги рассматриваются первичные энергозатраты J , учитывающие коэффициент полезного действия (КПД) электровоза. Так, для постоянного тока

$$J = \int_0^T i(n(s, t), t) u(n(s, t), t) dt, \quad (1)$$

где i — ток электровоза, А; u — напряжение на токоприемнике, В; t — время, с; T — заданное время хода, с; s — координата поезда, м; n — управление: позиция контроллера в тяге, выбег, ступень торможения.

Решение задачи оптимизации заключается в определении такой функции управления тягой, которая позволит минимизировать затраты энергии. Такое решение может быть найдено методами оптимального управления, которые обладают как достоинствами, так и некоторыми недостатками [1].

Наиболее предпочтительным с точки зрения отсутствия ограничений на подынтегральные функции (1) является метод динамического программирования [2, 3, 4, 5], заключающийся в дискретизации процесса движения и направленном переборе траекторий движения. Использование многоядерных процессоров и высокопроизводительных кластеров компьютеров позволяет создать многопоточную реализацию, которая достаточно эффективна для решения оптимальной задачи в стационарных условиях [5]. Для бортового применения динамического программирования без постоянной связи с инфраструктурой использование этого метода целесообразно для очень «грубой» модели поезда (без учета изменения напряжения на токоприемнике, расчета динамических сил внутри поезда, учета метеорологических факторов и других стохастических факторов и т. д.) с большими шагами варьирования управления и дискретизации по скорости. Фактически ранее задача оптимального управления рассматривалась только для точно заданных подынтегральных функций [1] и для выполнения адаптации без машинного обучения для применения в бортовой системе [6, 7], что не позволяло использовать весь объем накопленной рабочей информации в виде зарегистрированных на борту данных.

При эксплуатации системы управления следует учитывать то, что возможны ошибки из-за неточностей математической модели, начальной и рабочей информации. Неточность математической модели может быть снижена за счет дополнительной детализации. Неточности начальной информации могут

быть снижены за счет более качественной подготовки и проверки. Неточности рабочей информации снизить проблематично, так как они зависят от метрологических характеристик измерительных устройств, технического состояния систем поезда, случайных факторов с известными и неизвестными законами распределения вероятности. Поэтому требуется применять регулятор, основанный на адаптивном методе экстремального или квазиэкстремального управления.

Для решения проблемы неточности рабочей информации и реализации квазиоптимальных траекторий движения предлагается применять в дополнение к уже известным методам математический аппарат, использующий методологию машинного обучения. Далее будет рассмотрен один из методов машинного обучения, основанный на принципе идентификации объекта управления «вход-выход», т. е. искусственные нейронные сети (ИНС). Математиками А. Н. Колмогоровым и В. В. Арнольдом в 1957 г. была доказана теорема о представимости непрерывных функций нескольких переменных суперпозицией непрерывных функций одной переменной [8], которая в 1987 г. была переложена Хехт–Нильсеном для нейронных сетей: любая функция нескольких переменных может быть представлена двухслойной ИНС с прямыми полными связями с N нейронами входного слоя, $(2N+1)$ нейронами скрытого слоя с ограниченными функциями активации (например, сигмоидальными) и M нейронами выходного слоя с неизвестными функциями активации [9]. Из теоремы Колмогорова–Арнольда–Хехт–Нильсена (теорема КАХН) следует, что для любой функции многих переменных существует отображающая ее ИНС фиксированной размерности, при настройке (обучении) которой могут использоваться три степени свободы: область значений сигмоидальных функций активации нейронов скрытого слоя, наклон сигмоид нейронов этого слоя, вид функций активации нейронов выходного слоя [9]. Положения теоремы КАХН лежат в основе выбора регулятора ИНС для обозначенной задачи оптимизации.

ИНС представляют собой структуры простейших автоматов, которые имеют p входов и m выходов. Простейший автомат нейронной сети представляет собой нелинейный преобразователь и в общем случае выглядит следующим образом:

Входы—сумматор—активационная функция—выходы.

Выход связан с входами следующим соотношением:

$$OUT = F\left(\sum_{k=1}^N w_k x_k\right), \quad (2)$$

где F — активационная функция; w_k — вес входа нейрона; x_k — величина входа нейрона; N — количество входов нейрона.

Нейроны соединяются друг с другом и образуется ИНС, которая позволяет компактно хранить информацию, полученную при обучении, что, в свою очередь, позволяет применять несколько десятков или сотен обученных нейронных сетей для выбора лучшего решения в соответствии с (1). Наиболее применяемым алгоритмом обучения является метод обратного распространения [10]. Обучение ИНС является «дорогостоящим» этапом по сравнению с тестированием (валидацией) и эксплуатацией. Поэтому важно выбрать не только быстрый метод обучения, но и в целом успешную стратегию обучения. Выбор стратегии обучения ИНС не формализован и в общем случае является предметом поиска. Для рассматриваемого случая с целью ускорения получения ИНС, готовой для адаптации рабочей информации, на начальном этапе происходит обучение с «учителем», в качестве которого используется метод динамического программирования. Также обучение с «учителем» необходимо для того, чтобы обученная нейронная сеть для каждого текущего входа формировала выход, близкий к оптимальному, с точностью допустимой ошибки обучения (точность сходимости решения), заранее заложенной в алгоритм обучения.

Результаты расчета. На рис. 1 представлен график изменения суммарной среднеквадратической ошибки нейронной сети для одной эпохи обучения, т. е. после обучения сети на всем множестве пар «вход-выход» обучающей выборки. В данном случае обучающая выборка была составлена из 40 образцов и проводилось предварительное обучение на 100 эпохах для устранения эффекта необученной сети, который сопряжен с большими ошибками сети.

На рис. 2 представлен график изменения суммарной среднеквадратической ошибки нейронной сети для одной эпохи обучения после продолжения обучения ИНС на новой обучающей выборке. В данном случае обучающая выборка была из 165 образцов.

На рис. 3 показана зависимость ошибки при дообучении ИНС, т. е. при продолжении обучения на той же выборке при той же обучающей выборке, так как и во втором случае (рис. 2), когда был достигнут предел по эпохам обучения — 10 000. Предел по эпохам обучения подобран эмпирически с учетом времени обучения, которое зависит от размера сети, обучающей выборки и производительности компьютера. В большинстве случаев при правильном выборе размера сети и обучающей выборки обучение заканчивается успешно в пределах 10 000 эпох, но возможны и обратные случаи. Тогда требуется определить причины неудовлетворительного обучения и принять решение: дообучить, изменить структуру ИНС, изменить обучающую выборку.

Как видно из рис. 2, 3 график ошибки сети имеет всплески (попадания в локальные минимумы, пере-

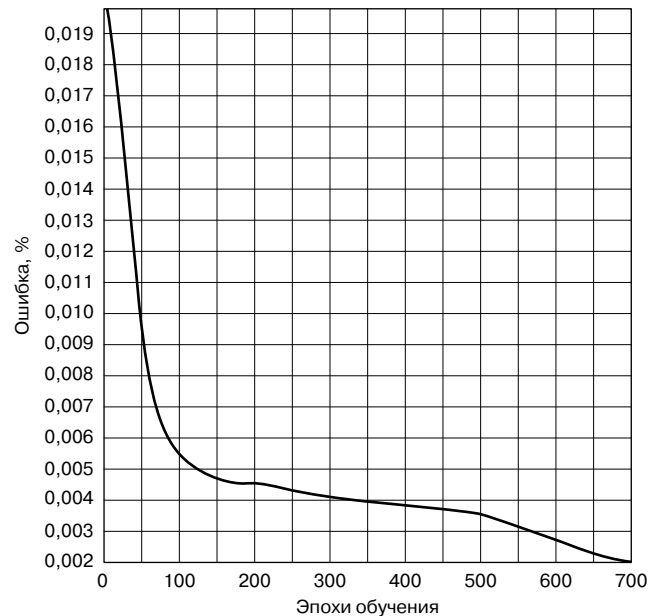


Рис. 1. График суммарной среднеквадратической ошибки при обучении ИНС на выборке из 40 образцов

Fig. 1. Graph of the total mean square error when training an artificial neural network (ANN) on a selection of 40 samples

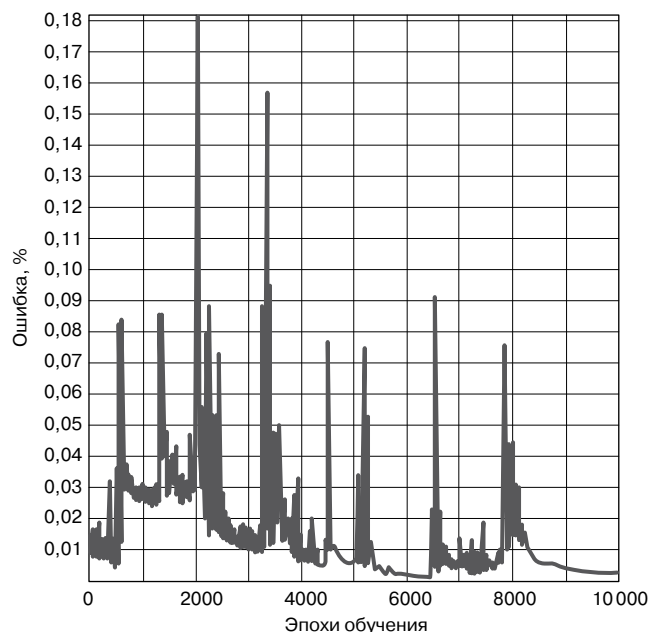


Рис. 2. График суммарной среднеквадратической ошибки при обучении ИНС, заранее обученной, на новой выборке из 165 образцов

Fig. 2. Graph of the total mean square error when training an ANN, pre-trained, on a new selection of 165 samples

обучения), что обусловлено алгоритмом обучения. Поэтому для повышения детерминированности процесса обучения и исключения данной ситуации важно применять известные методы [10]. Процесс

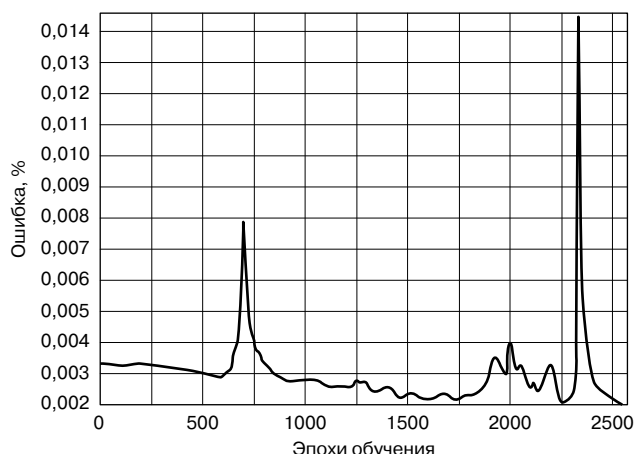


Рис. 3. График суммарной средневзвешенной ошибки ИНС при дообучении

Fig. 3. Graph of the total mean square error of the ANN with additional training

обучения прекращается после достижения необходимого уровня ошибки в 0,001 % (рис. 3).

Обучение ИНС на всю поездку происходит для каждой смены режима движения поезда или чаще, если не была пройдена валидация сети. Для этого автоматически выбираются входы для конкретной смены режима движения поезда и проводится обучение

для всей поездки. В случае неудовлетворительного обучения выборка может быть изменена путем добавления новых образцов. Если в случае нескольких изменений обучающей выборки обучение не заканчивается успешно, то проводится анализ входных данных и реконструкция сети по известным алгоритмам [10]. Для рассматриваемой сети использовалась следующая начальная топология: один входной слой из восьми нейронов с сигмоидальной функцией активации, два скрытых слоя по 100 нейронов каждый с сигмоидальными функциями активации, два нейрона в выходном слое с линейной функцией активации.

На рис. 4 и 5 приведены кривые движения поезда, полученные в результате тягового расчета с применением метода динамического программирования и нейросетевого метода соответственно.

Для расчетной типовой поездки на тяговом плече 200 км происходит около 100–150 и более смен режимов движения поезда, учитывая только ходовые позиции, выбег, торможение. Поэтому объем входных данных невелик и обучение ИНС протекает достаточно быстро, не более минуты на образец (поездку) или 100–150 мин суммарно для 120 поездок с вариацией условий движения.

Обученная ИНС с использованием эталонов, полученных методом динамического программирования,

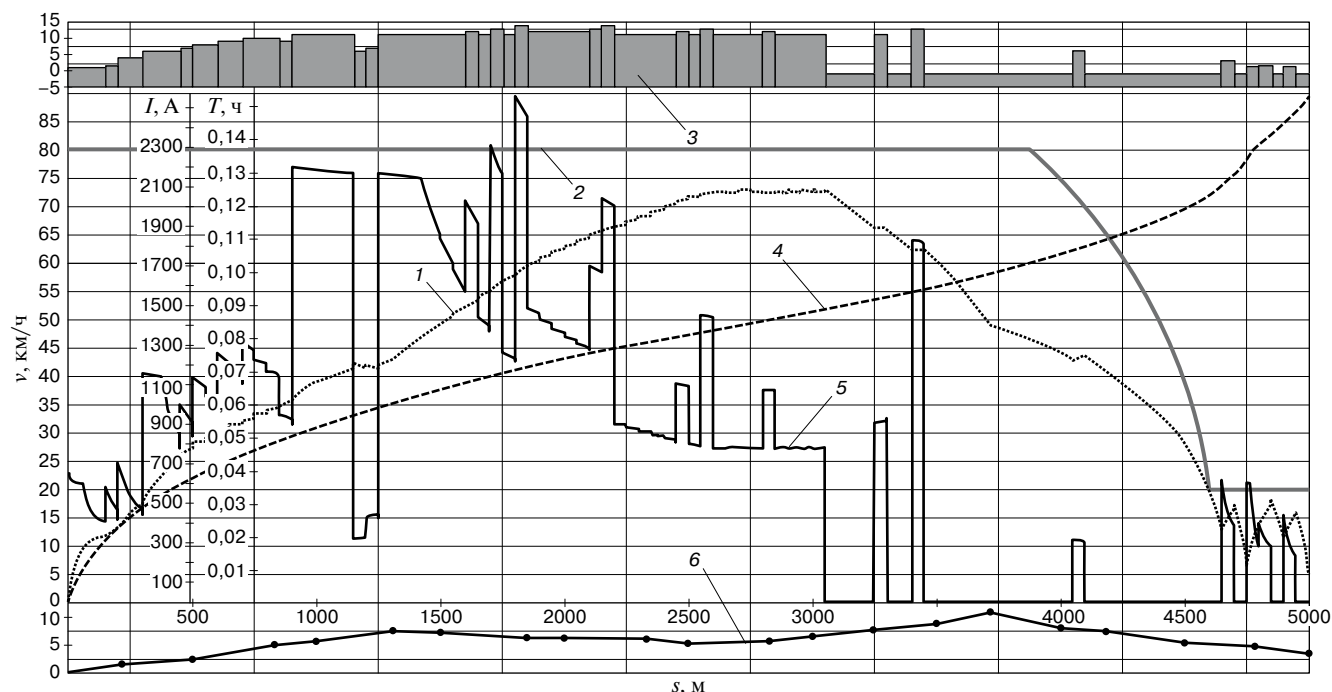


Рис. 4. Тяговый расчет методом динамического программирования с шагом дискретизации 50 м по координате и 1 км/ч по скорости:

1 — скорость; 2 — допустимая скорость; 3 — режим движения; 4 — время; 5 — ток; 6 — профиль пути
Fig. 4. Traction calculation by the dynamic programming method with a sampling step of 50 m in coordinate and 1 km/h in speed:
1 — speed; 2 — permissible speed; 3 — driving mode; 4 — time; 5 — current; 6 — track profile

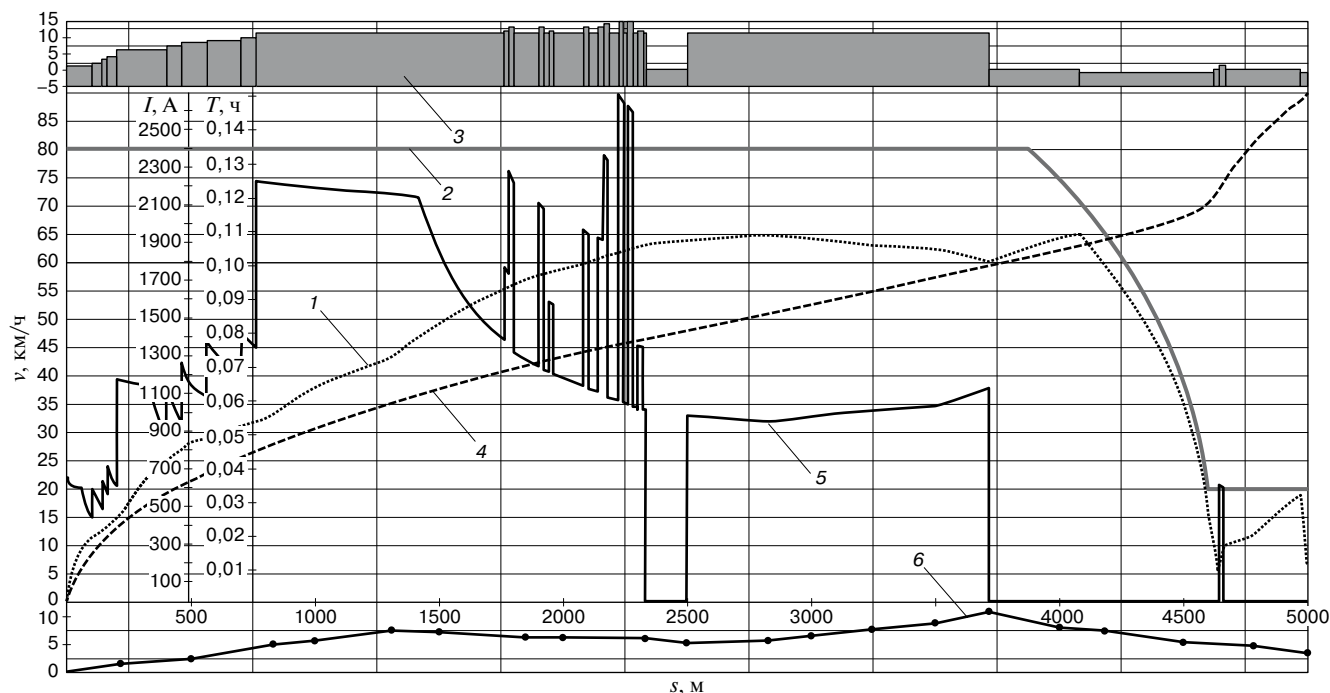


Рис. 5. Тяговый расчет нейросетевым методом после обучения на 120 поездках:
 1 — скорость; 2 — допустимая скорость; 3 — режим движения; 4 — время; 5 — ток; 6 — профиль пути
 Fig. 5. Traction calculation by the neural network method after training on 120 trips:
 1 — speed; 2 — permissible speed; 3 — driving mode; 4 — time; 5 — current; 6 — track profile

применяется с постоянным проведением дообучения с целью адаптации под конкретный тяговый подвижной состав или даже под конкретную тяговую единицу. Также могут быть созданы сети для более точного управления в условиях воздействия определенных факторов, так как обобщение сети без изменения ее размеров может увеличить погрешность управления. Положительным свойством обобщения является непрерывность сети в условиях, близких к расчетным, но не совпадающих с ними. Обобщение проверяется с помощью теста обученной ИНС на выборке, которая не была использована для обучения, и на выборке, полученной из данных, зарегистрированных в процессе движения поезда. Если ИНС проходит тест (суммарная ошибка на тестовой выборке меньше заданной), то обучение считается завершенным.

Однако во время движения может возникнуть ситуация, которая потребует кардинального пересмотра плана ведения поезда (например, дополнительные ограничения по скорости и прочее). В этом случае одной ИНС будет недостаточно и требуется использовать ИНС, которая обучалась по иному критерию. Для этого следует использовать аналогичный способ получения ИНС, но с учетом иного критерия оптимизации управления.

Выводы. 1. Применение ИНС в качестве квазиоптимального адаптивного регулятора позволит снизить

потребности в вычислительной мощности стационарного управляющего комплекса за счет обобщения и постоянной адаптации сети по сравнению с методами, не учитывающими погрешности в начальной и рабочей информации.

2. Индивидуальная адаптация позволит учитывать текущее состояние единицы тягового подвижного состава и фактически оценивать его энергоэффективность в процессе эксплуатации.

3. Низкие требования к вычислительным ресурсам при эксплуатации ИНС создают дополнительные преимущества по параллельному применению нескольких сотен или тысяч сетей — например, при неизвестной заранее массе поезда и заданном времени движения выбирается лучшая ИНС по критерию минимума энергозатрат.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Оптимизация управления движением поездов: учеб. пособие / Л. А. Баранов [и др.]; под ред. Л. А. Баранова. М.: МИИТ, 2011. 164 с.
2. Ерофеев Е. В. Выбор оптимального режима ведения поезда на АЦВМ с применением метода динамического программирования // Труды МИИТ. 1967. Вып. 228. С. 16–30.
3. Беллман Р., Дрейфус С. Прикладные задачи динамического программирования / пер. с англ. Н. М. Митрофановой; под ред. А. А. Первозванского. М.: Наука, 1965. 458 с.
4. Юренко К. И. Расчет энергооптимальных режимов движения перспективного подвижного состава методом динамического

программирования // Известия вузов. Электромеханика. 2013. № 3. С. 78–82.

5. Малахов С. В., Капустин М. Ю. Реализация динамического программирования с учетом эффективного пересчета в бортовой системе // Наука и техника транспорта. 2020. № 2. С. 74–80.

6. Мугинштейн Л. А., Илютович А. Е., Ябко И. А. Энергооптимальные методы управления движением поездов: сб. науч. тр. ОАО «ВНИИЖТ». М.: Интекст, 2012. 80 с.

7. Юренко К. И., Савоськин А. Н., Фандеев Е. И. Исследование оптимальных траекторий движения поезда с учетом случайных факторов // Труды 3-й науч.-техн. конф. «Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте ИСУЖТ-2014» (Москва, 18 ноября 2014 г.) / ОАО «НИИАС». М., 2014. С. 211–214.

8. Колмогоров А. Н. О представлении непрерывных функций нескольких переменных в виде суперпозиций непрерывных функций одного переменного и сложения // Доклады АН СССР. 1957. Т. 114. № 5. С. 953–956.

9. Hecht-Nielsen R. Kolmogorov's Mapping Neural Network Existence Theorem // IEEE First Annual Int. Conf. on Neural Networks. San Diego, 1987. Vol. 3. P. 11–13.

10. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс. Изд. 2-е, испр. М.; СПб.: Диалектика, 2019. 1104 с.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

МАЛАХОВ Сергей Валерьевич,
ассистент, кафедра «Тяговый подвижной состав»,
ФГАОУ ВО «РУТ» (МИИТ)

КАПУСТИН Михаил Юрьевич,
канд. техн. наук, доцент, кафедра «Тяговый подвижной состав», ФГАОУ ВО «РУТ» (МИИТ); член Научно-технического совета ОАО «РЖД»

Статья поступила в редакцию 21.02.2020 г., актуализирована 28.10.2020 г., принята к публикации 30.11.2020 г.

Для цитирования: Малахов С. В., Капустин М. Ю. Метод построения адаптивного субоптимального стационарного регулятора движения поезда на основе искусственных нейронных сетей // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2021. Т. 80. № 1. С. 13–19. DOI: <https://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-1-13-19>.

Method for constructing an adaptive suboptimal stationary train traffic controller based on artificial neural networks

S. V. MALAKHOV, M. Yu. KAPUSTIN

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

Abstract. The article discusses the modern methodology for performing the synthesis of a suboptimal train controller for the purpose of energy saving. The existing methods of optimal traction control have a number of disadvantages, the main one of which is the lack of direct use in the control program of the data obtained during train operation. Mathematical models used to solve the optimal problem can be used correctly only in the case of sufficient adequacy. Adequacy check is not part of the known methods of optimal control theory. To eliminate this drawback, it is proposed to use the method of optimal (suboptimal) traction calculations based on artificial neural networks. It improves the accuracy of traction calculations, which is especially important in the aspect of considering energy savings, while reducing the need for computing power. When using this method, it is possible not only to achieve results close to the classical Bellman method, but also to train or verify the network using the recorded data. The article discusses the process of creating and training an artificial neural network based on model data to solve the problem of suboptimal control. The train motion modes obtained by Bellman's method were used as reference data for training the neural network. The presented comparative results of the two methods show the applicability of artificial neural networks for solving applied problems of train traction with the possibility of continuous learning, including the use of trip data, which can be directly included in the training or testing set.

Keywords: traction calculations; optimization of traction calculations; rationing of energy consumption for train traction; artificial neural networks; automatic vehicle control systems; traction properties of the locomotive; regulation of traction and braking forces

REFERENCES

1. Baranov L. A., Erofeev E. V., Meleshin I. S., Chin' L. M. *Optimizatsiya upravleniya dvizheniem poezdov. Ucheb. posobie* [Optimization of train traffic control. Textbook]. Moscow, MIIT Publ., 2011, 164 p.
2. Erofeev E. V. *Vybor optimal'nogo rezhima vedeniya poezda na ATsVM s primeneniem metoda dinamicheskogo programmirovaniya* [The choice of the optimal mode of running a train on a digital computer using the method of dynamic programming]. Trudy MIIT [Proceedings of the MIIT], 1967, Vol. 228, pp. 16–30.
3. Bellman R., Dreyfus S. *Prikladnye zadachi dinamicheskogo programmirovaniya* [Applied problems of dynamic programming. English translation by N. M. Mitrofanova]. Moscow, Nauka Publ., 1965, 458 p.
4. Yurenko K. I. *Raschet energooptimal'nykh rezhimov dvizheniya perspektivnogo podvizhnogo sostava metodom dinamicheskogo programmirovaniya* [Calculation of energy-optimal modes of motion of perspective rolling stock by the method of dynamic programming]. Izvestiya vuzov. Elektromekhanika [University news. Electromechanics], 2013, no. 3, pp. 78–82.
5. Malakhov S. V., Kapustin M. Yu. *Realizatsiya dinamicheskogo programmirovaniya s uchetom effektivnogo perescheta v bortovoy sisteme* [Implementation of dynamic programming taking into account effective recalculation in the onboard system]. Science and Technology in Transport, 2020, no. 2, pp. 74–80.
6. Muginshteyn L. A., Ilyutovich A. E., Yabko I. A. *Energooptimal'nye metody upravleniya dvizheniem poezdov. Sb. nauch. tr. OAO "VNIIZhT"* [Energy-optimal methods of train traffic control. Proc. of the JSC "VNIIZhT"]. Moscow, Intext Publ., 2012, 80 p.
7. Yurenko K. I., Savos'kin A. N., Fandeev E. I. *Issledovanie optimal'nykh traektoriy dvizheniya poezda s uchetom sluchaynykh faktorov* [Investigation of optimal trajectories of the train motion taking into account random factors]. Trudy 3-y nauch.-tekhn. konf.

DOI: <https://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-1-13-19>

"Intellectual'nye sistemy upravleniya na zheleznodorozhnom transporte ISUZHT-2014" (Moskva, 18 noyabrya 2014 g.) [Proc. of the 3rd scientific and technical conference "Intelligent control systems in railway transport ISUZHT-2014" (Moscow, November 18, 2014)]. Moscow, JSC "NIIAS" Publ., 2014, pp. 211–214.

8. Kolmogorov A. N. *O predstavlenii nepreryvnykh funktsiy neskol'kikh peremennykh v vide superpozitsiy nepreryvnykh funktsiy odnogo peremennogo i slozheniya* [On the representation of continuous functions of several variables in the form of superpositions of continuous functions of one variable and addition]. Doklady AN SSSR [USSR Science Academy reports], 1957, Vol. 114, no. 5, pp. 953–956.

9. Hecht-Nielsen R. *Kolmogorov's Mapping Neural Network Existence Theorem*. IEEE First Annual Int. Conf. on Neural Networks. San Diego, 1987, Vol. 3, pp. 11–13.

10. Khaykin S. *Neyronnye seti: polnyy kurs* [Neural networks: Complete course]. Izd. 2-e, ispr. [Edition 2nd, revised]. Moscow, St. Petersburg, Dialektika Publ., 2019, 1104 p.

ABOUT THE AUTHORS

Sergey V. MALAKHOV,

Assistant, Department "Traction Rolling Stock", FGAOU VO "RUT" (MIIT)

Mikhail Yu. KAPUSTIN,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department "Traction Rolling Stock", FGAOU VO "RUT" (MIIT); member of the Scientific and Technical Council of the JSC "RZD"

Received 21.02.2020

Revised 28.10.2020

Accepted 30.11.2020

E-mail: needhelps@mail.ru (S. V. Malakhov)

For citation: Malakhov S. V., Kapustin M. Yu. Method for constructing an adaptive suboptimal stationary train traffic controller based on artificial neural networks // VNIIZHT Scientific Journal. 2021. 80 (1): 13–19 (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-1-13-19>.

ВНИМАНИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ!

ДОПОЛНИТЕЛЬНОЕ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ В АО «ВНИИЖТ»

Центр дополнительного образования (ЦДО) (лиц. № 2329 от 11.08.2016 г.) проводит повышение квалификации и профессиональную переподготовку слушателей по следующим направлениям:

- Анализ, моделирование бизнес-архитектуры и бизнес-процессов, использование процессного подхода в управлении организацией (для руководителей и специалистов)
- Проектирование, изготовление и приемка сварных конструкций железнодорожного подвижного состава, управление качеством в сварке рельсов, проведение аудита сварочного производства
- Построение энергосберегающих графиков движения поездов с использованием автоматизированной системы АПК ЭЛЬБРУС
- Изучение технологии транспортных процессов
- Транспортная логистика
- Изучения принципов построения и функционирования автоматизированной системы контроля за работой специального подвижного состава
- Изучение устройств, диагностики и средств контроля состояния железнодорожного пути
- Эксплуатация, техническое обслуживание и ремонт подвижного состава и устройств электроснабжения

Программы обучения могут быть разработаны по инициативе заказчика с учетом профессиональной деятельности АО «ВНИИЖТ».

Обучение проводится как в очной форме, так и с применением дистанционных образовательных технологий.

По итогам освоения образовательных программ слушателям выдается документ о квалификации государственного образца.

Куратор ЦДО — Пархаев Алексей Александрович, кандидат социологических наук, заместитель Генерального директора по управлению персоналом и социальным вопросам.

По вопросам обучения обращаться по адресу: 129626, г. Москва, 3-я Мытищинская улица, д.10
Центр дополнительного образования. Тел.: +7 (495) 602-81-74, e-mail: shiryaeva.oksana@vniizht.ru



Метод регулировки топливной аппаратуры тепловозного дизеля по характеристике тепловыделения в условиях эксплуатации

А. Ю. КОНЬКОВ¹, А. И. ТРУНОВ², А. Д. ГУРЬЯНОВА¹

¹ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Дальневосточный государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО «ДВГУПС»), Хабаровск, 680021, Россия

² Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тихоокеанский государственный университет» (ФГБОУ ВО «ТОГУ»), Хабаровск, 680042, Россия

Аннотация. Дизельные двигатели снабжают механической энергией почти половину локомотивов российских железных дорог. Для обеспечения паспортных характеристик тепловозного дизеля в течение всего периода эксплуатации требуется периодическая настройка топливоподающей аппаратуры. При ее настройке необходимо обеспечить баланс мощности между цилиндрами дизеля, при этом не превышать заградительные параметры по максимальному давлению сгорания и температуре отработавших газов. Это достигается за счет идентичности цикловых подач топлива по цилиндрам дизеля и близкого соответствия углов опережения подачи топлива между разными цилиндрами. Существующие методы настройки топливоподающей аппаратуры не позволяют выполнить регулировку с требуемой точностью или слишком сложны и трудоемки при реализации. В настоящей статье предложен теоретически обоснованный и экспериментально проверенный метод настройки цикловой подачи и угла опережения подачи топлива по результатам измерения давления в цилиндре через штатный индикаторный канал в условиях эксплуатации. Для вычисления характеристик активного тепловыделения, по которым определяются относительные параметры, характеризующие состояние топливоподающей аппаратуры, использована индикаторная диаграмма. Расчетное исследование показало, что предлагаемые параметры эквивалентны относительной цикловой подаче топлива и относительному углу опережения подачи топлива. Экспериментальная проверка, выполненная на одноцилиндровом отсеке двигателя ОЧ18/22 с гидромеханической топливной аппаратурой, показала возможность настройки топливоподающей аппаратуры предлагаемым методом с удовлетворительной точностью.

Ключевые слова: дизель; топливоподающая аппаратура; угол опережения подачи топлива; цикловая подача топлива; диагностика технического состояния; внутрицилиндровое давление; тепловыделение

Введение. В настоящее время инвентарный парк ОАО «РЖД» составляет около 19,9 тыс. локомотивов, почти половина из них (49 %) — тепловозы [1]. По данным источников [2, 3], от 15 до 20 % внеплановых ремонтов тепловозов, связанных с неисправностями дизеля, приходится на топливоподающую аппаратуру (ТПА). Также в эксплуатации находятся дизели, имеющие невыявленные дефекты. Наибольшее распространение на тепловозах страны получили

дизели серии Д49. Эти дизели имеют ТПА с индивидуальными топливными насосами высокого давления (ТНВД). Для обеспечения паспортных характеристик двигателя ТПА такого типа требует настройки после установки на дизель и в процессе эксплуатации. В ходе настройки регулируются объем цикловой подачи (ЦП) топлива за счет выхода рейки насоса и угол опережения подачи топлива (УОПТ) путем изменения толщины прокладки между фланцами насоса и дизеля. Заводом-изготовителем предусмотрена технология настройки этих параметров в условиях эксплуатации по расхождению температур отработавших газов и расхождению максимальных давлений сгорания между цилиндрами. Такой подход не позволяет добиться балансировки мощности между цилиндрами с высокой точностью.

В настоящее время на ОАО «РЖД» широкое распространение получили диагностические комплексы, которые позволяют выполнять измерение быстропеременных параметров рабочих процессов дизеля, таких как давление в цилиндре двигателя, давление в трубопроводе высокого давления (ТВД) ТПА, параметры вибрации и другие. Примерами таких комплексов являются диагностические комплексы КДН «Магистраль» (ООО «Техтранс-Д», Россия), «Дизель-Адмирал» (НПК «Гарант», Россия), «ДЭСТА» и «КИПАРИС» (НИИТКД, Россия) и др. Для анализа работы ТПА перечисленные комплексы требуют дополнительных измерений вибрации или давления топлива в ТВД или хода иглы форсунки. Это обстоятельство усложняет диагностический комплекс, снижает его надежность, повышает стоимость и увеличивает продолжительность процедур измерения и обработки данных. Диагностирование и настройка ТПА по результатам измерения внутрицилиндрового давления позволит уменьшить число первичных преобразователей, время диагностического испытания дизеля и стоимость системы диагностики.

Обзор методов настройки ТПА. Известно большое число работ, показывающих возможность исполь-

зования внутрицилиндрового давления для оценки технического состояния и настройки ТПА [4–13] и преимуществ использования давления в качестве сигнала обратной связи в системах управления двигателем [14–18]. Наибольшее распространение при этом получил подход, основанный на использовании индикаторных показателей двигателя, получаемых анализом индикаторной диаграммы, и требующий, как правило, дополнительных измерений (температуры на выходе из цилиндра, давления во впускном коллекторе и т. п.) [4–7]. Развитие получают методы, использующие скорость изменения давления [8, 9] как самостоятельный сигнал [8] с достаточно ограниченным перечнем выявляемых неисправностей или в сочетании с другими параметрами рабочего процесса [9]. В [10, 11] рассматривается возможность получения диагностической информации на основе сравнения индикаторной диаграммы с диаграммой сжатия-расширения, что требует дополнительных измерений давления с отключенной подачей топлива или моделирования этого режима работы двигателя.

Вместе с тем хорошо известна связь процесса топливоподачи с характеристикой тепловыделения, которая давно используется для изучения внутрицилиндровых процессов [19, 20] на этапе доводки нового двигателя в ходе стендовых испытаний. Постоянно повышающиеся требования к экологической безопасности двигателя привели к поиску новых принципов управления топливоподачей, в том числе и с использованием характеристики тепловыделения, вычисляемой бортовой системой управления на основе давления, используемого в качестве сигнала обратной связи [14–18]. В таких системах управления для корректировки УОПТ используют угол, при котором выделяется 50 % теплоты Q_{50} [14–18], определяемый по характеристике тепловыделения, а для корректировки ЦП — среднее индикаторное давление, вычисляемое по индикаторной диаграмме. Считается, что такие параметры обладают лучшей стабильностью в широком диапазоне скоростных и нагрузочных режимов дизеля [21, 22].

Важно отметить, что применение характеристики тепловыделения наряду с функцией управления двигателем предоставляет дополнительную возможность выявления дефектов распылителя форсунки и некоторых неисправностей ТНВД [14, 15].

Примером применения сигнала давления для диагностирования дизеля на железнодорожном транспорте России может послужить комплекс «Магистраль» [23], с помощью которого решаются задачи регулирования двигателя по УОПТ и ЦП. К сожалению, разработчики комплекса не публикуют принципов диагностики. Однако из опыта работы с комплексом можно понять, что принцип диагностирования заключается в попарном сравнении индикаторных диаграмм, построенных одновременно для всех цилиндров двигателя,

и других характеристик, полученных на их основе. Условие одновременного измерения давления во всех цилиндрах диктуется требованием равенства нагрузки и частоты вращения вала двигателя, что принципиально необходимо для возможности тонкой настройки ЦП и УОПТ. Большое число измерительных каналов системы, работающих параллельно, обуславливает высокую стоимость комплекса. Возможным решением этой проблемы может быть попарный анализ диаграмм, полученных одновременно в двух цилиндрах [24], один из которых, например первый, остается неизменным. Такой подход позволяет применять недорогие ручные приборы [25] при последовательном или выборочном диагностировании цилиндров двигателя. Модель-ориентированные методы [24, 26], основанные на идентификации параметров развернутой математической модели процессов, протекающих в цилиндре и в смежных системах двигателя, характеризуются сложностью используемых при этом математических моделей, что ограничивает возможность их полной автоматизации и предъявляет высокие требования к вычислительной мощности аппаратной части комплекса, снижая привлекательность их использования в составе бортовых систем управления и диагностики двигателя.

Дополнительные ограничения практического применения рассмотренных методов в условиях эксплуатации дизелей обусловлены невозможностью выполнения известных требований установки датчика давления так, чтобы его измерительная мембрана была заподлицо со стенками рабочей камеры [19]. На практике измерения выполняются через индикаторный канал, который вносит искажения в результаты измерения внутрицилиндрового давления и, соответственно, снижает достоверность определения диагностических параметров [4, 19, 27, 28]. В настоящей статье предложен метод регулировки ЦП и УОПТ дизеля в условиях эксплуатации по результатам измерения внутрицилиндрового давления, учитывающий это обстоятельство.

Предлагаемый метод настройки ТПА. Для регулировки ЦП и УОПТ предлагается использовать характеристики тепловыделения, рассчитанные только с использованием данных о давлении и объеме газа, полученных экспериментально. Хорошо известно [19, 20], что точное определение теплоты, выделившейся при сгорании топлива, требует учета теплообмена, утечек рабочего тела, потерь теплоты на диссоциацию продуктов сгорания из-за химического и механического недожога топлива, что невозможно в условиях эксплуатационной диагностики. Поэтому на практике распространен подход, когда все названные величины совместно с теплотой сгоревшего топлива условно включают в одно слагаемое Q_n — тепловыделение «нетто» (термин, принятый за рубежом), или активное тепловыделение

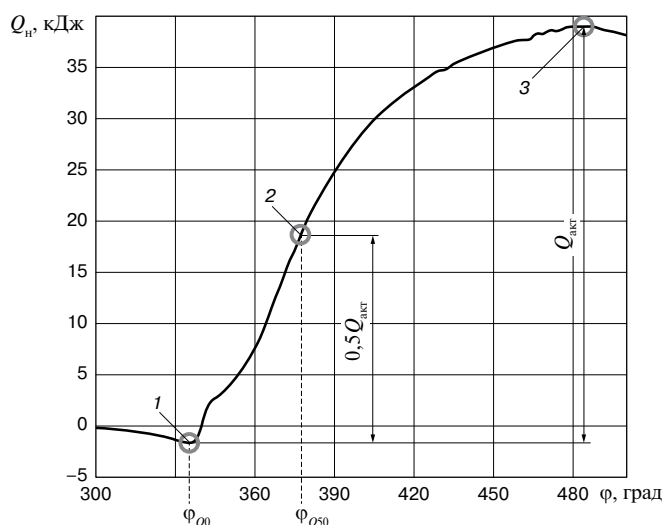


Рис. 1. Интегральная характеристика активного тепловыделения $Q_n(\varphi)$ и диагностические параметры для оценки ЦП и УОПТ: 1 — начало процесса активного тепловыделения; 2 — точка, в которой выделилось 50 % теплоты цикла; 3 — максимальное значение на интегральной характеристике активного тепловыделения

Fig. 1. Integral characteristic of active heat release $Q_n(\varphi)$ and diagnostic parameters for assessing the cycle supply and the fuel supply advance angle: 1 — start of the process of active heat release; 2 — point at which 50 % of the cycle heat was released; 3 — maximum value on the integral characteristic of active heat release; Q_{akt} — increase in active heat release during fuel combustion

(термин, предложенный акад. Б. С. Стечкиным [19]). В этом случае тепловыделение Q_n находят на основании первого закона термодинамики для закрытых систем, игнорируя потери выделившейся теплоты из-за теплообмена, диссоциации и др.

$$dQ_n = \frac{k}{k-1} p dV + \frac{1}{k-1} V dp, \quad (1)$$

где k — показатель адиабаты; p — давление в цилиндре; V — объем цилиндра.

Таким образом, дифференциальная характеристика активного тепловыделения $dQ_n(\varphi)$ может быть найдена обработкой сигнала давления, привязанного к углу поворота коленчатого вала φ или к объему цилиндра.

В настоящей статье использовались расчетные и экспериментальные индикаторные диаграммы, на основании которых численным интегрированием уравнения (1) рассчитывались интегральные характеристики активного тепловыделения $Q_n(\varphi)$. На рис. 1 показан фрагмент такой характеристики для участка сгорания и схема определения двух параметров: Q_{akt} — прирост активного тепловыделения в процессе сгорания топлива и φ_{Q50} — угол поворота коленчатого вала, соответствующий 50 % от Q_{akt} .

Для оценки отклонения исследуемых параметров от выбранных эталонных значений предлагается использовать приведенные значения. Приведение таких параметров, как прирост активного тепловыделения

при сгорании Q_{akt} , цикловая подача топлива $b_{ц}$, среднее индикаторное давление p_{mi} , выполнялось расчетом отношения действительного значения параметра к эталонному:

$$\bar{Q}_{akt} = \frac{Q_{akt}^d}{Q_{akt}^{et}}; \quad (2)$$

$$\bar{b}_{ц} = \frac{b_{ц}^d}{b_{ц}^{et}}; \quad (3)$$

$$\bar{p}_{mi} = \frac{p_{mi}^d}{p_{mi}^{et}}, \quad (4)$$

где индексом «д» обозначены действительные значения параметра, индексом «эт» — эталонные значения параметра.

Отклонения приведенных фазовых параметров, таких как УОПТ $\varphi_{опт}$ и угол, при котором выделяется $X\%$ теплоты φ_{QX} , вычислялись как расхождение между действительным и эталонным значением:

$$\Delta\varphi_{QX} = \varphi_{QX}^d - \varphi_{QX}^{et}; \quad (5)$$

$$\Delta\varphi_{опт} = \varphi_{опт}^d - \varphi_{опт}^{et}. \quad (6)$$

В данной работе в качестве эталонных значений принимались номинальные значения параметров для исследуемого режима.

Для оценки возможности использования характеристик тепловыделения при регулировке ТПА было выполнено расчетное исследование с использованием программного комплекса «Дизель-РК» [29], объектом которого являлся тепловозный дизель 2А-5Д49.

В ходе исследования варьировались ЦП топлива (пять значений в диапазоне $\pm 10\%$ от номинального значения) и УОПТ (пять значений в диапазоне ± 5 град. поворота коленчатого вала (п.к.в.) от номинального значения). Таким образом, общее число индикаторных диаграмм, полученных для определения характеристик тепловыделения с использованием модели (1), составило 25.

На рис. 2 отражено влияние ЦП на прирост активного тепловыделения в цикле при разных УОПТ. Видно, что УОПТ не влияет на количество выделившегося тепла, так как точки на графике накладываются друг на друга. Для всех значений УОПТ приведенные параметры $\bar{Q}_{akt}$ и $\bar{b}_{ц}$ эквивалентны $\bar{Q}_{akt} = \bar{b}_{ц}$. Необходимо отметить, что в связи с использованием модели (1) вместо расчетных характеристик тепловыделения полученный результат не является ожидаемым.

Более ожидаемые результаты были получены для УОПТ (рис. 3). Видно, что связь между отклонениями УОПТ и соответствующими им отклонениями угла, при котором выделяется 50 % теплоты, близка к ли-

нейной, но имеет более заметные выбросы случайного характера.

Результаты аппроксимации расчетных данных, представленных на рис. 3, описываются линейной зависимостью

$$\Delta\varphi_{Q50} = -1,0176\Delta\varphi_{\text{опт}} - 0,2 \quad (7)$$

или приближенно

$$\Delta\varphi_{Q50} = -\Delta\varphi_{\text{опт}}. \quad (8)$$

Использование зависимости (8) для аппроксимации расчетных точек приводит к погрешности в определении угла, при котором выделяется 50 % теплоты цикла, меньше 1 град. п.к.в. (см. рис. 3).

Учитывая полученные результаты, можно предложить следующий метод регулировки УОПТ и ЦП многоцилиндрового дизеля. Для любой пары характеристик тепловыделения $Q_n(\varphi)$, полученных по результатам обработки одновременно измеренных индикаторных диаграмм, нужно найти значения $Q_{\text{акт}}$ и φ_{Q50} . Относительное расхождение этих параметров для каждой пары характеристик однозначно определяет, на сколько процентов (для $Q_{\text{акт}}$) или градусов (для φ_{Q50}) следует скорректировать ЦП и УОПТ соответственно.

Экспериментальная проверка предлагаемого метода была выполнена на одноцилиндровом отсеке двигателя ОЧ18/22. Основные параметры экспериментальной установки с двигателем ОЧ18/22 приведены в таблице.

При проверке на одноцилиндровой установке можно точно определить фактическую ЦП топлива. Бли-

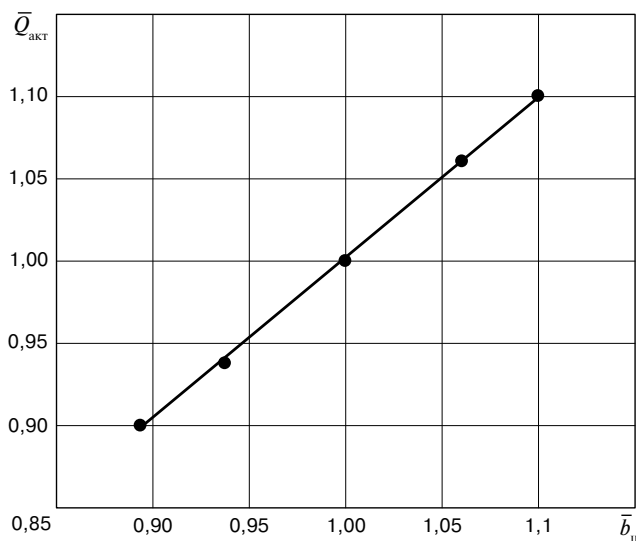


Рис. 2. Зависимость приведенного прироста активной теплоты в цикле $\bar{Q}_{\text{акт}}$ от приведенной ЦП топлива $\bar{b}_{\text{ц}}$ при $\Delta\varphi_{\text{опт}} = 5, 3, 0, -3, -5$ град. п.к.в.

Fig. 2. Dependence of the reduced increment of active heat in the cycle $\bar{Q}_{\text{акт}}$ on the reduced cycle fuel supply $\bar{b}_{\text{ц}}$ at a fuel supply advance angle $\Delta\varphi_{\text{опт}} = 5, 3, 0, -3, -5$ deg. c.r. (crankshaft rotation)

зость отсека по размерности, конструкции камеры сгорания и степени быстротходности к двигателям серии 5Д49 позволяет получить качественную картину корреляционной зависимости между фактическими значениями ЦП, УОПТ и их оценками, определяемыми по характеристике тепловыделения.

Основные параметры экспериментальной установки
Basic parameters of the experimental installation

Наименование показателя, размерность	Величина, описание
Частота вращения коленчатого вала при максимальной мощности, мин ⁻¹	1000
Тактность	Четырехтактный
Диаметр цилиндра, мм	180
Ход поршня, мм	220
Степень сжатия	12,7
Постоянная КШМ*	11/41
ТПА	разделенного типа, прямой впрыск топлива, форсунка закрытого типа с гидравлическим запирающим
Тип камеры сгорания	Гессельман
Индикаторный канал (длина×диаметр), мм	250×8

* отношение радиуса кривошипа к длине шатуна

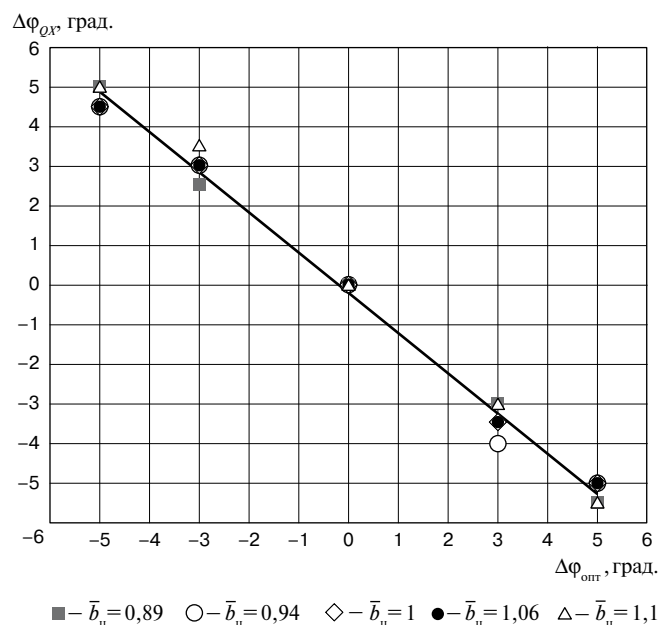


Рис. 3. Величина угла, при котором выделяется 50 % теплоты цикла, в зависимости от УОПТ

Fig. 3. Angle value at which 50 % of the cycle heat is released, depending on the fuel supply advance angle

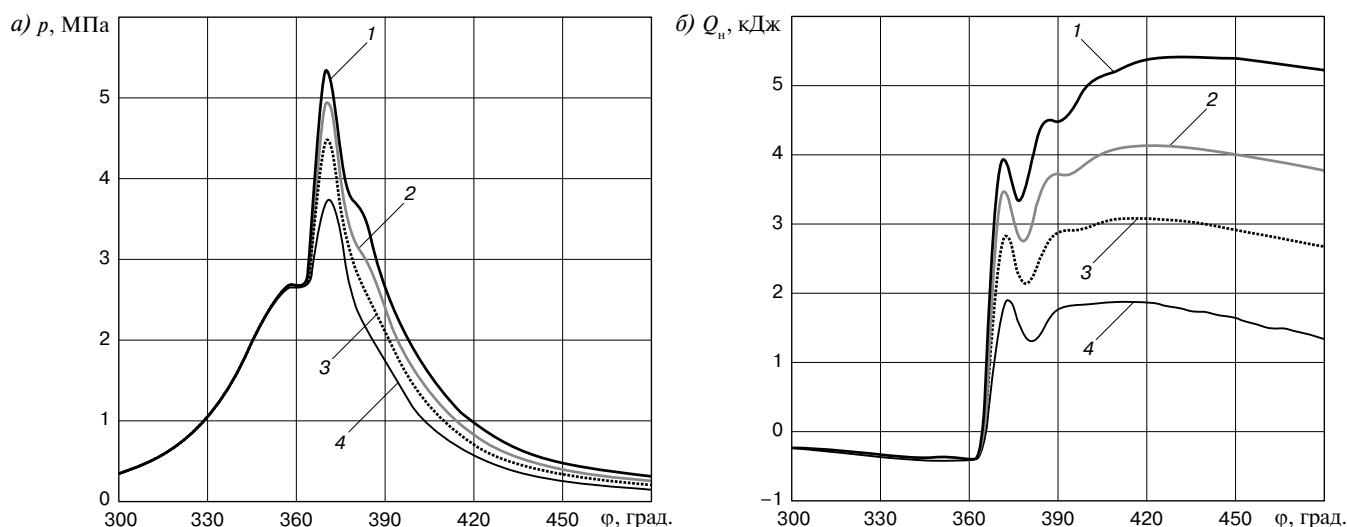


Рис. 4. Зависимость давления в цилиндре p (а) и активного тепловыделения Q_n (б) от угла поворота коленчатого вала φ : 1 – $\bar{b}_u = 1,368$; 2 – $\bar{b}_u = 1$; 3 – $\bar{b}_u = 0,756$; 4 – $\bar{b}_u = 0,476$
 Fig. 4. Dependence of pressure in the cylinder p (a) and active heat release Q_n (b) on the angle of crankshaft rotation φ : 1 – $\bar{b}_u = 1,368$; 2 – $\bar{b}_u = 1$; 3 – $\bar{b}_u = 0,756$; 4 – $\bar{b}_u = 0,476$

Важным условием экспериментальной проверки являлось измерение давления в цилиндре через индикаторный канал, что для быстроходных двигателей и двигателей средней быстроходности приводит к существенным искажениям сигнала давления и, как следствие, характеристики тепловыделения [27, 28]. Размеры индикаторного канала экспериментальной установки (см. таблицу) близки к геометрическим характеристикам штатного индикаторного канала дизеля 5Д49 (290×5,5 мм).

Для измерения давления в цилиндре использовался датчик ДДГ200/700 (НПК «Гарант», Россия). Действительный УОПТ определялся по диаграмме давления топлива, полученной с помощью пьезоэлек-

трического проточного датчика давления (RFT, Германия), установленного перед форсункой. Измерение фактического расхода топлива выполнялось весовым методом. Определение положения ВМТ цилиндра для точной привязки сигналов давления к углу поворота коленчатого вала выполнялось по методике, изложенной в [30].

Экспериментальная проверка проводилась в два этапа. На первом этапе исследовалась возможность использования параметра $Q_{акт}$ для оценки ЦП. С этой целью были выполнены испытания по нагрузочной характеристике при частоте вращения коленчатого вала 700 мин⁻¹. На втором этапе исследовалась возможность использования параметра φ_{Q50} для оценки УОПТ. В связи с тем, что искажения в индикаторном канале зависят от его геометрических размеров и вполне вероятен исход, при котором параметр φ_{Q50} будет попадать на перегиб характеристики тепловыделения, вызванной волновыми явлениями в индикаторном канале, дополнительно исследовалась возможность использования параметров φ_{Q5} , φ_{Q25} , φ_{Q75} . При проведении эксперимента УОПТ варьировался в диапазоне от –8 до +5 град. п.к.в. относительно номинального значения. При этом положение рейки ТНВД и, соответственно, ЦП оставались неизменными. Частота вращения коленчатого вала двигателя также поддерживалась постоянной и равной 700 мин⁻¹ за счет изменения нагрузки на двигатель.

Результаты экспериментального исследования представлены на рис. 4–9. На рис. 4 показано влияние ЦП на индикаторную диаграмму и характеристику активного тепловыделения.

На индикаторных диаграммах 4, а и особенно на интегральных характеристиках тепловыделения 4, б в диапазоне от 370 до 420 град. п.к.в. видны искажения,

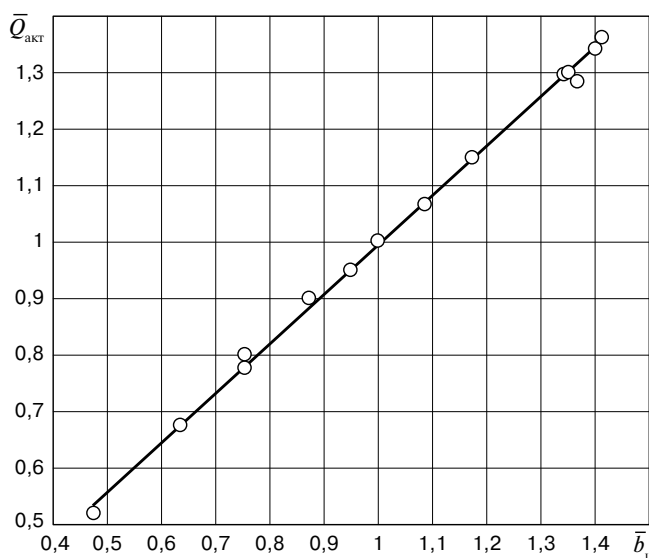


Рис. 5. Зависимость приведенного прироста активной теплоты от ЦП
 Fig. 5. Dependence of the reduced increment of active heat on the cycle supply

вносимые индикаторным каналом. Уменьшение активного тепловыделения на этом участке вызвано колебаниями газового столба в индикаторном канале и не может быть объяснено процессами теплообмена. На рис. 5 показана экспериментальная зависимость количества теплоты, выделившейся в цикле, от ЦП.

Можно отметить, что в этом случае зависимость является линейной, как и в случае с расчетным исследованием. Результаты эксперимента аппроксимируются уравнением

$$\bar{Q}_{\text{акт}} = 0,8756 \bar{b}_{\text{ц}} + 0,117 \quad (9)$$

с максимальной погрешностью 5,9 %. Использование вместо (9) приближенного равенства

$$\bar{Q}_{\text{акт}} = \bar{b}_{\text{ц}} \quad (10)$$

увеличивает максимальную погрешность до 6,1 %.

На рис. 6 показано отклонение фазовых параметров, определяемых по характеристикам тепловыделения, при изменении ЦП топлива. Вариация ЦП в диапазоне $\pm 40\%$ вызывает отклонения фазовых параметров φ_{Q25} и φ_{Q50} в пределах $\pm 0,5$ град. п.к.в. Параметр φ_{Q5} имеет немного большее отклонение, а параметр φ_{Q75} не может быть использован для оценки УОПТ, так как он не дает стабильного результата.

На рис. 7 представлены индикаторные диаграммы (7, а) и характеристики активного тепловыделения (7, б) при изменении УОПТ.

На рис. 8 отражено влияние УОПТ на фазовые параметры, определяемые по интегральной характеристике тепловыделения.

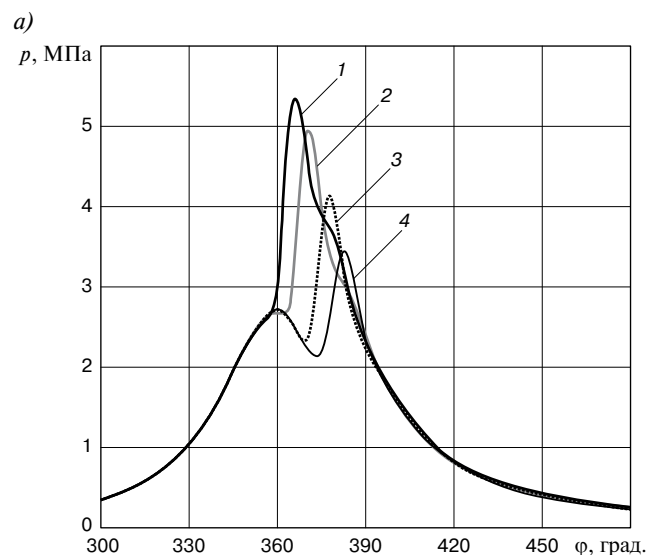


Рис. 7. Зависимость давления в цилиндре (а) и характеристики тепловыделения (б) от угла поворота коленчатого вала:

1 — $\Delta\varphi_{\text{онт}} = +5$ град. п.к.в.; 2 — $\Delta\varphi_{\text{онт}} = 0$ град. п.к.в.; 3 — $\Delta\varphi_{\text{онт}} = -5,5$ град. п.к.в.; 4 — $\Delta\varphi_{\text{онт}} = -7,8$ град. п.к.в.

Fig. 7. Dependence of the pressure in the cylinder (а) and the characteristics of heat release (б) on the angle of crankshaft rotation:

1 — $\Delta\varphi_{\text{онт}} = +5$ deg. c.r.; 2 — $\Delta\varphi_{\text{онт}} = 0$ deg. c.r.; 3 — $\Delta\varphi_{\text{онт}} = -5,5$ deg. c.r.; 4 — $\Delta\varphi_{\text{онт}} = -7,8$ deg. c.r.

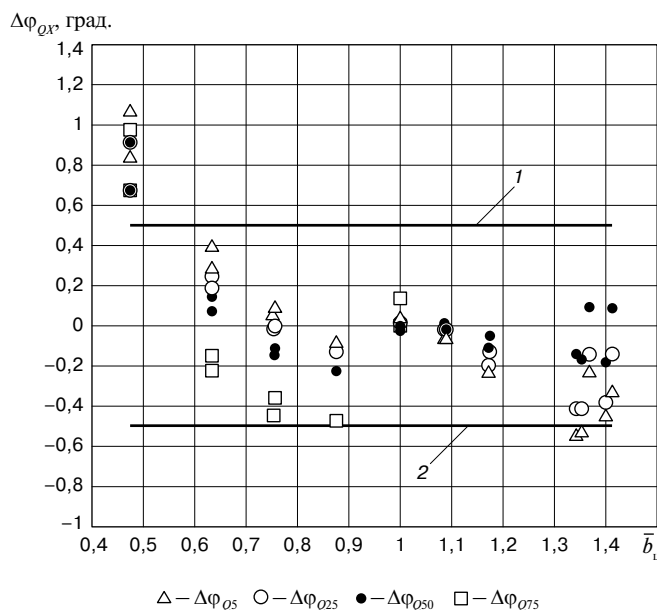
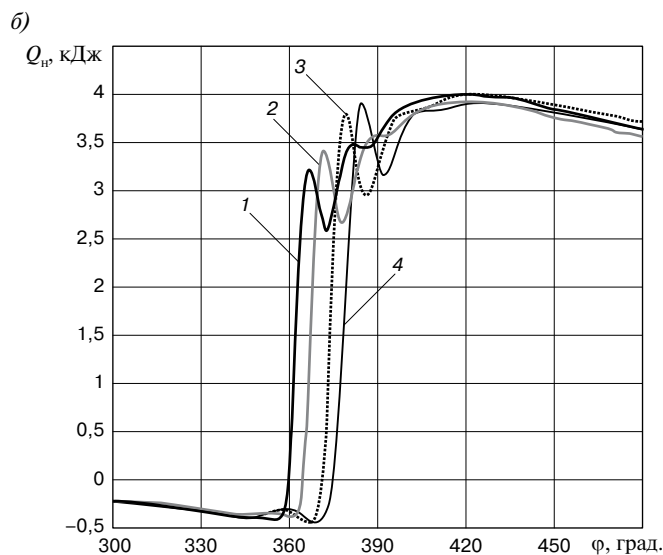


Рис. 6. Зависимость угла поворота коленчатого вала, при котором выделяется 5, 25, 50, 75 % теплоты, от ЦП:

1, 2 — верхняя и нижняя границы доверительного интервала отклонения фазовых параметров

Fig. 6. Dependence of the angle of crankshaft rotation, at which 5, 25, 50, 75 % of the heat is released, on the cycle supply: 1, 2 — upper and lower boundaries of the confidence interval for the deviation of the phase parameters

Здесь можно заметить несколько точек, которые не ложатся на аппроксимирующую линию, эти точки относятся к параметру φ_{Q75} . Параметры φ_{Q5} , φ_{Q25} , φ_{Q50} не имеют критичных выбросов, однако лучшую точность и повторяемость обеспечивают параметры φ_{Q25} , φ_{Q50} .



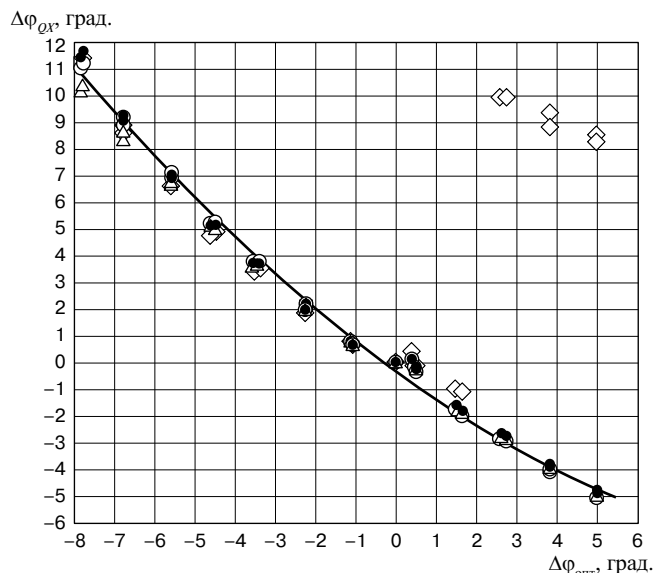


Рис. 8. Зависимость угла, при котором выделяется 5, 25, 50, 75 % теплоты, от УОПТ
Fig. 8. Dependence of the angle at which 5, 25, 50, 75 % of heat is released on the fuel supply advance angle

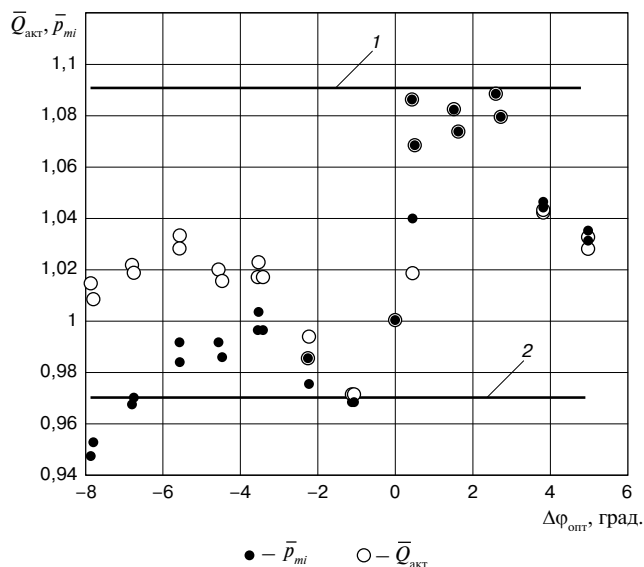


Рис. 9. Зависимость среднего приведенного индикаторного давления $\bar{p}_{mi}$ и приведенного прироста активной теплоты в цикле $\bar{Q}_{акт}$ от УОПТ:
1, 2 — верхняя и нижняя границы доверительного интервала среднего индикаторного давления и количества активной теплоты
Fig. 9. Dependence of the average reduced indicator pressure $\bar{p}_{mi}$ and the reduced increment of active heat in the cycle $\bar{Q}_{акт}$ on the fuel supply advance angle:
1, 2 — upper and lower boundaries of the confidence interval of the average indicator pressure and the amount of active heat

Экспериментальные результаты, касающиеся параметров φ_{Q25} , φ_{Q50} аппроксимируются полиномом второй степени

$$\Delta\varphi_{QX} = 0,042\Delta\varphi_{опт}^2 - 1,095\Delta\varphi_{опт} - 0,3136, \quad (11)$$

при этом погрешность во всем исследуемом диапазоне не составляет до 1,7 град. п.к.в. При замене полинома на приближенное равенство

$$\Delta\varphi_{QX} = -\Delta\varphi_{опт} \quad (12)$$

максимальная погрешность увеличивается до 3,9 град. п.к.в. Если ограничить область применения равенства (12) диапазоном изменения УОПТ ± 5 град. п.к.в., то погрешность не будет превышать 1,4 град. п.к.в.

На рис. 9 показано влияние УОПТ на результаты оценки ЦП по приросту теплоты в цикле $\bar{Q}_{акт}$ и среднему индикаторному давлению $\bar{p}_{mi}$, выполненной по данным второго этапа испытаний, т. е. при постоянной ЦП.

Можно отметить, что при вариации УОПТ в пределах ± 5 град. п.к.в. оба параметра дают схожий результат и ошибка оценки составит не более 12%. Однако при отклонении УОПТ больше 6 град. п.к.в. параметр $\bar{Q}_{акт}$ обеспечивает более точный результат, чем $\bar{p}_{mi}$.

Выводы. 1. Параметр $\bar{Q}_{акт}$ может быть использован для оценки и настройки ЦП. При этом он не уступает по точности широко применяемому для этих целей среднему индикаторному давлению $\bar{p}_{mi}$, а при значительных изменениях УОПТ превышает его.

2. Настройка УОПТ при его отклонении в диапазоне ± 5 град. п.к.в. по предлагаемой методике может быть выполнена с погрешностью 1,5 град. п.к.в.

3. Объем ЦП не оказывает существенного влияния на фазовые параметры, определяемые по характеристикам тепловыделения, а отклонения УОПТ в диапазоне ± 1 град. п.к.в. приводят к заметным отклонениям параметров $\bar{Q}_{акт}$ и $\bar{p}_{mi}$, что следует учитывать при организации последовательности регулировочных работ: первоначально следует установить правильный УОПТ, а затем — ЦП.

4. Искажения, вносимые индикаторным каналом, не оказывают существенного влияния на оценку отклонения ЦП по характеристике активного тепловыделения, но при выборе параметра для оценки отклонения УОПТ необходимо учитывать влияние конкретной геометрии канала, что может быть выполнено соответствующим выбором параметра φ_{QX} , в пользу углов, соответствующих меньшему, чем 50% от общего количества теплоты $\bar{Q}_{акт}$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Институт исследования проблем железнодорожного транспорта [Электронный ресурс]. URL: <http://iizd.ru/o-sostoyanii-lokomotivnogo-parka-oao-rossijskie-zheleznye-dorogi/> (дата обращения: 19.12.2020 г.).
2. Диагностирование дизелей / Е.А. Никитин [и др.]. М.: Машиностроение, 1987. 224 с.
3. Лобанов И. И. Повышение эксплуатационной эффективности тепловозных дизелей применением средств оперативной диагностики: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07. М., 2017. 23 с.

4. Коньков А. Ю., Лашко В. А. Диагностирование дизеля на основе идентификации рабочих процессов. Владивосток: Дальнаука, 2014. 364 с.
5. Hountalas D. T., Kouremenos D. A., Sideris M. A. Diagnostic Method for Heavy-Duty Diesel Engines Used in Stationary Applications // *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. 2004. No. 126 (4). P. 886. DOI: 10.1115/1.1787500.
6. Lamaris V. T., Hountalas D. T. A general purpose diagnostic technique for marine diesel engines – Application on the main propulsion and auxiliary diesel units of a marine vessel // *Energy Conversion and Management*. 2010. Vol. 51. No. 4. P. 740–753. DOI: 10.1016/j.enconman.2009.10.031.
7. Lin T., Tan A., Mathew J. Condition monitoring and diagnosis of injector faults in a diesel engine using in-cylinder pressure and acoustic emission techniques // *Proceedings of the 14th Asia Pacific Vibration Conference – Dynamics for Sustainable Engineering* / Department of Civil and Structural Engineering, The Hong Kong Polytechnic University. [S. l.], 2011. Vol. 1. P. 454–463.
8. Коньков А. Ю., Конькова И. Д. Новый способ контроля начала подачи и сгорания топлива в тепловозных дизелях // *Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ)*. 2019. Т. 78. № 4. С. 233–240. DOI: 10.21780/2223-9731-2019-78-4-233-240.
9. Sharkey A. J., Chandroth G. O., Sharkey N. E. A Multi-Net System for the Fault Diagnosis of a Diesel Engine // *Neural Computing & Applications*. 2000. No. 9. P. 152–160. DOI: 10.1007/s005210070026.
10. Leonhardt S., Muller N., Isermann R. Methods for engine supervision and control based on cylinder pressure information // *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*. 1999. No. 4 (3). P. 235–245. DOI: 10.1109/3516.789682.
11. Leonhardt S., Ludwig C., Schwarz R. Real-time supervision for diesel engine injection // *Control Engineering Practice*. 1995. Vol. 3. No. 7. P. 1003–1010. DOI: 10.1016/0967-0661(95)00084-8.
12. Witkowski K. Diagnosis of injection system marine diesel engine with the use of the heat release characteristics [Электронный ресурс] // *Combustion Engines*. 2015. Vol. 54. No. 3. P. 392–398. URL: <https://www.infona.pl/resource/bwmeta1.element.baztech-a0f077b0-b2f5-4a72-9a8c-c0a50b488662#> (дата обращения: 19.12.2020 г.).
13. Witkowski K. Research the Possibility of Obtaining Diagnostic Information about the Ships Engine Fuel Injection System Condition based on the Analysis of Characteristics of Heat Release // *Journal of KONES*. 2019. Vol. 26. No. 3. P. 249–256. DOI: 10.2478/kones-2019-0080.
14. Gao J., Wu Y., Shen T. Experimental comparisons of hypothesis test and moving average based combustion phase controllers // *ISA Transactions*. 2016. No. 65. P. 504–515. DOI: 10.1016/j.isatra.2016.09.003.
15. Schiefer D., Maennel R., Nardoni W. Advantages of Diesel Engine Control Using In-Cylinder Pressure Information for Closed Loop Control // *SAE Technical Papers*. 2003. No. 1. DOI: 10.4271/2003-01-0364.
16. Willems F., Doosje E., Engels F. Cylinder Pressure-Based Control in Heavy-Duty EGR Diesel Engines Using a Virtual Heat Release and Emission Sensor // *SAE Technical Papers*. 2010. No. 1. DOI: 10.4271/2010-01-0564.
17. Corti E., Moro D., Solieri L. Real-Time Evaluation of IMEP and ROHR-related Parameters // *SAE Technical Papers*. 2007. No. 24. DOI: 10.4271/2007-24-0068.
18. Ritscher B. Dual-fuel engine with cylinder pressure based control // *MTZ industrial*. 2013. No. 3. P. 14–23. DOI: 10.1007/s40353-013-0094-5.
19. Индикаторная диаграмма, динамика тепловыделения и рабочий процесс быстрогоходного поршневого двигателя / Б. С. Стечкин [и др.]. М.: АН СССР, 1960. 199 с.
20. Heat Release Analysis of Engine Pressure Data / J. A. Gatowski [et al.] // *SAE Transactions*. 1984. Vol. 93. No. 5. P. 961–977.
21. Gu F., Jacob P. J., Ball A. D. Non-parametric models in the monitoring of engine performance and condition. Part 2: Non-intrusive estimation of diesel engine cylinder pressure and its use in fault detection // *Journal of Automobile Engineering*. 1999. No. 2 (213). P. 135–143.
22. Johansson T., Stenlaas O. Heat Release Based Virtual Combustion Sensor Signal Bias Sensitivity // *SAE Technical Papers*. 2017. No. 1. DOI: 10.4271/2017-01-0789.
23. Васин П. А. Для диагностики тепловоза — комплекс «Магистраль» // *Локомотив*. 2001. № 7. С. 27–31.
24. Evaluation of a New Diagnostic Technique to Detect and Account for Load Variation during Cylinder Pressure Measurement of Large-Scale Four-Stroke Diesel Engines / D. Hountalas [et al.] // *SAE Technical Papers*. 2012. No. 1. DOI: 10.4271/2012-01-1342.
25. Коньков А. Ю., Маркелов А. А. Прибор для измерения индикаторной диаграммы тепловозных дизельных двигателей // *Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика*. 2006. № 11. С. 58–61.
26. Коньков А. Ю., Лашко В. А. Диагностирование технического состояния тепловозного дизеля по индикаторной диаграмме на основе теории идентификации // *Двигателестроение*. 2009. № 3. С. 19–23.
27. Hountalas D., Anestis A. Effect of pressure transducer position on measured cylinder pressure diagram of high speed diesel engines // *Energy Conversion and Management*. 1998. Vol. 39. No. 7. P. 589–607. DOI: 10.1016/S0196-8904(97)10009-7.
28. Трунов А. И., Коньков А. Ю., Горелик Г. Б. Исследование влияния индикаторного канала на точность измерения давления в цилиндре ДВС // Сборник научных трудов Международной научно-технической конференции «Двигатель-2018». М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2018. С. 18–27.
29. Программный комплекс ДИЗЕЛЬ-РК [Электронный ресурс]. URL: <https://diesel-rk.bmstu.ru> (дата обращения: 19.12.2020 г.).
30. Лашко В. А., Коньков А. Ю. Расчетный метод коррекции действительного положения ВМТ при индицировании ДВС // *Двигателестроение*. 2007. № 3 (229). С. 34–38.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

КОНЬКОВ Алексей Юрьевич,

д-р техн. наук, доцент, кафедра «Транспорт железных дорог», ФГБОУ ВО «ДВГУПС»

ТРУНОВ Антон Игоревич,

преподаватель, кафедра «Двигатели внутреннего сгорания», ФГБОУ ВО «ТОГУ»

ГУРЬЯНОВА Алёна Дмитриевна,

студентка, специальность «Подвижной состав железных дорог», ФГБОУ ВО «ДВГУПС»

Статья поступила в редакцию 13.08.2020 г., принята к публикации 19.12.2020 г.

Для цитирования: Коньков А. Ю., Трунов А. И., Гурьянова А. Д. Метод регулировки топливной аппаратуры тепловозного дизеля по характеристике тепловыделения в условиях эксплуатации // *Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ)*. 2021. Т. 80. № 1. С. 20–29. DOI: <https://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-1-20-29>.

Method of adjusting fuel equipment of a diesel locomotive by heat release feature under operating conditions

A. Yu. KON'KOV¹, A. I. TRUNOV², A. D. GUR'YANOVA¹

¹Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Far Eastern State University of Railways" (FGBOU VO "DVGUPS"), Khabarovsk, 680021, Russia

²Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Pacific State University" (FGBOU VO "TOGU"), Khabarovsk, 680042, Russia

Abstract. Diesel engines supply mechanical power to almost half of the locomotives of the Russian railways. To ensure the pass-port characteristics of a diesel locomotive during the entire period of operation, periodic adjustment of the fuel supply equipment is required. When adjusting it, it is necessary to ensure the balance of power between the diesel cylinders while not exceeding the protective parameters for the maximum combustion pressure and the temperature of the exhaust gases. This is achieved due to the identity of the cyclic fuel supply through the diesel cylinders and the close correspondence of the fuel supply advance angles between different cylinders. Existing methods of tuning the fuel supply equipment don't allow performing the adjustment with the required accuracy or are too complicated and laborious to implement. This article proposes theoretically substantiated and experimentally tested method for adjusting the cyclic supply and the fuel supply advance angle based on the results of measuring the pressure in the cylinder through a standard indicator channel under operating conditions. The indicator diagram is used to calculate the characteristics of active heat release, which are used to determine the relative parameters featuring the state of the fuel supply equipment. The performed computational study showed that the proposed parameters are equivalent to the relative cyclic fuel supply and the relative advance angle of the fuel supply. An experimental check, carried out on a single-cylinder compartment of OCH18/22 engine with hydromechanical fuel equipment, showed the possibility of adjusting the fuel supply equipment by the proposed method with satisfactory accuracy.

Keywords: diesel; fuel supply equipment; fuel supply advance angle; cyclic fuel supply; diagnostics of technical condition; intra-cylinder pressure; heat release

DOI: <https://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-1-20-29>

REFERENCES

1. Institut issledovaniya problem zheleznodorozhnogo transporta [Institute for the Study of Railway Transport Problems]. URL: <http://iizd.ru/o-sostoyanii-lokomotivnogo-parka-oao-rossijskie-zheleznnye-dorogi/> (retrieved on 19.12.2020) (in Russ.).
2. Nikitin E. A., Stanislavskiy L. V., Ulanovskiy E. A., Dzentsina O. P., Alekseev V. G., Shchetinin V. G., Samoylov S. N. *Diagnostirovanie dizeley* [Diagnostics of diesel engines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1987, 224 p.
3. Lobanov I. I. *Povyshenie ekspluatatsionnoy effektivnosti teplovoznnykh dizeley primeneniem sredstv operativnoy diagnostiki. Avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk* [Improving the operational efficiency of diesel locomotives using the means of operational diagnostics. Cand. tech. sci. diss. synopsis]. Moscow, 2017, 23 p.
4. Kon'kov A. Yu., Lashko V. A. *Diagnostirovanie dizelya na osnovе identifikatsii rabochikh protsessov* [Diagnostics of a diesel engine based on identification of working processes]. Vladivostok, Dal'nauka Publ., 2014, 364 p.
5. Hountalas D. T., Kouremenos D. A., Sideris M. A. *Diagnostic Method for Heavy-Duty Diesel Engines Used in Stationary Applications*. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2004, no. 126 (4), p. 886. DOI: 10.1115/1.1787500.
6. Lamarin V. T., Hountalas D. T. *A general purpose diagnostic technique for marine diesel engines – Application on the main*

propulsion and auxiliary diesel units of a marine vessel. Energy Conversion and Management, 2010, Vol. 51, no. 4, pp. 740–753. DOI: 10.1016/j.enconman.2009.10.031.

7. Lin T., Tan A., Mathew J. *Condition monitoring and diagnosis of injector faults in a diesel engine using in-cylinder pressure and acoustic emission techniques*. Proceedings of the 14th Asia Pacific Vibration Conference – Dynamics for Sustainable Engineering, Department of Civil and Structural Engineering, The Hong Kong Polytechnic University. [S. l.], 2011, Vol. 1, pp. 454–463.

8. Kon'kov A. Yu., Kon'kova I. D. *Novyy sposob kontrolya nachala podachi i sgoraniya topliva v teplovoznnykh dizelyakh* [New method for control of fuel injection initiation and fuel combustion in diesel locomotive engines]. Vestnik VNIIZhT [Vestnik of the Railway Research Institute], 2019, Vol. 78, no. 4, pp. 233–240. DOI: 10.21780/2223-9731-2019-78-4-233-240.

9. Sharkey A. J., Chandroth G. O., Sharkey N. E. *A Multi-Net System for the Fault Diagnosis of a Diesel Engine*. Neural Computing & Applications, 2000, no. 9, pp. 152–160. DOI: 10.1007/s005210070026.

10. Leonhardt S., Muller N., Isermann R. *Methods for engine supervision and control based on cylinder pressure information*. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 1999, no. 4 (3), pp. 235–245. DOI: 10.1109/3516.789682.

11. Leonhardt S., Ludwig C., Schwarz R. *Real-time supervision for diesel engine injection*. Control Engineering Practice, 1995, Vol. 3, no. 7, pp. 1003–1010. DOI: 10.1016/0967-0661(95)00084-8.

12. Witkowski K. *Diagnosis of injection system marine diesel engine with the use of the heat release characteristics*. Combustion Engines, 2015, Vol. 54, no. 3, pp. 392–398. URL: <https://www.in-fona.pl/resource/bwmeta1.element.baztech-a0f077b0-b2f5-4a72-9a8c-c0a50b488662#> (retrieved on 19.12.2020).

13. Witkowski K. *Research the Possibility of Obtaining Diagnostic Information about the Ships Engine Fuel Injection System Condition based on the Analysis of Characteristics of Heat Release*. Journal of KONES, 2019, Vol. 26, no. 3, pp. 249–256. DOI: 10.2478/kones-2019-0080.

14. Gao J., Wu Y., Shen T. *Experimental comparisons of hypothesis test and moving average based combustion phase controllers*. ISA Transactions, 2016, no. 65, pp. 504–515. DOI: 10.1016/j.isatra.2016.09.003.

15. Schiefer D., Maennel R., Nardoni W. *Advantages of Diesel Engine Control Using In-Cylinder Pressure Information for Closed Loop Control*. SAE Technical Papers, 2003, no. 1. DOI: 10.4271/2003-01-0364.

16. Willems F., Doosje E., Engels F. *Cylinder Pressure-Based Control in Heavy-Duty EGR Diesel Engines Using a Virtual Heat Release and Emission Sensor*. SAE Technical Papers, 2010, no. 1. DOI: 10.4271/2010-01-0564.

17. Corti E., Moro D., Solieri L. *Real-Time Evaluation of IMEP and ROHR-related Parameters*. SAE Technical Papers, 2007, no. 24. DOI: 10.4271/2007-24-0068.

18. Ritscher B. *Dual-fuel engine with cylinder pressure based control*. MTZ industrial, 2013, no. 3, pp. 14–23. DOI: 10.1007/s40353-013-0094-5.

19. Stechkin B. S., Genkin K. I., Zolotarevskiy V. S., Skorodinskiy I. V. *Indikatornaya diagramma, dinamika teplovodyleniya i*

rabochiy protsess bystrokhodnogo porshnovego dvigatelya [Indicator diagram, dynamics of heat release and working process of a high-speed piston engine]. Moscow, AN SSSR Publ., 1960, 199 p.

20. Gatowski J. A., Balles E. N., Chun K. M., Nelson F. E., Ekchian J. A., Heywood J. B. *Heat Release Analysis of Engine Pressure Data*. SAE Transactions, 1984, Vol. 93, no. 5, pp. 961–977.

21. Gu F., Jacob P., Ball A. *Non-parametric models in the monitoring of engine performance and condition. Part 2: Non-intrusive estimation of diesel engine cylinder pressure and its use in fault detection*. Journal of Automobile Engineering, 1999, no. 2 (213), pp. 135–143.

22. Johansson T., Stenlaas O. *Heat Release Based Virtual Combustion Sensor Signal Bias Sensitivity*. SAE Technical Papers, 2017, no. 1. DOI: 10.4271/2017-01-0789.

23. Vasin P. A. *Dlya diagnostiki teplovoza — kompleks "Magistral"* [For diagnostics of a diesel locomotive — the "Magistral" complex]. Lokomotiv, 2001, no. 7, pp. 27–31.

24. Hountalas D., Antonopoulos A., Zovanos G., Papagiannakis R. *Evaluation of a New Diagnostic Technique to Detect and Account for Load Variation during Cylinder Pressure Measurement of Large-Scale Four-Stroke Diesel Engines*. SAE Technical Papers, 2012, no. 1. DOI: 10.4271/2012-01-1342.

25. Kon'kov A. Yu., Markelov A. A. *Pribor dlya izmereniya indikatornoy diagrammy teplovoznogo dizel'nykh dvigateley* [Device for measuring the indicator diagram of diesel locomotive engines]. Instruments and Systems: Monitoring, Control and Diagnostics, 2006, no. 11, pp. 58–61.

26. Kon'kov A. Yu., Lashko V. A. *Diagnostirovanie tekhnicheskogo sostoyaniya teplovoznogo dizelya po indikatornoy diagramme na osnove teorii identifikatsii* [Diagnostics of the technical condition of a diesel locomotive using an indicator diagram based on the theory of identification]. Dvigatolestroyeniye [Engines construction], 2009, no. 3, pp. 19–23.

27. Hountalas D., Anestis A. *Effect of pressure transducer position on measured cylinder pressure diagram of high speed diesel engines*. Energy Conversion and Management, 1998, Vol. 39, no. 7, pp. 589–607. DOI: 10.1016/S0196-8904(97)10009-7.

28. Trunov A. I., Kon'kov A. Yu., Gorelik G. B. *Issledovanie vliyaniya indikatornogo kanala na tochnost' izmereniya davleniya v tsilindre DVS* [Study of the influence of the indicator channel on the accuracy of measuring the pressure in the cylinder of the internal combustion engine]. Sbornik nauchnykh trudov Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Dvigatel'-2018" [Coll. of scientific papers of the International Scientific and Technical Conference "Dvigatel'-2018"]. Moscow, MGTU im. N. E. Bauman Publ., 2018, pp. 18–27.

29. *Programmnyy kompleks DIZEL'-RK* [Software complex DIESEL-RK]. URL: <https://diesel-rk.bmstu.ru> (retrieved on 19.12.2020) (in Russ.).

30. Lashko V. A., Kon'kov A. Yu. *Raschetnyy metod korrektsii deystvitel'nogo polozheniya VMT pri inditsirovani DVS* [Calculated method for correcting the actual TDC position when indicating the internal combustion engine]. Dvigatolestroyeniye [Engines construction], 2007, no. 3 (229), pp. 34–38.

ABOUT THE AUTHORS

Aleksey Yu. KON'KOV,

Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department "Railway Transport", FGBOU VO "DVGUPS"

Anton I. TRUNOV,

Lecturer, Department "Internal Combustion Engines", FGBOU VO "TOGU"

Alyona Dmitrievna GUR'YANOVA,

Student, "Rolling Stock of Railways" Specialty, FGBOU VO "DVGUPS"

Received 13.08.2020

Accepted 19.12.2020

■ E-mail: akonkov1964@gmail.com (A. Yu. Kon'kov)

For citation: Kon'kov A. Yu., Trunov A. I., Gur'yanova A. D. Method of adjusting fuel equipment of a diesel locomotive by heat release feature under operating conditions // VNIIZHT Scientific Journal. 2021. 80 (1): 20–29 (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-1-20-29>.

ВНИМАНИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ!

ЭЛЕКТРОННЫЕ ВЕРСИИ СТАТЕЙ ЖУРНАЛА В ОТКРЫТОМ ДОСТУПЕ

На сайте www.elibrary.ru открыт доступ к электронным версиям статей, опубликованных в научно-техническом журнале «Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта».

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

Материалы журнала, размещенные на сайте Научной электронной библиотеки для свободного использования, допускается использовать, копировать, цитировать исключительно в некоммерческих целях с соблюдением соответствующих положений действующего авторского законодательства (Гражданский кодекс РФ от 18.12.2006 № 230-ФЗ, Часть IV; Глава 70 «Авторское право») с обязательным указанием имени автора/ов произведения и источника заимствования.

На сайте журнала www.journal-vniizht.ru контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

Разработка системы кондиционирования с индивидуальным регулированием температуры и расхода воздуха в купе пассажирского вагона

Г. М. СТОЯКИН¹, А. В. КОСТИН², С. Н. НАУМЕНКО³

¹Общество с ограниченной ответственностью «Проектное бюро АПЕКС» (ООО «Проектное бюро АПЕКС»), Москва, 115114, Россия

²Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет транспорта» (ФГАОУ ВО «РУТ» (МИИТ)), Москва, 127055, Россия

³Акционерное общество «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (АО «ВНИИЖТ»), Москва, 129626, Россия

Аннотация. Поддержание оптимальных параметров микроклимата в вагоне в пути следования является важнейшим требованием при перевозке пассажиров. В пассажирских вагонах повышенной комфортности поддержание оптимальных параметров микроклимата достигается путем функционирования системы кондиционирования воздуха, обеспечивающей индивидуальное регулирование температуры воздуха в каждом купе. Системы индивидуального регулирования температуры воздуха, применяемые в системах кондиционирования воздуха, разделяют на две группы: активные и пассивные.

В статье предлагается к рассмотрению комбинированная активно-пассивная система с раздельной подачей воздуха с более низкой и более высокой по сравнению с поддерживаемой в купе температурой и установкой индивидуальных эжекционных доводчиков, позволяющая повысить эффективность индивидуального регулирования параметров воздуха в купе.

Для оценки равномерности распределения температуры и скорости потока воздуха по объему вагона при предлагаемой схеме регулирования проведено трехмерное моделирование распределения этих параметров в купе на базе программного обеспечения Autodesk CFD.

Приведенные результаты моделирования свидетельствуют о равномерности распределения температуры и скорости потока воздуха по объему купе, что позволяет охарактеризовать предлагаемую систему как достаточно энергоэффективную, простую в управлении и надежную в эксплуатации.

Ключевые слова: пассажирский вагон; кондиционирование воздуха; система индивидуального регулирования; эжекционный доводчик; температура воздуха; скорость воздуха; эффективность системы

Введение. Обеспечение комфортного микроклимата в вагоне является одним из важнейших условий при перевозке пассажиров. В настоящее время параметры микроклимата в вагонах уступают параметрам, поддерживаемым в помещениях жилых и промышленных зданий [1, 2]. Это объясняется ограниченностью энергетических ресурсов, жесткими требованиями к массогабаритным характеристикам оборудования, установкой воздухораспределительных и отопительных устройств непосредственно в зоне расположения пассажиров в сочетании с невозможностью обеспечить теплотехнические характери-

стики кузова вагона на уровне стандартов, принятых в капитальном строительстве [3].

Системы индивидуального регулирования температуры воздуха в купе. В пассажирских вагонах повышенной комфортности устанавливается система кондиционирования воздуха (СКВ), обеспечивающая индивидуальное регулирование температуры воздуха в каждом купе в диапазоне температур 18–28 °С, что соответствует требованиям Санитарных правил по организации пассажирских перевозок в железнодорожном транспорте [4, 5]. Такое регулирование позволяет учесть личные предпочтения пассажиров, а также различия в теплопоступлениях в разных купе от людей, еды и т. п. СКВ должна быть максимально простой и надежной, компактной и эффективной, обеспечивать возможность регулирования температуры воздуха как в холодный период года, так и в теплый, обладать высокой энергоэффективностью и безопасностью для пассажиров.

Системы индивидуального регулирования температуры воздуха, применяемые в СКВ, разделяют на две группы: пассивные и активные [6]. В активных системах осуществляется прямое воздействие на температуру подаваемого в купе воздуха от некоторого дополнительного источника, например электронагревателя. В пассивных системах изменение температуры воздуха происходит за счет смешения с регулируемой пропорциональностью потоков воздуха с различной температурой перед подачей в купе, например смешение потоков свежего и рециркуляционного воздуха.

Считается, что активные системы более перспективны, так как обладают значительными преимуществами, обеспечивая более высокое качество и надежность при регулировании параметров воздуха.

Система индивидуального регулирования с раздельной подачей воздуха и эжекционными доводчиками. Для повышения эффективности индивидуального регулирования параметров воздуха в купе предла-

гаются комбинированная активно-пассивная схема с раздельной подачей воздуха с более низкой и более высокой по сравнению с поддерживаемой в купе температурой и установкой индивидуальных эжекционных доводчиков, получающих в последнее время все большее применение в децентрализованных СКВ различных помещений. Местное регулирование температуры в купе осуществляется изменением расхода подаваемого воздуха. Нагрев или охлаждение подаваемого воздуха производится в рекуперативных теплообменниках. Теплопередающую поверхность теплообменника целесообразно выполнять либо из оребренных труб для повышения его компактности, либо из труб с продольными турбулизаторами [7] для снижения гидравлического сопротивления. Организовать переменный расход воздуха, подаваемого в каждое купе, целесообразно по датчику концентрации CO_2 как для обеспечения комфортных условий (не более 1000 ppm CO_2) и санитарных требований, так и с целью экономии энергетических ресурсов — за счет снижения подачи наружного воздуха в купе, не полностью заполненное пассажирами.

Схема подачи воздуха в купе приведена на рис. 1.

В предлагаемой схеме через нижний воздуховод, проложенный по стенке под окном, подается воздух с температурой, близкой к верхней границе допустимых параметров (в холодный период года — с незначительным перегревом), через верхний воздуховод подается низкоскоростным потоком воздух с температурой, близкой к нижней границе допустимых параметров (в теплый период года — с незначительным переохлаждением).

Оба воздуховода оборудуются заслонками с сервоприводами, управляемыми по датчикам температуры и концентрации CO_2 .

Регулирование подачи потока воздуха, задающего температуру в купе (летом — холодный воздух, зимой — перегретый), осуществляется заслонкой по датчику температуры. Управление второй заслонкой производится по датчику концентрации CO_2 , рассчитанному на постоянную концентрацию 1000 ppm, являющуюся достаточно комфортной для пассажиров [1–5].

Одним из достоинств предлагаемой схемы является то, что поддержание двух контролируемых параметров (содержание CO_2 и температура воздуха) осуществляется за счет независимого управления двумя исполнительными механизмами — заслонками на приточных воздуховодах.

При повышении по датчику температуры расхода воздуха в купе, обеспечивающего снятие теплоизбытков или теплопотерь, увеличивается и производительность эжекционных доводчиков. При этом в купе снижается содержание CO_2 , в результате чего по

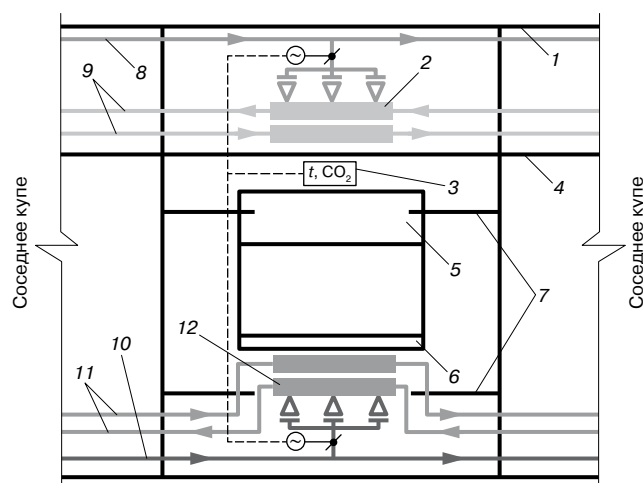


Рис. 1. Схема подачи воздуха в купе:
1 — крыша вагона; 2 — верхний эжекционный доводчик;
3 — датчик температуры и концентрации CO_2 ; 4 — потолок купе;
5 — окно; 6 — откидной столик; 7 — пассажирские места;
8 — воздух от установки кондиционирования воздуха (УКВ) для подачи в верхний эжекционный доводчик; 9 — холодоноситель (14–16 °C); 10 — воздух от УКВ для подачи в нижний эжекционный доводчик; 11 — теплоноситель (40–60 °C); 12 — нижний эжекционный доводчик

Fig. 1. Compartment air supply diagram:
1 — car roof; 2 — upper induction terminal; 3 — sensor for temperature and CO_2 concentration; 4 — compartment ceiling;
5 — window; 6 — folding table; 7 — passenger seats;
8 — air from an air conditioning unit (ACU) for supply to the upper induction terminal; 9 — refrigerant (14–16 °C); 10 — air from ACU for supply to the lower induction terminal; 11 — coolant (40–60 °C); 12 — lower induction terminal

датчику CO_2 уменьшается расход воздуха, подаваемого из второго канала. Благодаря этому управление можно выполнить с максимально простой и надежной локальной автоматикой, без организации единой электронной системы, контролирующей параметры во всем вагоне и управляющей всеми исполнительными механизмами.

В отличие от вентиляторных доводчиков (фанкойлов и фреоновых блоков VRF-системы) эжекционные доводчики не имеют подвижных элементов, вместо вентилятора воздух из помещения забирается за счет эжекции [8]. Это обеспечивает высокую надежность и долговечность их работы, бесшумность при эксплуатации. Кроме того, применение доводчика с непосредственным испарением фреона нежелательно по соображениям безопасности: из-за малого объема купе в случае разгерметизации фреоновых проводов вероятно превышение допустимой аварийной концентрации хладагента в воздухе.

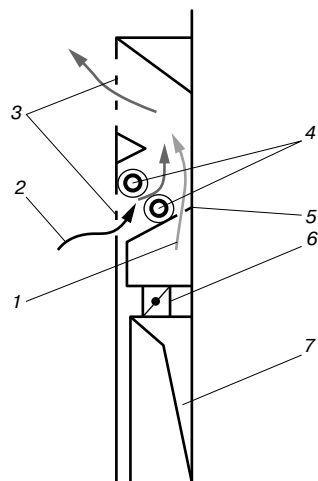
Работа эжекционного доводчика (рис. 2) основана на «эффекте трубки Вентури» [9] (захвате частиц воздуха из помещения струей воздуха, движущейся с высокой скоростью в соседнем сообщающемся канале).

Рис. 2. Схема эжекционного доводчика:

1 — наружный воздух;
2 — рециркуляционный воздух; 3 — решетки;
4 — оребренные трубки теплообменника; 5 — сопло;
6 — заслонка с сервоприводом;
7 — воздуховод

Fig. 2. Scheme of an induction terminal:

1 — outside air;
2 — recirculated air; 3 — grids;
4 — finned heat exchanger tubes;
5 — nozzle; 6 — servo-driven damper; 7 — air duct



Из воздуховода предварительно подготовленный наружный приточный воздух проходит с высокой скоростью через сопло и поступает в теплообменник, где эжектирует внутренний (рециркуляционный) воздух. Таким образом, рециркуляция воздуха происходит внутри каждого купе и не требуется прокладка общевагонного рециркуляционного воздуховода. Доводка температуры воздуха в купе до необходимых значений происходит при помощи изменения расхода приточного воздуха.

Регулирование производительности вентилятора СКВ вагона, подающего воздух в купе, осуществляется автономно по датчику давления, рассчитанному на поддержание постоянного давления после вентилятора, что позволяет учитывать изменения необхо-

димого расхода подаваемого воздуха без электронной синхронизации работы вентилятора и положения заслонок в купе.

Для оценки равномерности распределения температуры и скорости потока воздуха по объему вагона при предлагаемой схеме регулирования проведено трехмерное моделирование распределения этих параметров в купе на базе программного обеспечения Autodesk CFD (Computational Fluid Dynamics) [10]. Моделирование основано на решении численными методами дискретизированных уравнений аэродинамики и тепломассообмена. Численная модель включала в себя трехмерную модель купе с необходимой детализацией: граничные условия, учитывающие теплофизические свойства ограждений; детализированные модели воздухораспределителей; значения скорости потока и температуры приточного воздуха.

При моделировании принимались следующие параметры воздуха на выходе из верхнего воздухораспределителя: температура 16 °С и скорость 0,06 м/с; на выходе из нижнего воздухораспределителя: температура 24 °С и скорость 0,26 м/с, модель турбулентности $k-\varepsilon$.

На рис. 3 представлены результаты моделирования распределения температуры, а на рис. 4 — распределения скорости потока воздуха в характерных сечениях купе. Значения температуры и скорости потока воздуха обозначены оттенками серого цвета по градиентной шкале.

Как показывают результаты моделирования (рис. 3–4), при новой схеме подачи воздуха в купе вагона и направлений воздушных потоков наблюдается равномерное распределение температуры и скорости воздуха по объему помещения.

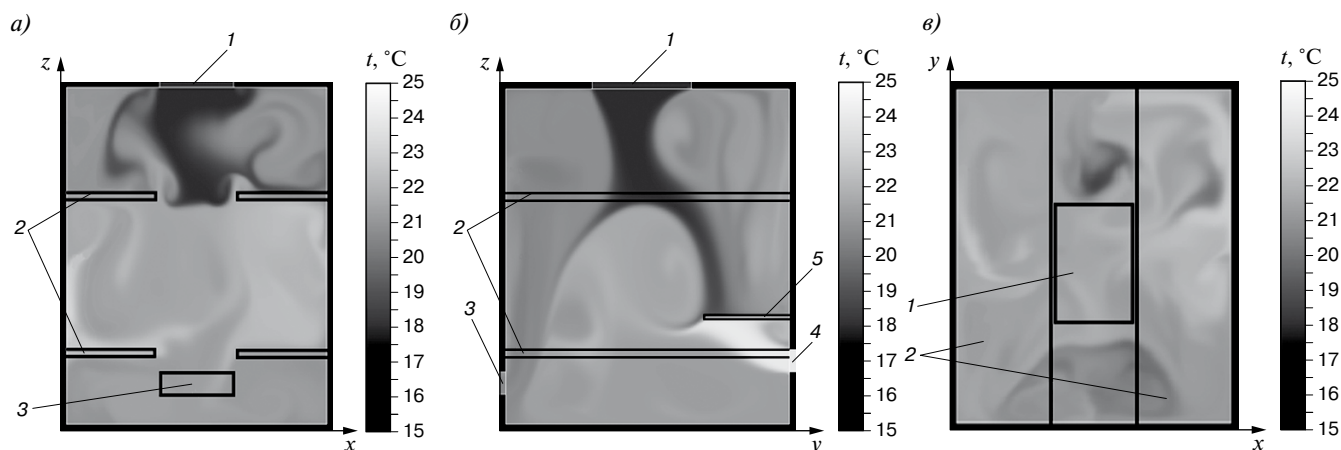


Рис. 3. Распределение температуры воздуха в купе:

а — торцевая стенка; б — боковая стенка; в — потолок; 1 — верхняя распределительная решетка; 2 — пассажирские места;
3 — переточная решетка; 4 — нижняя воздухораспределительная решетка; 5 — откидной столик; ось x — ширина купе;
ось y — длина купе; ось z — высота купе

Fig. 3. Air temperature distribution in the compartment:

а — end wall; б — side wall; в — ceiling; 1 — upper distribution grid; 2 — passenger seats;
3 — transfer lattice; 4 — lower air distribution grid; 5 — folding table; x -axis — compartment width; y -axis — compartment length;
 z -axis — compartment height

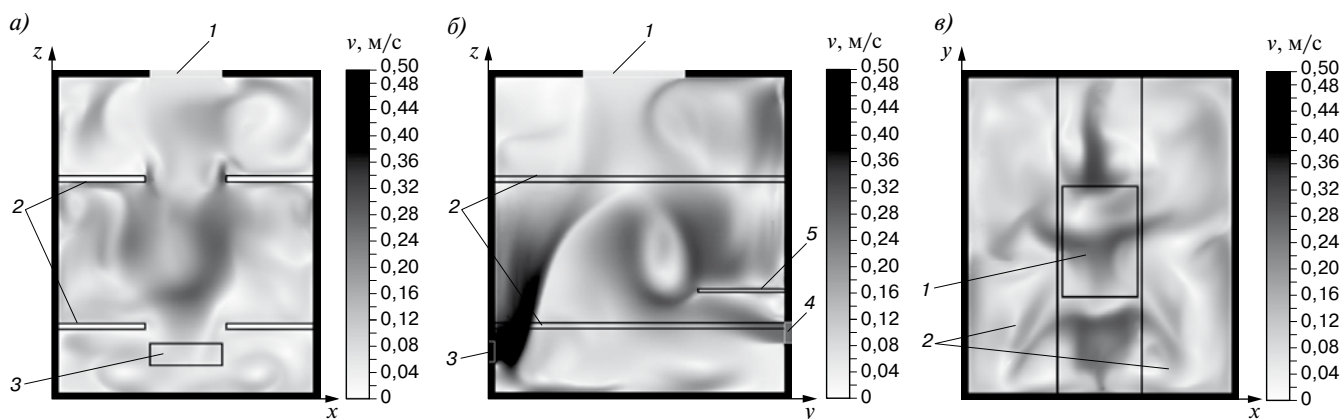


Рис. 4. Распределение скорости потока воздуха в купе:

a — торцевая стенка; *б* — боковая стенка; *в* — потолок; 1 — верхняя распределительная решетка; 2 — пассажирские места; 3 — переточная решетка; 4 — нижняя воздухоподводящая решетка; 5 — откидной столик; ось *x* — ширина купе; ось *y* — длина купе; ось *z* — высота купе

Fig. 4. Distribution of air speed in the compartment:

a — end wall; *б* — side wall; *в* — ceiling; 1 — upper distribution grid; 2 — passenger seats; 3 — transfer grid; 4 — lower air distribution grid; 5 — folding table; *x*-axis — compartment width; *y*-axis — compartment length; *z*-axis — compartment height

Закключение. Система индивидуального регулирования параметров кондиционирования воздуха в купе с эжекционными доводчиками проста в управлении, достаточно энергоэффективна и надежна в эксплуатации. Раздельная подача воздуха в купе по предлагаемой схеме обеспечивает равномерное распределение температуры и скорости воздуха по объему.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стоякин Г.М., Костин А.В., Науменко С.Н. Пути улучшения характеристик климатических систем пассажирского подвижного состава // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2020. Т. 79. № 1. С. 34–38. DOI: <https://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2020-79-1-34-38>.
2. Стоякин Г.М., Костин А.В. Пути улучшения воздушной среды в пассажирских вагонах // Вопросы технических наук в свете современных исследований: сб. ст. по материалам II–III Междунар. науч.-практ. конф. Новосибирск: СибАК, 2017. № 2–3 (2). С. 5–12.
3. Стоякин Г.М., Костин А.В., Науменко С.Н. Пути повышения энергоэффективности климатических систем пассажирских вагонов // Проблемы безопасности на транспорте: сб. ст. по материалам IX Междунар. науч.-практ. конф.: в 2 ч. / под общ. ред. Ю. И. Кулаженко. Гомель: БелГУТ, 2019. Ч. 1. С. 318–320.
4. СП 2.5.1198–03. Санитарные правила по организации пассажирских перевозок на железнодорожном транспорте [Электронный ресурс]: утв. главным государственным санитарным врачом РФ от 3 марта 2003 года; дата введения 3 июня 2003 года; зарегистрировано в Минюсте РФ 1 апр. 2003 г., регистрац. № 4348 (с изменениями на 10 июня 2016 г.). URL: <http://doc.rzd.ru> (дата обращения: 15.01.2021 г.).
5. СП 2.5.2647–10. Санитарные правила по организации пассажирских перевозок на железнодорожном транспорте. Изменения и дополнения № 2 к СП 2.5.1198–03 [Электронный ресурс]: утв.

постановлением главного государственного санитарного врача РФ от 16 июня 2010 г. № 68; дата введения 12 июля 2010 г.: зарегистрировано в Минюсте РФ 7 июля 2010 г., регистрац. № 17750. URL: <https://rg.ru/2010/07/16/sanpraviladok.html> (дата обращения: 15.01.2021 г.).

6. Жариков В.А. Климатические системы пассажирских вагонов. М.: Трансинформ, 2006. 135 с.

7. Минаев Б.Н., Костин А.В., Стоякин Г.М. О влиянии искусственной турбулизации пограничного слоя на гидравлическое сопротивление пучка круглых труб, омываемых поперечным потоком вязкой среды // Наука и техника транспорта. 2012. № 2. С. 47–52.

8. Высоконадёжная энергосберегающая климатическая система [Электронный ресурс]. URL: <https://e-n-e-g-o.ru> (дата обращения: 15.01.2021 г.).

9. Все про трубку Вентури [Электронный ресурс]. URL: <https://kipiavr.ru> (дата обращения: 15.01.2021 г.).

10. CFD-моделирование [Электронный ресурс]. URL: <https://neftegaz.ru/tech-library/gidrotekhnika/141978-cfd-modelirovanie> (дата обращения: 15.01.2021 г.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

СТОЯКИН Григорий Михайлович, ведущий инженер по отоплению, вентиляции и кондиционированию, ООО «Проектное бюро АПЕКС»

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

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

Статья поступила в редакцию 26.01.2021 г., актуализирована 13.02.2021 г., принята к публикации 15.02.2021 г.

Для цитирования: Стоякин Г.М., Костин А.В., Науменко С.Н. Разработка системы кондиционирования с индивидуальным регулированием температуры и расхода воздуха в купе пассажирского вагона // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2021. Т. 80. № 1. С. 30–34. DOI: <https://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-1-30-34>.

Development of an air conditioning system with individual regulation of temperature and air flow rate in a compartment of a passenger car

G. M. STOYAKIN¹, A. V. KOSTIN², S. N. NAUMENKO³

¹Limited Liability Company "Design Bureau APEKS" (LLC "Design Bureau APEKS"), Moscow, 115114, Russia

²Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Russian University of Transport" (FGAOU VO "RUT" (MIIT)), Moscow, 127055, Russia

³Joint Stock Company Railway Research Institute (JSC "VNIIZHT"), Moscow, 129626, Russia

Abstract. Maintaining optimal parameters of the microclimate in the car along the route is the most important requirement for the passenger's travel. In the 1st class passenger cars, maintaining optimal microclimate parameters is achieved through the operation of the air conditioning system, which provides individual regulation of the air temperature in each compartment. Individual air temperature control systems used in air conditioning systems are divided into two groups: active and passive.

The article proposes for consideration a combined active-passive system with a separate air supply with a lower and higher temperature compared to the temperature maintained in the compartment and the installation of individual induction terminals, which makes it possible to increase the efficiency of individual regulation of air parameters in the compartment.

To assess the uniformity of temperature distribution and air flow rate over the car volume with the proposed control scheme, a three-dimensional modeling of the distribution of these parameters in the compartment was carried out on the basis of Autodesk CFD software.

The given simulation results indicate the uniformity of temperature and air flow rate distribution over the compartment volume, which makes it possible to characterize the proposed system as sufficiently energy efficient, easy to operate and reliable in operation.

Keywords: passenger car; air conditioning; individual regulation system; induction terminal; air temperature; air speed; system efficiency

DOI: <https://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-1-30-34>

REFERENCES

1. Stoyakin G. M., Kostin A. V., Naumenko S. N. *Puti uluchsheniya kharakteristik klimaticheskikh sistem passazhirskogo podvizhnogo sostava* [Ways to improve characteristics of the climate systems of passenger rolling stock]. *Vestnik VNIIZhT* [Vestnik of the Railway Research Institute], 2020, Vol. 79, no. 1, pp. 34–38. DOI: <https://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2020-79-1-34-38>.
2. Stoyakin G. M., Kostin A. V. *Puti uluchsheniya vozduшной среды в пассажирских вагонах* [Ways to improve the air environment in passenger cars]. *Voprosy tekhnicheskikh nauk v svete sovremennykh issledovaniy*. Cb. st. po materialam II–III Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. [Problems of technical sciences in the light of modern research. Coll. of articles based on the materials of the II–III International scientific and practical conference]. Novosibirsk, SibAK Publ., 2017, no. 2–3 (2), pp. 5–12.
3. Stoyakin G. M., Kostin A. V., Naumenko S. N. *Puti povysheniya energoeffektivnosti klimaticheskikh sistem passazhirskikh vagonov* [Ways to improve the energy efficiency of climatic systems of passenger cars]. *Problemy bezopasnosti na transporte*. Cb. st. po materialam IX Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. V 2 ch. / pod obshch. red. Yu. I. Kulazhenko [Problems of safety in transport. Coll.

of articles based on the materials of the IX International scientific and practical conference, in 2 parts. Edited by Yu. I. Kulazhenko]. Gomel', BelGUT Publ., 2019, Part 1, pp. 318–320.

4. SP 2.5.1198–03. *Sanitary rules for the organization of passenger transportation by rail*. Approved by the chief state sanitary doctor of the Russian Federation on March 3, 2003, date of introduction June 3, 2003, registered in the Ministry of Justice of the Russian Federation on April 1, 2003, reg. no. 4348. URL: <http://doc.rzd.ru> (retrieved on 15.01.2021) (in Russ.).

5. SP 2.5.2647–10. *Sanitary rules for the organization of passenger transportation by rail. Amendments and additions no. 2 to SP 2.5.1198–03*. Approved by the decree of the chief state sanitary doctor of the Russian Federation of June 16, 2010 No. 68, date of introduction July 12, 2010. URL: <https://rg.ru/2010/07/16/sanpravila-dok.html> (retrieved on 15.01.2021) (in Russ.).

6. Zharikov V. A. *Klimaticheskie sistemy passazhirskikh vagonov* [Climatic systems of passenger cars]. Moscow, Transinform Publ., 2006, 135 p.

7. Minaev B. N., Kostin A. V., Stoyakin G. M. *O vliyaniy iskusstvennoy turbulizatsii pogranichnogo sloya na gidravlicheskie soprotivleniya puchka kruglykh trub, omyvaemykh poperechnym potokom vyazkoy sredy* [On the influence of artificial turbulization of the boundary layer on the hydraulic resistance of a bundle of round pipes washed by a transverse flow of a viscous medium]. *Science and Technology in Transport*, 2012, no. 2, pp. 47–52.

8. *Vysokonadezhnaya energosberegayushchaya klimaticheskaya sistema* [Highly reliable energy-saving climate system]. URL: <https://e-n-e-r-g-o.ru> (retrieved on 15.01.2021) (in Russ.).

9. *Vse pro trubku Venturi* [Everything about the Venturi tube]. URL: <https://kipiavp.ru> (retrieved on 15.01.2021) (in Russ.).

10. *CFD-modelirovanie* [CFD-modeling]. URL: <https://neftegaz.ru/tech-library/gidrotekhnika/141978-cfd-modelirovanie> (retrieved on 15.01.2021) (in Russ.).

ABOUT THE AUTHORS

Grigoriy M. STOYAKIN,

Leading Engineer in Heating, Ventilation and Air Conditioning Issues, LLC "Design Bureau APEKS"

Aleksander V. KOSTIN,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department "Heat Power Engineering of Railway Transport", FGAOU VO "RUT" (MIIT)

Sergey N. NAUMENKO,

Dr. Sci. (Eng.), Head of Department of the Center for Electrification and Heat Power Engineering, JSC "VNIIZHT"

Received 26.01.2021

Revised 13.02.2021

Accepted 15.02.2021

■ E-mail: naumenko.sergey@vniizht.ru (S. N. Naumenko)

For citation: Stoyakin G. M., Kostin A. V., Naumenko S. N. Development of an air conditioning system with individual regulation of temperature and air flow rate in a compartment of a passenger car // VNIIZHT Scientific Journal. 2021. 80 (1): 30–34 (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-1-30-34>.

Повышение пропускной способности железной дороги с установкой компенсации реактивной мощности

Л. А. GERMAN

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

Аннотация. Рассмотрены существующие регулируемые установки поперечной емкостной компенсации для повышения пропускной способности участков тяговой сети 25 и 2×25 кВ железных дорог России. Приведены характеристики статического генератора реактивной мощности на биполярных IGBT-транзисторах (изготовитель ООО НПП «РУ-Инжиниринг», Набережные Челны), переключаемой фильтрокомпенсирующей установки (изготовитель Горьковская железная дорога и Нижегородский филиал СамГУПС), трехступенчатой переключаемой фильтрокомпенсирующей установки. Для повышения пропускной способности все установки включаются на постах секционирования тяговой сети. Многолетняя работа статического генератора реактивной мощности и переключаемой фильтрокомпенсирующей установки показала их эксплуатационную эффективность. При этом предложены следующие модернизации: в статическом генераторе реактивной мощности рекомендуется уменьшить установленную мощность, заменяя ее на нерегулируемую компенсацию, а в переключаемой фильтрокомпенсирующей установке переключение ступеней осуществлять ступенями по 400–500 В для нормализации режима тяги электроподвижного состава.

Показано, что по техническим характеристикам переключаемая фильтрокомпенсирующая установка с тиристорным ключом не уступает статическому генератору реактивной мощности в части повышения пропускной способности, а по некоторым показателям превосходит его. В целом по сроку окупаемости переключаемая фильтрокомпенсирующая установка превосходит статический генератор реактивной мощности в связи с большой себестоимостью последнего. Предлагаются следующие варианты использования рассматриваемых установок. При необходимости мощности установок поперечной емкостной компенсации до 5–6 Мвар для повышения пропускной способности следует устанавливать переключаемые фильтрокомпенсирующие установки. С учетом реальных нагрузок такое решение будет реализовано на большинстве постов секционирования. Для мощности установок более 5–6 Мвар следует рассмотреть вариант использования статического генератора реактивной мощности пониженной мощности: при больших нагрузках его эффективность увеличится.

Ключевые слова: система электроснабжения; поперечная емкостная компенсация; регулируемые установки; пропускная способность; статический генератор реактивной мощности; переключаемая фильтрокомпенсирующая установка; экономическая эффективность

Введение. Стратегия развития железнодорожного транспорта в России предусматривает повыше-

ние весовых норм, позволяющих обеспечить возрастающие объемы грузовых перевозок. Распоряжением ОАО «РЖД» № 1799р от 1 сентября 2016 г. введенная в действие инструкция по организации обращения грузовых поездов повышенной массы и длины и соединенных поездов «...направлена на повышение пропускной и провозной способности участков и направлений...». Однако указанная категория поездов на ряде участков вызывает снижение напряжения на токоприемнике электровоза и, как следствие, скорости движения.

В соответствии с Инструкцией [1] пропускная способность зависит от фактического напряжения на токоприемнике электровоза и надежности технических средств, и в частности в электроснабжении. Остановимся лишь на регулируемых установках поперечной емкостной компенсации в тяговых сетях железных дорог переменного тока систем 25 и 2×25 кВ. Об эффективности поперечной емкостной компенсации в реализации повышенной пропускной способности железной дороги неоднократно указывалось в публикациях [2–4]. По предложению руководства АО «Трансэнерго» — филиала ОАО «РЖД» с 2015 г. внедряются статические генераторы реактивной мощности — СГРМ (включены в работу на Западно-Сибирской, Северной и Горьковской железных дорогах), о которых, в частности в [4], сказано: «... Их основное преимущество — эффективное снижение потерь напряжения и мощности в контактной сети, позволяющее решать вопросы усиления пропускной способности участка железной дороги за счет сокращения интервалов попутного следования поездов. Перспектива использования ФКУ — расшивка узких мест по уровню напряжения на ряде участков Восточного полигона без строительства тяговых подстанций, что на порядок снижает инвестиционные затраты». Одновременно на Горьковской железной дороге, на самом тяжелом консольном участке тяговой сети системы 2×25 кВ, уже семь лет успешно работает регулируемая переключаемая фильтрокомпенсирующая установка (ФКУ), созданная по разработкам специалистов

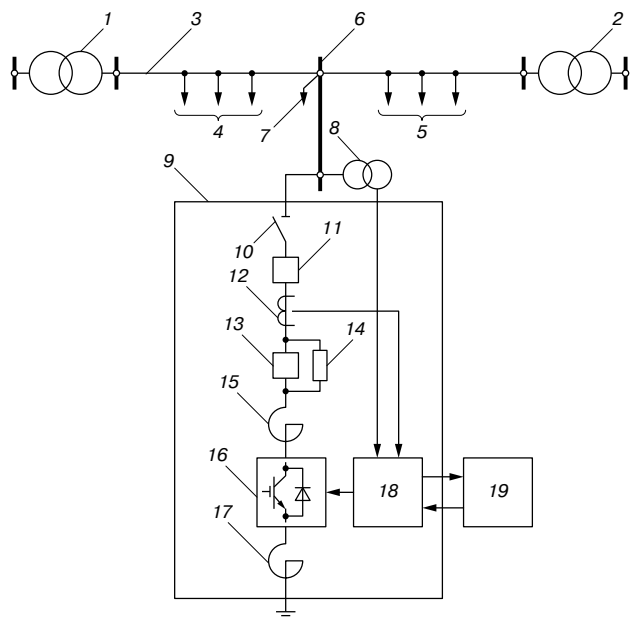


Рис. 1. СГРМ, подключенный на посту секционирования:

1 и 2 — левая и правая тяговые подстанции рассматриваемой межподстанционной зоны соответственно; 3 — тяговая сеть; 4 и 5 — тяговые нагрузки левого и правого участков рассматриваемой зоны относительно поста секционирования (ПС); 6 — шины ПС; 7 — фиктивная нагрузка ПС, полученная разнесением тяговой нагрузки между подстанциями и ПС; 8 — измерительный трансформатор напряжения на ПС; 9 — генератор СГРМ; 10 — разъединитель в цепи устройства СГРМ; 12 — измерительный трансформатор тока в цепи устройства СГРМ; 13 — вакуумный выключатель, шунтированный резистором 14 в цепи СГРМ; 14 — токоограничивающий резистор заряда; 15 — вводный реактор в цепи устройства СГРМ; 16 — блок силовых ячеек в цепи устройства СГРМ; 17 — выходной реактор в цепи устройства СГРМ; 18 — шкаф управления устройством СГРМ; 19 — расчетный блок

Fig. 1. Static reactive power generator (SRPG) connected to the sectioning post:

1 and 2 — left and right traction substations of the considered inter-substation zone, respectively; 3 — traction network; 4 and 5 — traction loads of the left and right sections of the considered zone relative to the sectioning post (SP); 6 — SP buses; 7 — fictitious load of the substation, obtained by dividing the traction load between the substations and SP;

8 — measuring voltage transformer at SP; 9 — SRPG generator; 10 — disconnecter in the circuit of the SRPG device; 11 — vacuum switch in the circuit of the SRPG device; 12 — measuring current transformer in the circuit of the SRPG device; 13 — vacuum switch shunted by a resistor 14 in the SRPG circuit; 14 — current-limiting charge resistor; 15 — lead-in reactor in the circuit of the SRPG device; 16 — block of power cells in the circuit of the SRPG device; 17 — output reactor in the circuit of the SRPG device; 18 — control cabinet for the SRPG device; 19 — calculated block

дороги совместно с Нижегородским филиалом СамГУПС, которая решила проблемы повышения пропускной способности данного участка [5–9]. Далее рассмотрены характеристики указанных установок и предложены области применения их в системе тягового электроснабжения.

Установки поперечной емкостной компенсации в тяговой сети. Самый эффективный способ повышения пропускной способности — использование компенсирующих установок (КУ) на постах секционирования

(ПС). На железных дорогах с 1970 г. с целью повышения напряжения и снижения потерь мощности в тяговой сети стали применять КУ на ПС. Ранее КУ были нерегулируемыми, и поэтому при снижении тяговой нагрузки напряжение на КУ повышалось и в ряде случаев превосходило предельно допускаемое — 29 кВ. В результате КУ аварийно отключались или приходилось поддерживать заниженное напряжение на тяговых подстанциях. Для решения указанной проблемы необходимо было оснащать ПС регулируемые КУ. В настоящее время известны два типа регулируемых КУ: СГРМ на биполярных транзисторах и переключаемая ФКУ с тиристорным ключом, разработанная на основании типового варианта компенсации реактивной мощности путем добавления второй секции с шунтирующим выключателем. Рассмотрим их более подробно.

СГРМ. В настоящее время на ПС начали включать СГРМ серии «RU-DRIVE SVG», изготовитель ООО НПП «РУ-Инжиниринг», которые доказали свою эффективность в повышении пропускной способности участков железной дороги (рис. 1). Основное предназначение СГРМ заключается в снижении колебаний напряжения в тяговой сети за счет компенсации реактивного тока тяговой нагрузки. СГРМ выполнен по схеме четырехквadrатного преобразователя напряжения типа 4QS на основе силовых транзисторных модулей IGBT. В зависимости от направления потока электрической энергии он выполняет функции как автономного инвертора напряжения, так и выпрямителя и представляет собой модульный многоуровневый инвертор, состоящий из 28 силовых модулей H-мостов с конденсаторами C_1 – C_n . Данное устройство можно рассматривать как управляемый источник тока. Полное выходное напряжение является суммой выходных напряжений отдельных модулей H-мостов. Каждое отдельное выходное напряжение модуля получается с использованием широтно-импульсной модуляции со сдвигом фазы коммутации для каждого моста. СГРМ выполняет функции компенсации реактивной мощности, стабилизации напряжения в точке его подключения, а также мощного активного фильтра. В последнем случае для фильтрации гармоник мощность СГРМ по данным реально работающих генераторов увеличена на 35–37 %. В связи с наличием биполярных транзисторов в СГРМ установлены мощные постоянно работающие вентиляторы потребляемой мощности 40 кВт, в связи с чем на ПС ежемесячно выезжает бригада по их обслуживанию.

В СГРМ входит следующее силовое оборудование: главный выключатель QF1 с трансформатором тока ТА, разъединители QS1 и QS2, демпфирующий резистор QF2 и реакторы L1 и L2. Номинальная мощность составляет 6,7; 10 и 15 Мвар. При этом гальваническая развязка цепей управления в устройствах обеспечивается оптоволоконными линиями связи.

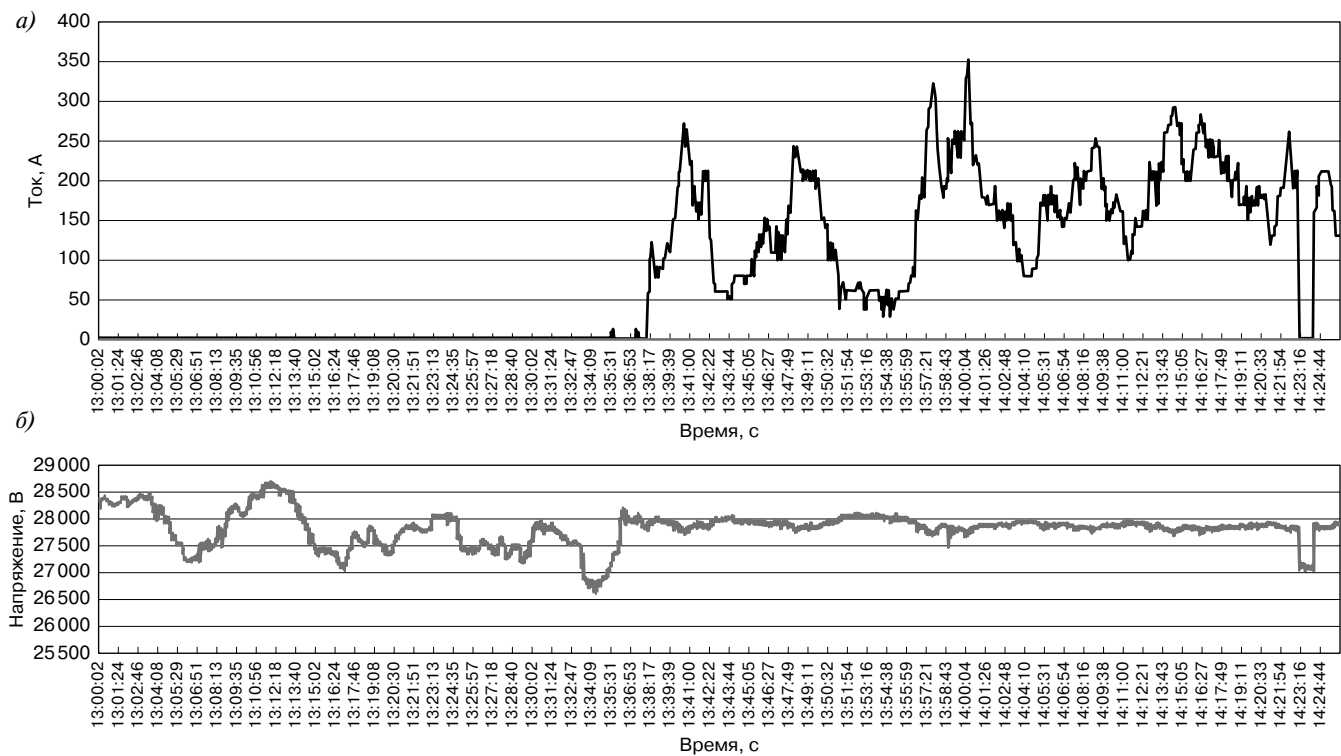


Рис. 2. Ток СГРМ (а) и напряжение на шине ПС (б)
Fig. 2. SRPG current (a) and voltage on the SP bus (b)

Внедрение СГРМ на ПС тяговой сети переменного тока кардинально решает проблемы пропускной способности железных дорог. При этом по опыту Западно-Сибирской, Северной и Горьковской железных дорог увеличивается число тяжеловесных и двояльных поездов в сутки на 10–25 составов и поддерживаются нормативные значения напряжения. Эффективность стабилизации напряжения в тяговой сети с помощью СГРМ демонстрирует осциллограмма, зафиксированная на ПС Оричи Горьковской железной дороги (рис. 2): до момента 13 ч 36 мин 53 с СГРМ был отключен, и напряжение изменялось в пределах 26,6–28,6 кВ (рис. 2, б). При включении СГРМ напряжение стабилизировалось.

Контроль тяговой нагрузки для регулирования мощности СГРМ осуществляется косвенно — по уровню напряжения на шинах ПС, поэтому не всегда происходит полная компенсация реактивной нагрузки, а зачастую наблюдается и режим перекомпенсации нагрузки, отнесенной к ПС. Это приводит к повышенным значениям потерь мощности в тяговой сети [2].

В связи с указанным предлагается использовать микропроцессорные терминалы ИнТер (НИИ ЭФА-ЭНЕРГО) для контроля гармонических составляющих напряжения на шинах ПС с последующим расчетом гармонических составляющих тока, включая первую гармоническую. Тогда требования регулирования мощности СГРМ можно выполнить по третьей

гармонике тока нагрузки, по которой определяется компенсируемый ток первой гармонической установки компенсации [10].

В общем случае для осуществления эффективного электроснабжения железной дороги требования к устройствам автоматического регулирования мощности установки поперечной емкостной компенсации на ПС определяются следующими соображениями:

1. Необходимо повысить напряжение на шинах ПС. При этом напряжение на токоприемнике должно удовлетворять требованиям нормативных документов (21 кВ в общем случае и 24 кВ — для скоростных участков). Кроме того, дополнительно устанавливается условие: для повышения пропускной способности участка следует повысить напряжение в контактной сети так, чтобы пропустить заданное число поездов, включая тяжеловесные и двояльные.

2. Одновременно следует минимизировать потери электроэнергии, а это значит, что следует выбрать на шинах ПС такой уровень напряжения, при котором будет обеспечена заданная пропускная способность при минимальной потере электроэнергии в тяговой сети.

Далее ограничимся этими двумя существенными требованиями к задаче регулирования мощности установки на ПС.

В настоящее время на электрифицированных участках железной дороги приняты требования регулирования мощности СГРМ, отмеченные в инструкции

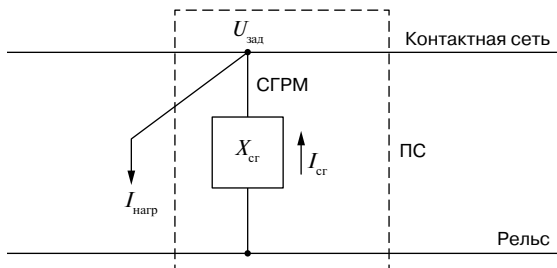


Рис. 3. Схема замещения СГРМ в тяговой сети
Fig. 3. SRPG substitution scheme in the traction network

завода-изготовителя как «регулирование напряжения». В данном режиме в соответствии с верхним и нижним пределом напряжения, установленным в настройках параметров, генератор «RU-DRIVE SVG» автоматически регулирует выходную мощность, тем самым осуществляя регулирование и стабилизацию напряжения на шинах ПС на заданном уровне $U_{\text{зад}}$ (обычно от 27 до 28 кВ). В частности, на СГРМ ПС Оричи Горьковской железной дороги установлено $U_{\text{зад}} = 28$ кВ, а на СГРМ Северной железной дороги — 27 кВ.

Для расчета схемы электроснабжения определимся со схемой замещения межподстанционной зоны тяговой сети переменного тока с СГРМ на ПС.

Схему замещения СГРМ представим следующим образом (рис. 3).

Регулируемое емкостное сопротивление подключено к шине ПС, на котором установлено заданное напряжение $U_{\text{зад}}$, поддерживаемое СГРМ и которое генерирует ток $I_{\text{сг}}$. Ток нагрузки $I_{\text{нагр}}$, приходящийся на ПС, рассчитывается путем переноса (перераспределения) нагрузки тяговой сети между тяговыми подстанциями и ПС. Следует учесть, что этот ток нельзя замерить на ПС.

Представленная схема замещения позволяет выполнить расчет режима СГРМ в мгновенной схеме замещения.

Важно отметить, что трудности измерения тока нагрузки на ПС определяют погрешности расчета необходимого емкостного тока существующих СГРМ для эффективной компенсации реактивной мощности тяговой сети и, соответственно, генерирования емкостного тока. Предлагается расчет мгновенной схемы участка электроснабжения тяговой сети с СГРМ произвести в два шага. На первом шаге представим схему замещения СГРМ емкостным сопротивлением, значение которого определяется мощностью СГРМ. Если, например, мощность 10 Мвар, то сопротивление его, Ом, равно $X_{\text{сг}} = 10^3 \times 0,65 / 27,5$, где 0,65 — коэффициент, учитывающий увеличение мощности СГРМ для генерации инверсных гармоник. После расчета мгновенной схемы участка анализируют напряжение на шинах СГРМ: если это напряжение меньше заданного (обычно от 27 до 28 кВ), то на втором шаге

корректируют $X_{\text{сг}}$ для получения заданного напряжения путем изменения емкостного сопротивления (отрицательное сопротивление), при этом изменяется ток и мощность СГРМ. Если же после расчета мгновенной схемы напряжение выше заданного, то заменяют емкостное сопротивление на индуктивное и изменяют его (регулируют положительное сопротивление) для достижения заданного напряжения. Обычно после второго шага напряжение на шинах соответствует заданному.

В связи с недостатками СГРМ (повышенные стоимость и потери мощности преобразователя) предлагается уменьшить мощность СГРМ в два раза и заменить изыятую мощность установкой традиционной нерегулируемой компенсации, при этом регулирование мощности последней осуществить установкой СГРМ в режиме генерации индуктивной мощности.

Переключаемая ФКУ выполнена на основании отечественных изобретений [5–9] и представляет принципиально новую схему регулируемой установки, так как регулируемые секции конденсаторов включены не параллельно с основной батареей, а последовательно (рис. 4).

Первая ступень наименьшей мощности состоит из последовательно включенных двух секций конденсаторных батарей и двух фильтровых реакторов. Каждая секция ФКУ настроена на резонансную частоту 140 Гц, что обеспечивает отсутствие резонансных явлений. Включение первой ступени в работу происходит следующим образом. При отключенных выключателях $Q1, Q2, Q3$ включается главный выключатель $Q1$, а затем шунтируется демпфирующий резистор R включением выключателя $Q2$. Первая ступень для ФКУ на ПС обеспечивает допустимый режим напряжения при малых и средних нагрузках и рассчитывается с целью наибольшего снижения потерь электроэнергии в тяговой сети по формуле (3.1) [10].

Вторая ступень ФКУ наибольшей мощности состоит из включенной первой секции конденсаторной батареи $C1$ и фильтрового реактора L . Включение в работу второй ступени ФКУ при включенной первой ступени происходит следующим образом. При включенном главном выключателе $Q1$ отключается выключатель $Q2$, затем включается выключатель $Q3$. Вторая ступень рассчитывается по нормативному документу, указанному в [10], для обеспечения заданной пропускной способности по формуле (3.2) [10].

Схему можно реализовать и при одном реакторе. Если применить, например, реактор ФРОМ-3200 на 33,6 Ом и ток 230 А, то минимальную мощность можно сформировать на 3 Мвар, а максимальная мощность может быть на 4–6 Мвар. Если в схеме два реактора, то соотношение мощностей может быть любым. При соотношении максимальной мощности к минимальной более чем в два раза напряжение на выключателе $Q2$ не будет превышать $U_{\text{ш}}/3$, где $U_{\text{ш}}$ — напряжение на

шинах ФКУ (принимая $U_{\text{н}} = 27,5\text{--}29\text{ кВ}$). Таким образом, оправдано напряжение 10 кВ выключателя $Q2$.

Отметим важное преимущество по надежности представленной схемы. Расчеты и опыт эксплуатации показали, что в режиме минимальной мощности ФКУ работает 60–80 % всего времени. Срок службы конденсаторов зависит от их напряжения [2]. Расчеты показывают, что снижение напряжения до указанных значений повышает ресурс работы в десятки раз. Вот почему в условиях эксплуатации рекомендуется переводить существующие работающие много лет установки поперечной емкостной компенсации в переключаемые.

Подведем некоторые итоги эксплуатации переключаемой ФКУ мощностью 4,6 Мвар в тяговой сети участка Сергач—Шумерля системы $2 \times 25\text{ кВ}$ Горьковской железной дороги, более 7 лет установленной на консоли тяговой сети: нормализация напряжения в тяговой сети позволила пропускать запланированные по графику тяжеловесные и двоянные поезда, переключаемая установка эффективно снижает потери мощности в тяговой сети, нет никаких претензий по надежности работы установки. Переключение ФКУ на максимальную мощность ограничили в среднем до 4–6 раз в сутки, для этого специально настроена автоматика переключения. Практика показала достаточность этих переключений, так как тяжеловесные поезда (а их 10–13 единиц в сутки и более), как правило, проходят пачками. Тем не менее необходимость увеличения мощности этой переключаемой ФКУ до 6–7 Мвар уже очевидна.

На наш взгляд, учитывая, что для условий тягового электроснабжения плавное регулирование мощности ФКУ можно заменить ступенчатым, а скорость переключения напряжения не имеет решающего преимущества, схему ФКУ можно упростить, приводя к приемлемым стоимостным показателям, что демонстрирует приведенная переключаемая ФКУ. Кроме того, предлагаемый вариант переключаемой ФКУ не генерирует гармоники, а шунтирует их, не пропуская в энергосистему, приемлем по потерям активной мощности и эффективен в снижении потерь мощности в тяговой сети, а также надежен в работе. В связи со сравнительно большим диапазоном допустимого напряжения в контактной сети (21 (24)–29 кВ) при ступенчатом регулировании всегда есть возможность обеспечить указанный допустимый диапазон.

Переключение секций происходит всегда с предварительным введением демпфирующего резистора. Так как напряжение на шунтирующем выключателе не превышает 8–10 кВ, то ток разряда конденсаторов через резистор не превышает $8000 \div 10\,000 / 100 = 80 \div 100\text{ А}$ (где 100 Ом в знаменателе — сопротивление демпфирующего резистора), что меньше тока конденсаторов, поэтому переключения происходят спокойно без перегрузок. Важно отметить ограничен-

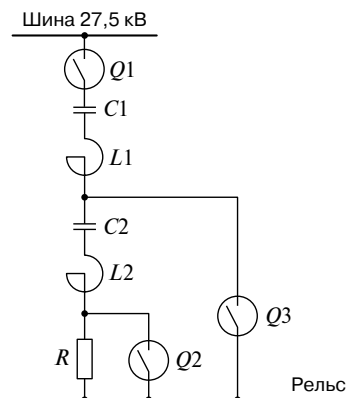


Рис. 4. Схема переключаемой ФКУ с вакуумными выключателями: $Q1$ — главный выключатель; $C1$ — конденсаторная батарея первой секции; $L1$ — фильтровый реактор первой секции; $C2$ — конденсаторная батарея второй секции; $L2$ — фильтровый реактор второй секции; R — демпфирующий резистор; $Q2$ — выключатель 10-кВ демпфирующего резистора; $Q3$ — выключатель 10-кВ второй секции ФКУ

Fig. 4. Scheme of a switchable filter-compensating installation (FCI) with vacuum switches:

$Q1$ — main switch; $C1$ — capacitor bank of the first section; $L1$ — filter reactor of the first section; $C2$ — capacitor bank of the second section; $L2$ — filter reactor of the second section; R — damping resistor; $Q2$ — 10 kV damping resistor switch; $Q3$ — 10 kV switch of the second section of the FCI

ные броски напряжения при переключении ступеней. Во-первых, переключается лишь дополнительная мощность ФКУ (а не вся мощность ФКУ), и во-вторых, на первом этапе раньше включается вторая ступень с ограничительным резистором, который затем через 0,3–1,0 с шунтируется, и напряжение повышается на 0,3–0,7 кВ. Далее на втором этапе происходит переключение на первую ступень, т. е. шунтирование второй секции, и при мощности ФКУ до 5–6 Мвар напряжение повышается еще на 0,3–0,7 кВ. Однако при больших мощностях ФКУ (6,7–10–15 Мвар) увеличение напряжения в тяговой сети при переключении может достигать 2–3 кВ. Поэтому при больших мощностях ФКУ введение тиристорного ключа вместо вакуумного выключателя (рис. 5) обязательно, и тогда броски напряжения при переключении будут снижаться.

Тиристорный ключ (ТК) шунтирует вторую секцию $C2$ – $L2$ конденсаторной батареи при больших тяговых нагрузках. Включение тиристорного ключа происходит постепенно за счет его фазового регулирования блоком управления (БУ) [9] при контроле фазы тока установки трансформатором тока (ТТ). Таким образом, время постепенного повышения напряжения на шинах установки при включении тиристора можно удлинить до 0,5–10 с. На наш взгляд, целесообразно установить время задержки повышения напряжения до 2–3 с, что не отразится на устойчивости работы электроваз, так как будут исключены импульсные броски напряжения значительной величины (до 1,0–1,6 кВ) при переключении секций ФКУ.

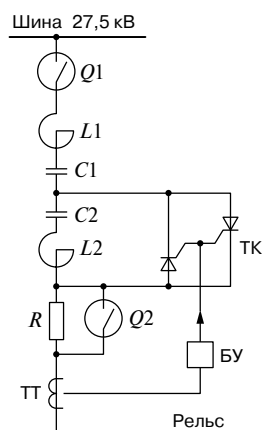


Рис. 5. Схема переключаемой ФКУ с тиристорным ключом:

ТК — тиристорный ключ; БУ — блок управления;

ТТ — трансформатор тока

Fig. 5. Scheme of switchable FCI with a thyristor switch:

ТК — thyristor switch; БУ — control unit; ТТ — current transformer

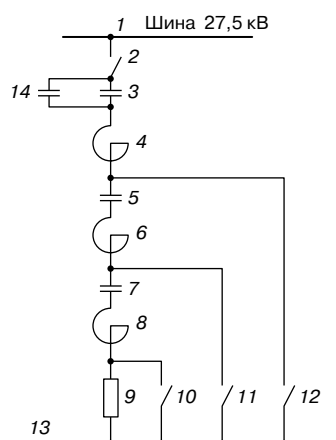


Рис. 6. Схема трехступенчатой ФКУ:

1 — контактная сеть; 3–14–4, 5–6, 7–8 — секции конденсаторов с реакторами; 2, 10, 11, 12 — коммутационные аппараты;

9 — пусковой резистор; 13 — рельс

Fig. 6. Three-stage FCI scheme:

1 — contact network; 3–14–4, 5–6, 7–8 — sections of condensers with reactors; 2, 10, 11, 12 — switching devices; 9 — starting resistor; 13 — rail

Трехступенчатая ФКУ. Наибольшая эффективность ФКУ в тяговой сети переменного тока межподстанционной зоны, где установлена ФКУ (например, на ПС), по снижению потерь электроэнергии будет в том случае, если ее мощность равна половине реактивной мощности тяговой нагрузки этой зоны [2]. Конечно, при плавно регулируемой ФКУ или при большом количестве ступеней мощности эффект ФКУ по снижению потерь мощности будет повышаться. Однако по технико-экономическим соображениям [2, 10] с учетом повышенной стоимости регулируемых уста-

новок и, главное, с учетом снижения положительного эффекта от каждой последующей включенной ступени увеличение числа ступеней (более 3) нецелесообразно, что неоднократно подтверждается в технической литературе [11]. Поэтому предлагается вариант трехступенчатой однофазной ФКУ, рационально снижающей потери электроэнергии в тяговой сети и повышающей пропускную способность участка железной дороги (рис. 6). По сравнению с установкой с двумя ступенями мощности в трехступенчатой ФКУ три ступени мощности, следовательно более строго будет выполняться требование по снижению потерь мощности в тяговой сети. При повышении нагрузки в тяговой сети понижается напряжение на шинах ФКУ, и тогда следует увеличить ее мощность для повышения напряжения в тяговой сети и, соответственно, для снижения потерь мощности.

Для увеличения мощности при напряжении на шинах ФКУ 27–29 кВ в работу включается первая ступень ФКУ наименьшей мощности, при напряжении 24–27 кВ — вторая ступень, обеспечивающая максимальное снижение потерь мощности в диапазоне средних тяговых нагрузок, и при напряжении 21–24 кВ — третья ступень повышенной мощности. Для конкретных участков указанные напряжения переключения секций ФКУ корректируются.

Число ступеней ФКУ определяется в зависимости от схемы питания тяговой сети и характеристики тяговой нагрузки конкретного участка.

Уровень напряжения — основная характеристика, приводящая к повышению пропускной способности участка. Тиристорный ключ позволяет в любой момент времени поддерживать повышенное напряжение. Оценим требуемую мощность КУ. Пусть на токоприемнике тяжеловесного состава зафиксировано пониженное напряжение $U_{ф.мин}$, которое следует повысить до желательного $U_{ж*}$. КУ повышает напряжение на $I_{ку} X_{вх}$, где $I_{ку}$ — генерируемый ток КУ, $X_{вх}$ — входное сопротивление КУ. Считая полученный ток предельным для КУ, можно определить номинальную мощность КУ для повышения ее пропускной способности:

$$Q_{ку.ном} = (U_{ж*} - U_{ф.мин}) U_{ку.ном} / X_{вх}. \quad (1)$$

На наш взгляд, при прохождении тяжеловесных поездов и, соответственно, при низких значениях напряжения КУ должна повысить напряжение в тяговой сети по крайней мере до номинального, т. е. до 25 кВ, при котором характеристики электровоза будут наилучшими.

Рассчитаем необходимую мощность КУ при минимальных напряжениях в тяговой сети. Например, $U_{ф.мин} = 21$ и 23 кВ, а желательное напряжение $U_{ж*}$ до

которого следует повысить минимальное напряжение, принимаем в 24, 25, 27 кВ (таблица). При этом рассмотрим два варианта питания тяговой сети: двухстороннее, с включением КУ на ПС (входное сопротивление — 8 Ом) и консольное, с включением КУ на консоли (входное сопротивление — 12 Ом). Конечно, с увеличением принятого минимального напряжения $U_{\phi, \min}$ напряжение в тяговой сети будет выше $U_{\text{ж}}$, т. е. выше 24–27 кВ.

Из таблицы следует, что при повышении напряжения с 21 до 24–25 кВ необходимая мощность КУ ПС составляет 10,32–13,76 Мвар, а при одностороннем питании мощность КУ в конце зоны — 3,87–5,15 Мвар.

Для того чтобы установить по указанным расчетам номинальную мощность КУ, следует знать, как часто в течение суток появляется предельное значение напряжения в 21 кВ. Другими словами, следует определить вероятностные характеристики минимального напряжения. Предлагается по опыту применения вероятностных характеристик в ГОСТ на нормативы показателей качества электроэнергии (ГОСТ Р 54149–2010) использовать аналогичные характеристики при определении мощности КУ для повышения пропускной способности электрифицированных участков. Это значит, что для задачи повышения пропускной способности по устройствам электроснабжения следует определять наименьшее напряжение в сутках $U_{\phi, \min}$ с вероятностью 95 % и по этим данным рассчитывать номинальную мощность КУ.

Очевидно, что с увеличением $U_{\text{ж}}$ будут лучшие условия повышения пропускной способности. Однако следует учесть, что при повышении напряжения свыше 25 кВ резко возрастает реактивная мощность ЭПС, кроме того, при повышенных напряжениях увеличиваются периоды перекомпенсации реактивной мощности в тяговой сети, что ведет к повышенным значениям потери мощности. Поэтому необходимо более тщательно проверять все затраты при повышении напряжения до 26, 27, 28 кВ. Кстати, по программе КОРТЭС возможно проверять характеристики тяговой сети при повышенных напряжениях.

В частности, по опыту работы СГРМ на Западно-Сибирской, Северной и Горьковской железных дорогах принятый уровень напряжения $U_{\text{ж}}$, равный 27 кВ (Северная) и 28 кВ (Горьковская), по всей видимости, близок к оптимальному, хотя проведенные расчеты [10] указали на целесообразность установки $U_{\text{ж}}$, равного 27 кВ. Опытные расчеты КУ ПС различных участков Горьковской железной дороги для повышения пропускной способности показали, что для большинства участков с двухсторонним питанием тяговой сети достаточны мощности 6–10 Мвар.

При рассмотрении переключаемой ФКУ с двумя секциями алгоритм регулирования обеспечива-

Результаты расчета требуемой мощности КУ
Results of calculating the required power of compensating installation

$X_{\text{вх}}$, Ом	$U_{\phi, \min}$, кВ	Мощность, Мвар, при величине $U_{\text{ж}}$		
		24 кВ	25 кВ	27 кВ
8	21	10,32	13,76	17,2
12	21	3,87	5,16	6,45
8	23	3,44	6,88	13,76
12	23	1,29	2,58	5,16

ет ступенчатое изменение напряжения, в частности при мощности $Q_{\text{ку}}$ в 10 Мвар оно повышается до 3 кВ. Указанное напряжение обеспечит нормальную работу электровоза, при этом в зависимости от режима работы электровоза с помощью его контроллера будет отрегулировано соответствующее напряжение на тяговых двигателях. Как указано ранее, напряжение будет повышаться не скачком, а постепенно, примерно за 1–3 с, что благоприятно скажется на работе схемы электровоза.

Уменьшение несинусоидальности тока и напряжения в тяговой сети. Традиционные нерегулируемые установки компенсации на тяговых подстанциях, включаемые резонансным фильтром на 150 Гц, снижают полный коэффициент гармоник напряжения примерно в полтора раза, а при наличии фильтров на 150 и 250 Гц — в три раза. При этом гармоники напряжения в точке включения фильтров на 150 и 250 Гц снижаются до нуля. Значение гармоник напряжения на шинах тяговых подстанций прежде всего зависит от мощности энергосистемы, и поэтому недопустимый уровень гармонических составляющих напряжения, кроме всего прочего, бывает в системах при малых значениях мощности короткого замыкания на шинах 110 (220) кВ (на уровне 500–700 МВА). При включении этих установок не на подстанции, а на ПС эффективность их снижается примерно в два раза, так как к ПС «относится» только половина тяговой нагрузки межподстанционной зоны, у которой и будут компенсироваться гармонические составляющие.

Другая ситуация складывается с гармоническими составляющими при включении СГРМ. У них надо специально формировать генерацию соответствующих гармоник в противофазе, увеличивая тем самым мощность СГРМ. По опыту применения СГРМ в тяговой сети мощность на генерацию гармоник составляет 35–37 %, поэтому при проектировании следует оценить, насколько эффективна генерация гармоник в СГРМ и не лучше ли эту задачу снижения гармонических составляющих поручить резонансным фильтрам. Кроме того, следует учесть тот факт, что в точке подключения СГРМ будут генерироваться соответствующие гармоники для компенсации гармоник, как правило, удаленных электровозов. Таким образом, в указанной точке будет

формироваться неблагоприятная электромагнитная обстановка, негативно влияющая на работу устройств сигнализации, централизации и блокировки.

Снижение потерь мощности в тяговой сети. В [12, 13] указаны возможности снижения активных потерь мощности с помощью установок компенсации реактивной мощности на ПС. Нерегулируемые установки снижают потери мощности в тяговой сети на 12,8–13,4 % при их мощности, равной половине потребляемой реактивной мощности электроподвижного состава в межподстанционной зоне, а собственные потери (в конденсаторах и реакторе) в установке не превышают в среднем 15 кВт. Плавно регулируемые установки (например, СГРМ) снижают потери на 15,5–21 %, но собственные потери в соответствии с инструкцией составляют 45 кВт. Поэтому такое снижение потерь для СГРМ теоретически возможно при настройке автоматики на полную компенсацию реактивной мощности в тяговой сети. К сожалению, существующая автоматика настроена только на стабилизацию повышенного напряжения в тяговой сети.

С учетом периодической перекомпенсации реактивной мощности работа регулируемой компенсации СГРМ малоэффективна в снижении потерь активной мощности. В инструкции по эксплуатации СГРМ предлагается учесть снижение потерь мощности в тяговой сети на 0,1 % от средней мощности тяговой нагрузки межподстанционной зоны. Однако, как показала практика работы СГРМ, постоянная перекомпенсация реактивной мощности и пониженные значения коэффициента реактивной мощности на смежных тяговых подстанциях не дают основания учитывать указанное уменьшение потерь мощности.

У переключаемой ФКУ, учитывая одноступенчатый характер регулирования, снижение потерь мощности будет составлять 14–14,5 %. Кроме того, у переключаемой ФКУ, исходя из опыта ее применения на Горьковской железной дороге, не отмечены режимы перекомпенсации, и поэтому есть все основания учесть снижение потерь мощности. Учитывая вышеизложенное, можно сделать вывод об отсутствии преимуществ

СГРМ в снижении потерь мощности перед переключаемой ФКУ.

Применение установки компенсации в схеме штатного раздела по контактной сети переменного тока. На Горьковской железной дороге, как и на других железных дорогах, примерно для 7–10 % межподстанционных зон требуется раздел питания по контактной сети из-за больших перепадов мощности между подстанциями при их параллельной работе, что ведет к значительным потерям электроэнергии. Обычно такой раздел осуществляют у ПС с введением нейтральной вставки в контактной сети систем 25 и 2×25 кВ. Практика показала, что введение еще одной нейтральной вставки у ПС, как правило, приводит к снижению скорости движения при ее проходе, поэтому на Горьковской железной дороге для раздела контактной сети между двумя подстанциями при стыковании двух энергосистем решили ограничиться нейтральной вставкой у тяговой подстанции [10], а два фидера контактной сети у подстанции оставить в отключенном состоянии, т. е. перешли на консольное питание тяговой сети (рис. 7), для нормализации напряжения включили регулирующую переключаемую ФКУ (рис. 7, поз. 1) через пункт параллельного соединения 2. Такая схема питания успешно работает более семи лет в системе энергоснабжения 2×25 кВ, обеспечивая повышенную пропускную способность участка Сергач–Шумерля. Таким образом, это еще один пример положительного использования установки компенсации реактивной мощности.

Экспресс-метод расчета эффекта от увеличения пропускной способности межподстанционной зоны. Расчет проведем по формуле

$$\Delta \Delta = \Delta t T_{\text{год}} m C / 60, \text{ руб.}, \quad (2)$$

где Δt — разность времени хода тяжеловесных поездов с ФКУ и без ФКУ в мин, или $\Delta t / 60$, ч; $T_{\text{год}}$ — число суток в году (365); m — число тяжеловесных поездов в сутки; C — затраты на пропуск тяжеловесного поезда, руб./поездо-ч.

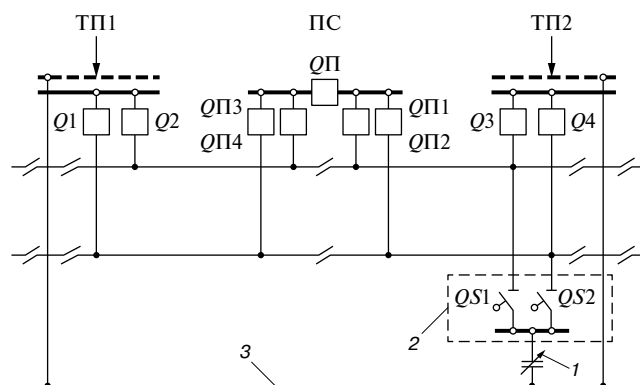


Рис. 7. Схема установки компенсации реактивной мощности для обеспечения раздела питания по контактной сети: 1 — регулируемая переключаемая ФКУ; 2 — пункт параллельного соединения; 3 — контактная сеть; ТП1, ТП2 — тяговые подстанции; QP1...QP4 — выключатели ПС; Q1...Q4 — выключатели тяговых подстанций; QS1...QS2 — управляемые разъединители

Fig. 7. Scheme of reactive power compensation installation to ensure the power supply section over the catenary network: 1 — adjustable switchable FCI; 2 — point of parallel connection; 3 — contact network; ТП1, ТП2 — traction substations; QP1...QP4 — SP switches; Q1...Q4 — traction substation switches; QS1...QS2 — operable disconnectors

Расчет выполняется в следующей последовательности:

1. Вычисляется время хода тяжеловесного поезда по межподстанционной зоне до (t_1) и после (t_2) включения ФКУ. Рассчитывается разность времени $\Delta t = (t_1 - t_2) / 60$, ч.

2. Определяются затраты на пропуск тяжеловесного поезда в соответствии с [14]. Стоимость 1 поездоч в грузовом движении (электротяга) для Горьковской железной дороги (для оценки изменения скорости движения) составляет 8441,35 руб.

3. Выполняется расчет экономии денежных средств в связи с уменьшением времени хода тяжеловесного поезда по рассматриваемой межподстанционной зоне: если $\Delta t / 60 = 5 / 60$ ч, $m = 20$, $C = 8441,35$ руб./поездо-ч, то эффект от повышения пропускной способности составит $\Delta \Delta = 3$ млн руб. Если в расчетах ограничиться эффектом только по пропускной способности $\Delta \Delta$, то простой срок окупаемости для переключаемой ФКУ (ПФКУ) $T_{ок} = K_{ПФКУ} / \Delta \Delta$ при стоимости ПФКУ мощностью 10 Мвар 18–20 млн руб. составит 6–6,6 лет. Для СГРМ срок окупаемости значительно больше, так как стоимость СГРМ мощностью 10 Мвар — 150 млн руб.

Выводы. 1. По техническим характеристикам переключаемая ФКУ с тиристорным ключом не уступает СГРМ в части повышения пропускной способности, а по некоторым показателям превосходит его. В целом по сроку окупаемости переключаемая ФКУ превосходит СГРМ в связи с высокой себестоимостью последнего.

2. Предлагается уменьшить мощность СГРМ путем замены части ее генерируемой реактивной мощности установкой традиционной нерегулируемой компенсации, включенной параллельно с СГРМ, при этом регулирование нерегулируемой установки осуществлять с помощью СГРМ в режиме генерации индуктивной мощности.

3. В связи с высокой себестоимостью СГРМ предлагаются следующие варианты использования рассматриваемых установок. При необходимой мощности установок поперечной емкостной компенсации до 5–6 Мвар, рассчитанной для повышения пропускной способности, следует применять переключаемые ФКУ. С учетом реальных нагрузок такое решение будет реализовано на большинстве отечественных ПС, т. е. будет осуществлено массовое решение. Для мощности установок более 5–6 Мвар следует рассмотреть вариант включения СГРМ пониженной мощности: при больших нагрузках его эффективность увеличится.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Инструкция по расчету наличной пропускной способности железных дорог: утв. Министерством путей сообщения СССР 24.04.1989. М.: Транспорт, 1991. 302 с.
2. Герман Л.А., Серебряков А.С. Регулируемые установочной емкостной компенсации в системах тягового электроснабжения железных дорог: учеб. пособие. М.: ФГБУ ДПО «УМЦ ЖДТ», 2015. 316 с.
3. Герман Л.А. Эффективность регулируемых малоступенчатых фильтрокомпенсирующих установок в тяговой сети переменного тока // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2018. Т. 77. № 5. С. 288–294. DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2018-77-5-288-294>.
4. Гапанович В.А. Результаты внедрения научно-технических работ и задачи на 2017 год // Железнодорожный транспорт. 2017. № 2. С. 24–28.
5. Устройство переключаемой однофазной поперечной емкостной компенсации в тяговой сети переменного тока: пат. 2475912 Рос. Федерация: МПК H02N 3/00 / А.С. Серебряков [и др.]. № 2011108818/07; заявл. 09.03.2011; опубл. 20.02.2013, Бюл. № 5.
6. Переключаемая фильтрокомпенсирующая установка: пат. 2733071 Рос. Федерация: МПК H01N 83/00 / А.С. Серебряков [и др.]. № 2020110769; заявл. 13.03.2020; опубл. 29.09.2020, Бюл. № 28.
7. Переключаемая фильтрокомпенсирующая установка: пат. 2710022 Рос. Федерация: МПК H02J 3/16 / А.С. Серебряков [и др.]. № 2019108108; заявл. 21.03.2019; опубл. 24.12.2019, Бюл. № 36.
8. Трехступенчатая фильтрокомпенсирующая установка тяговой сети переменного тока: пат. 2704023 Рос. Федерация: МПК H02N 7/16 / А.С. Серебряков [и др.]. № 2019108106; заявл. 21.03.2019; опубл. 23.10.2019, Бюл. № 30.
9. Переключаемая фильтрокомпенсирующая установка: пат. 2739329 Рос. Федерация: МПК H02J 3/18 / А.С. Серебряков [и др.]. № 2020126267; заявл. 06.08.2020; опубл. 22.12.2020, Бюл. № 36.
10. Герман Л.А., Субханвердиев К.С., Герман В.Л. Автоматизация электроснабжения тяговой сети переменного тока. Ч. 2. Режимная автоматика / Самарский гос. ун-т путей сообщения в г. Нижний Новгород. Нижний Новгород, 2020. 192 с.
11. Каялов Г.М., Ковалев И.Н. Расчет компенсации реактивных нагрузок регулируемыми конденсаторными батареями // Электричество. 1971. № 8. С. 19–25.
12. Герман Л.А., Серебряков А.С. Снижение потерь электроэнергии при помощи установок компенсации реактивной мощности на посту секционирования тяговой сети переменного тока // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2019. Т. 78. № 5. С. 297–302. DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2019-78-5-297-302>.
13. Герман Л.А. Уменьшение потерь электроэнергии установками поперечной емкостной компенсации в тяговой сети // Труды МИИТ. М.: Транспорт, 1976. № 302. С. 69–82.
14. Об утверждении расходных ставок и оценочных уровней затрат для экономических задач: распоряжение ст. вице-президента ОАО «РЖД» В.В. Михайлова от 7 апреля 2017 г. № 675р.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

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

Статья поступила в редакцию 21.01.2021 г., принята к публикации 15.02.2021 г.

Для цитирования: Герман Л.А. Повышение пропускной способности железной дороги с установкой компенсации реактивной мощности // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2021. Т. 80. № 1. С. 35–44. DOI: <https://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-1-35-44>.

Increasing railway capacity with the installation of reactive power compensation

L. A. GERMAN

Branch of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Samara State University of Railways" in Nizhny Novgorod (Branch of FGBOU VO "SamGUPS" in Nizhny Novgorod), Nizhny Novgorod, 603011, Russia

Abstract. The article considers existing regulated installations of transverse capacitive compensation for increasing the capacity of sections of the traction network of 25 and 2x25 kV of Russian railways. Characteristics of a static reactive power generator based on bipolar IGBT transistors (manufactured by LLC NPP "RU-Engineering", Naberezhnye Chelny), a switchable filter-compensating unit (manufactured by the Gorkovskaya Railway and the Nizhny Novgorod branch of SamGUPS), a three-stage switchable filter-compensating unit. To increase the capacity, all installations are switched on at the traction network sectioning posts. Long-term operation of the static reactive power generator and switchable filter-compensating unit have proven their operational efficiency. At the same time, the following upgrades are proposed: in a static reactive power generator it is proposed to reduce the installed power, replacing it with unregulated compensation, and in a switchable filter-compensating installation, it is proposed to switch in 400–500 V steps to normalize the traction mode of the electric rolling stock.

It is shown that in terms of technical characteristics, a switchable filter-compensating installation with a thyristor switch is not inferior to a static generator of reactive power in terms of increasing the capacity, and in some respects it surpasses it. On the whole, in terms of payback period, a switchable filter-compensating installation surpasses a static generator of reactive power due to the high cost of the latter. The following options for using the considered installations are proposed. With the required power of transverse capacitive compensation units up to 5–6 MVar, to increase the capacity, switchable filter-compensating units should be installed. Taking into account real loads, such a solution will be implemented at most sectioning posts. For installations with a capacity of more than 5–6 MVar, the option of using a static reactive power generator of reduced power should be considered: at high loads, its efficiency will increase.

Keywords: power supply system; transverse capacitive compensation; adjustable installations; capacity; static generator of reactive power; switchable filter-compensating installation; economic efficiency

DOI: <https://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-1-35-44>

REFERENCES

1. *Instructions for calculating the available capacity of railways.* Approved by the Ministry of Railways of the USSR dated April 24, 1989. Moscow, Transport Publ., 1991, 302 p. (in Russ.).
2. German L. A., Serebryakov A. S. *Reguliruemye ustanovki emkostnoy kompensatsii v sistemakh tyagovogo elektroobrazovaniya zheleznikh dorog. Ucheb. posobie* [Adjustable capacitive compensation installations in traction power supply systems of railways. Tutorial]. Moscow, FGBU DPO "UMTs ZhDT" Publ., 2015, 316 p.
3. German L. A. *Effektivnost' reguliruemyykh malostupenchatykh fil'trokompensiruyushchikh ustanovok v tyagovoy seti peremennogo toka* [Efficiency of adjustable few-stage filter compensating installations in AC traction network]. Vestnik VNIIZhT [Vestnik of the Railway Research Institute], 2018, Vol. 77, no. 5, pp. 288–294. DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2018-77-5-288-294>.

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

4. Gapanovich V. A. *Rezultaty vnedreniya nauchno-tekhnicheskikh rabot i zadachi na 2017 god* [Results of implementation of scientific and technical works and tasks for 2017]. Zheleznodorozhnyy transport, 2017, no. 2, pp. 24–28.

5. Dulepov D. E., German L. A., Serebryakov A. S., Semenov D. A. *Device for switchable single-phase transverse capacitive compensation in AC traction network.* Patent no. 2475912; publ. February 20, 2013, Bull. no. 5 (in Russ.).

6. Dulepov D. E., German L. A., Serebryakov A. S., Osokin A. S. *Switchable filter-compensating installation.* Patent no. 2733071; publ. September 29, 2020, Bull. no. 28 (in Russ.).

7. German L. A., Serebryakov A. S., Osokin A. S. *Switchable filter-compensating installation.* Patent no. 2710022; publ. December 24, 2019, Bull. no. 36 (in Russ.).

8. German L. A., Serebryakov A. S., Osokin A. S., Dmitrieva N. Yu. *Three-stage filter-compensating installation of the AC traction network.* Patent no. 2704023; publ. October 23, 2019, Bull. no. 30 (in Russ.).

9. Dulepov D. E., German L. A., Serebryakov A. S., Osokin A. S., Saevich V. L. *Switchable filter-compensating installation.* Patent no. 2739329; publ. December 22, 2020, Bull. no. 36 (in Russ.).

10. German L. A., Subkhanverdiev K. S., German V. L. *Avtomatizatsiya elektroobrazovaniya tyagovoy seti peremennogo toka. Ch. 2. Rezhimnaya avtomatika* [Automation of AC power supply. Part 2. Regime automation]. Nizhniy Novgorod, Samarskiy gos. un-t putey soobshcheniya v g. Nizhniy Novgorod [Samara State Transport University in the city of Nizhny Novgorod] Publ., 2020, 192 p.

11. Kayalov G. M., Kovalev I. N. *Raschet kompensatsii reaktivnykh nagruzok reguliruemymi kondensatornymi batareyami* [Calculation of compensation of reactive loads with adjustable capacitor batteries]. Elektrichestvo, 1971, no. 8, pp. 19–25.

12. German L. A., Serebryakov A. S. *Snizhenie poter' elektroenergii pri pomoshchi ustanovok kompensatsii reaktivnoy moshchnosti na postu sektionirovaniya tyagovoy seti peremennogo toka* [Reduction of electric power losses by the reactive power compensation unit at the point of AC electric traction network sectioning]. Vestnik VNIIZhT [Vestnik of the Railway Research Institute], 2019, Vol. 78, no. 5, pp. 297–302. DOI: <http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2019-78-5-297-302>.

13. German L. A. *Reducing power losses by installations of transverse capacitive compensation in a traction network.* Proceedings of the MIIT. Moscow, Transport Publ., 1976, no. 302, pp. 69–82.

14. *On the approval of expenditure rates and estimated cost levels for economic tasks.* Order of V. V. Mikhailov, Senior Vice-President of the JSC "Russian Railways" dated April 7, 2017 No. 675r (in Russ.).

ABOUT THE AUTHOR

Leonid A. GERMAN,

Dr. Sci. (Eng.), Professor, Branch of FGBOU VO "SamGUPS" in Nizhny Novgorod

Received 21.01.2021

Accepted 15.02.2021

For citation: German L. A. Increasing railway capacity with the installation of reactive power compensation // VNIIZHT Scientific Journal. 2021. 80 (1): 35–44 (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-1-35-44>.

О регрессионном подходе к прогнозированию пассажирского спроса на железнодорожном транспорте

Г. Л. ВЕНЕДИКТОВ, В. М. КОЧЕТКОВ

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

Аннотация. В связи с тем, что автокорреляция временных рядов пассажирского спроса в обычных условиях является, как правило, практически непроявленной, традиционные методы прогнозирования, основанные на учете автокорреляционных зависимостей, оказываются недостаточно эффективными. В статье предлагается непосредственный учет основного фактора, влияющего на точность прогнозирования, а именно фактора сезонной неоднородности спроса. Этот учет производится на основе полиномиальной регрессии для временной зависимости спроса. На конкретном расчетном примере демонстрируются сравнительные преимущества такого подхода к оценке прогноза спроса на железнодорожном транспорте.

Регрессионный подход применяется к недельно-усредненным показателям спроса для временной области, где эти показатели считаются известными по истории продаж. При наличии в зоне прогноза недельной неоднородности спроса предлагается алгоритм восстановления такой неоднородности по исходным данным.

Точность прогноза на основе предлагаемого метода сравнивается с результатами, достигаемыми на базе модели ARIMA, обнаруживающей, согласно проведенным предварительным оценкам, достаточно высокие точностные параметры. На расчетных примерах показано, что для рядов спроса, которые могут считаться характерными для сферы пассажирского сообщения, регрессионный подход дает точность прогноза более высокую, чем модель ARIMA. Рассмотрены причины, в силу которых для типичных рядов пассажирского спроса регрессионный подход может рассматриваться как более перспективный, чем методы, включающие учет автокорреляционности.

Ключевые слова: пассажирские перевозки; прогноз пассажирского спроса; авторегрессия; ARIMA; полиномиальная регрессия; автокорреляция; сезонная неоднородность спроса

Введение. Эффективность функционирования пассажирского железнодорожного комплекса зависит как от ценовой политики, направленной на увеличение доходности, так и от управления подвижным составом с целью минимизации расходов [1]. Для решения обеих задач применяются автоматизированные системы на базе экономико-математического моделирования спроса на перевозки [2–4].

При совокупном учете доходов и расходов наибольший экономический эффект достигается, если соответствующие оптимальные схемы поездов формируются отдельно для каждого рейса. Отметим, что подобный

подход требует наличия детализированных прогнозных данных о пассажирском спросе на требуемые даты.

Следует также отметить, что обеспечение качественного детализированного прогнозирования составляет сложную задачу, поскольку посуточные временные ряды спроса обладают высокой дисперсией и помимо этого, как правило, обнаруживают наличие сезонной и недельной неоднородности. Под детализированностью прогноза будем понимать характеристику подробности прогноза — посуточный или порейсовый, понедельный, помесечный, для отдельного поезда, групп поездов, классов вагонов и т. п. Большая часть известных в настоящее время моделей прогнозирования временных рядов [2, 5–8] обеспечивает требуемую точность лишь при достаточно проявленной автокорреляции элементов рядов. В то же время, если исключить сезонную неоднородность спроса, то для пассажирского спроса на железнодорожном транспорте автокорреляция для посуточных и понедельных данных практически не обнаруживается, что приводит к заметному ухудшению точности прогнозов.

Вышеизложенное делает актуальным поиск моделей прогноза, не ориентированных на использование автокорреляционных свойств рядов спроса, однако полностью учитывающих факторы как сезонной, так и недельной неоднородности. Именно эту задачу ставили перед собой авторы настоящей статьи.

Отметим, что в опубликованных ранее работах [3, 8] рассмотрены экономико-математические модели пассажирского спроса и подходы к прогнозированию, позволяющие учитывать влияние многих факторов, в том числе со стороны конкурентной и макроэкономической среды, на точность прогнозов. Эти подходы легко переносятся на случай построения прогноза методом полиномиальной регрессии.

Общая характеристика трудностей прогнозирования пассажирского спроса. При прогнозировании пассажирского спроса используются следующие термины:

- величина спроса — количество пассажиров, следующих в вагонах определенного класса поезда в конкретный день на выбранном участке линии;

• опорный период — временной интервал, показатели спроса для которого используются при построении прогноза на последующий период;

• глубина прогноза — отрезок времени, для которого рассчитывается прогноз спроса (обычно начальная дата глубины прогноза примыкает к концу опорного периода).

Сложность достижения высокой точности прогноза пассажирского спроса на железнодорожном транспорте вызывается следующими причинами:

- наличием сезонной неоднородности спроса;
- проявляемой во многих случаях недельной неоднородностью;
- отсутствием заметной автокорреляции как для посуточных, так и усредненных (например, недельных) показателей спроса;
- высокой дисперсией распределения и выраженной гетероскедастичностью.

Далее при рассмотрении реальных задач, связанных с оценкой достижимой точности прогноза спроса, используются данные по истории продаж для фирменного поезда № 17 «Карелия», курсирующего на линии Петрозаводск—Москва. Этот поезд был выбран в связи с тем, что временная динамика пассажирского спроса для него может считаться типичной и свойственной значительному числу пассажирских поездов на других направлениях движения.

В качестве примера, иллюстрирующего действие отмеченных выше причин, осложняющих расчет прогноза, рассмотрим временной ряд спроса для класса купейных вагонов поезда № 17 за 2018 г. На рис. 1 показана динамика посуточного пассажирского спроса для этого поезда.

Штриховой линией на рис. 1 показан усредненный спрос, найденный как линия полиномиальной регрессии шестого порядка.

Из рис. 1 видно, что полный временной интервал включает зону повышенного спроса — это середина года, когда средний спрос может более чем вдвое превышать спрос на начальных и конечных временных отрезках года. При этом коэффициент вариации (относительное стандартное отклонение) [9–11], рассчитываемый для отдельных месяцев года, может достигать величины 0,5–0,6.

Еще более важным для оценки прогноза спроса является другой показатель — характеристика автокорреляции после выполнения компенсации сезонной неравномерности спроса. Выполненные для всех месяцев года оценки на основе Q-теста Льюнга—Бокса [12] показывают отсутствие автокорреляции между показателями спроса при уровне доверия не ниже 99 % и числе лагов (шагов) от одного до трех.

Высокий коэффициент вариации и отсутствие автокорреляции являются главными причинами,

устанавливающими независимо от расчетной модели определенные ограничения точности прогноза. Поэтому задача может состоять лишь в поиске таких расчетных моделей, которые обеспечивают точность прогноза возможно ближе к установленным ограничениям.

Поскольку в масштабе года или тем более нескольких лет средний пассажирский спрос обнаруживает заметные и непредсказуемые девиации, то в этих условиях применительно к различным расчетным моделям достижимую точность прогноза приходится оценивать апостериорно — моделируя прогнозный расчет для таких временных зон, где реальный спрос уже известен по истории продаж. Таким способом удастся найти расчетные модели, которые при определенных характеристиках временных рядов спроса обеспечивают наиболее высокую точность прогноза.

Принципы построения регрессионной модели прогнозирования спроса. На практике, как было отмечено, суточная и понедельная автокорреляция спроса практически отсутствуют, поэтому основная информация, которая должна использоваться при построении прогноза, содержится лишь в данных, описывающих сезонную неравномерность за один год или несколько лет, предшествующих рассчитываемому прогнозному периоду. Это обстоятельство заметно снижает, например, ценность модели ARIMA (autoregressive integrated moving average — интегрированная модель авторегрессии — скользящего среднего, или модель Бокса—Дженкинса), ориентированной прежде всего на учет автокорреляции значений временного ряда или остатков соответствующей авторегрессионной модели.

Непосредственный учет сезонности, как подтвердили расчеты, наиболее целесообразно выполнять на основе прямых методов — прежде всего метода полиномиальной регрессии, применяемого для отдельных годов опорной зоны.

В связи с тем, что для суточного спроса, как видно из рис. 1, характерен весьма высокий уровень дисперсии, целесообразно выполнить его усреднение в рамках недельных интервалов. С целью получения детализированного прогноза недельная неоднородность может быть восстановлена специальными мерами после выполнения прогнозного расчета для недельно-усредненных данных. Соответствующий алгоритм описывается далее в разделе о восстановлении недельной зависимости спроса.

Перечислим последовательные этапы предлагаемого подхода к прогнозированию пассажирского спроса: а) недельное усреднение спроса на протяжении опорного периода; б) выполнение полиномиальной регрессии для недельно-усредненного временного ряда в рамках опорного периода; в) перенос по определенному алгоритму полученных регрессированных значений спроса в зону прогноза.

Указанный перенос значений может выполняться аналитиком в соответствии с ожидаемым долгосрочным трендом изменения спроса. Если имеющееся отличие в среднегодовых данных для отдельных годовых интервалов опорного периода предполагается случайным, то в таком случае целесообразно ориентироваться на средние значения для суточных и недельных показателей по отдельным годам. Если же у аналитика есть основание полагать, что в силу каких-то причин различие в годовых показателях вызвано наметившейся четкой тенденцией роста или спада спроса, то предлагаемая расчетная модель позволяет получить оценку прогноза с учетом линейного или даже квадратичного растущего или падающего тренда. Эти возможности легко реализуются и заложены в структуре соответствующей программы.

После перенесения регрессированных значений спроса в область прогноза выполняется восстановление внутринедельной зависимости спроса, если она оказывается проявленной.

Описанную процедуру назовем регрессионной моделью прогноза пассажирского спроса. Более детальное ее описание и иллюстрация примеров достигаемых прогнозных результатов приводятся ниже.

Следует отметить, что описываемый упрощенный вариант модели прогнозирования не затрагивает учета сторонних факторов, влияющих на пассажирский спрос, — динамики миграционных процессов, изменения стоимости потребительской корзины, влияния конкурентной среды со стороны других перевозчиков (авиация, автобусное сообщение) и т. п. Действие каждого из указанных факторов на пассажирский спрос может учитываться: 1) на основе его прогнозирования с помощью описанного выше регрессионного подхода; 2) на базе учета параметров корреляционных связей между данным фактором и реализуемым пассажирским спросом при определенных временных лагах, выявляемых сравнением соответствующих временных рядов для опорного периода. Авторами настоящей статьи разработана и опробована статистическая модель учета внешних факторов для модели ARIMA [8], которая может быть прямо перенесена на описанную регрессионную модель прогноза.

На рис. 2 показано распределение спроса в пересчете на одни сутки, полученное из понедельного спроса для поезда № 17 в классе купейных вагонов за 2018 г.

При сравнении рис. 1 и 2 можно увидеть степень снижения стохастичности спроса при использовании недельного усреднения. Штриховой линией на рис. 2 отмечена полиномиальная регрессия с показателем полинома, равным 10.

Аналогичные графики значений спроса для 2016 и 2017 гг. показаны соответственно на рис. 3 и 4.

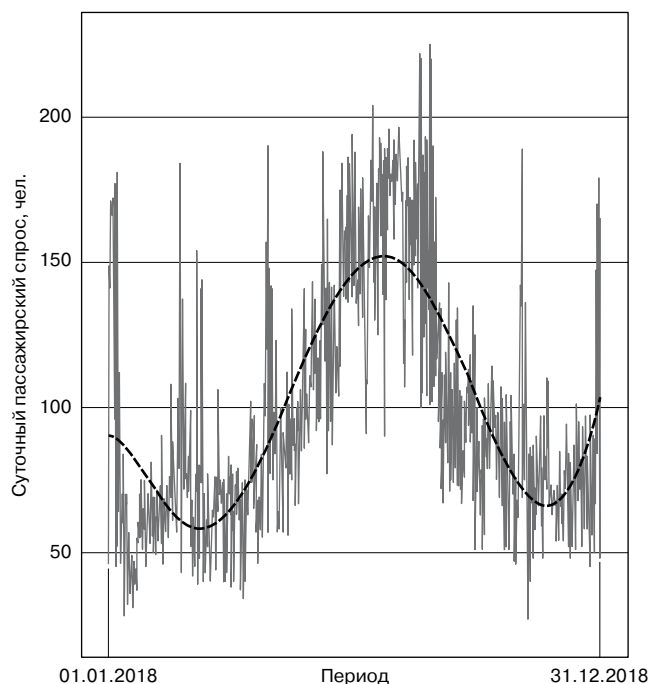


Рис. 1. График спроса для поезда № 17 в классе купейных вагонов за 2018 г. Штриховой линией показан усредненный спрос, найденный как линия полиномиальной регрессии шестого порядка

Fig. 1. Demand schedule for train No. 17 in the class of compartment cars for year 2018. The dashed line shows the average demand calculated as the line of the sixth order polynomial regression

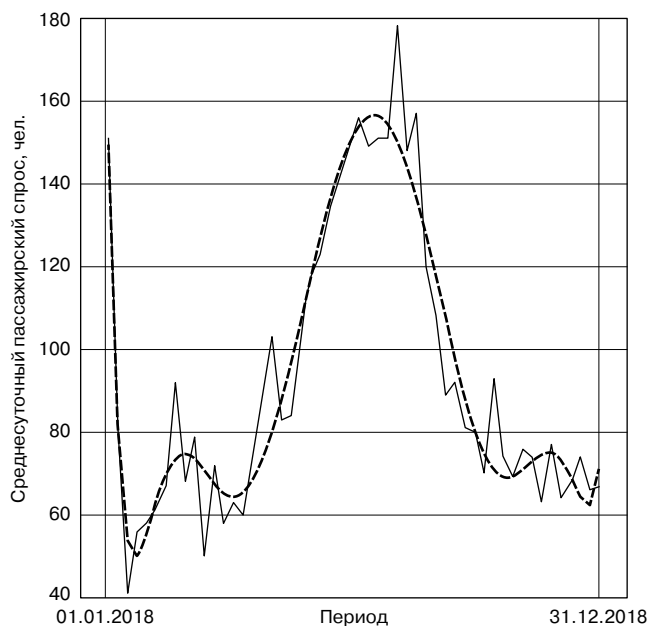


Рис. 2. Среднесуточный спрос для поезда № 17 в классе купейных вагонов за 2018 г. Штриховой линией показан усредненный спрос, найденный как линия полиномиальной регрессии десятого порядка

Fig. 2. Average daily demand for train No. 17 in the class of compartment cars for year 2018. The dashed line shows the average demand calculated as the line of the tenth order polynomial regression

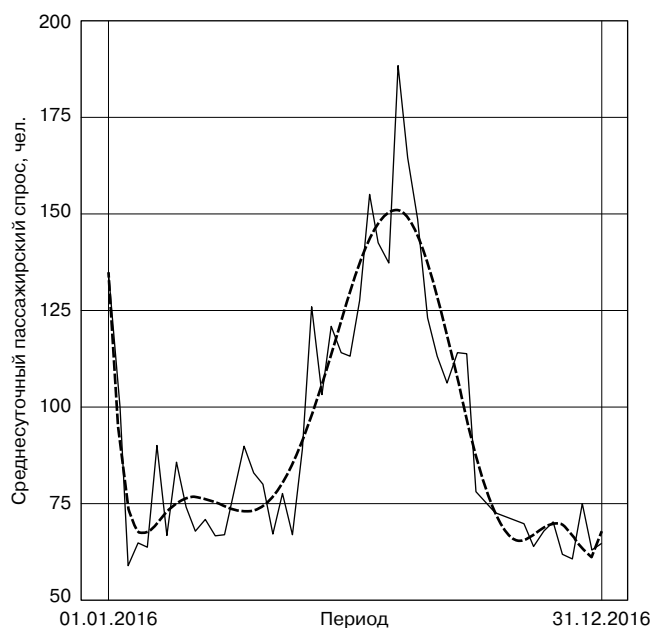


Рис. 3. Среднесуточный спрос для поезда № 17 в классе купейных вагонов за 2016 г. Штриховой линией показан усредненный спрос, найденный как линия полиномиальной регрессии десятого порядка

Fig. 3. Average daily demand for train No. 17 in the class of compartment cars for year 2016. The dashed line shows the average demand is calculated as the line of the tenth order polynomial regression

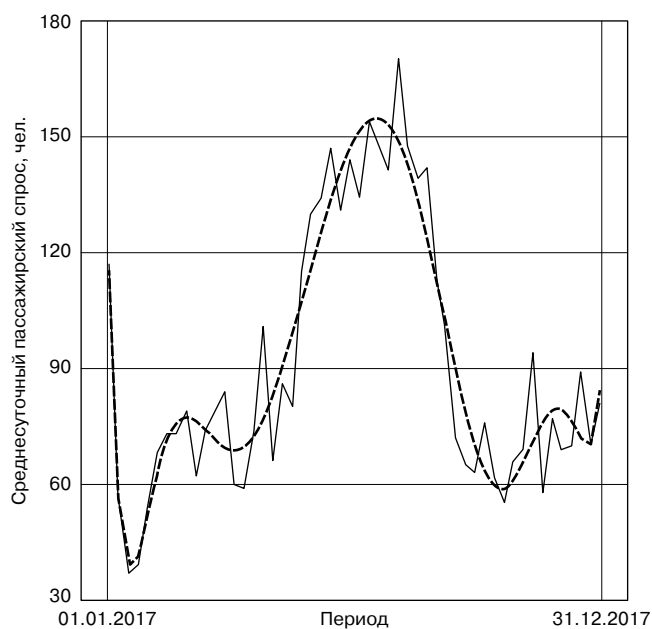


Рис. 4. Среднесуточный спрос для поезда № 17 в классе купейных вагонов за 2017 г. Штриховой линией показан усредненный спрос, найденный как линия полиномиальной регрессии десятого порядка

Fig. 4. Average daily demand for train No. 17 in the class of compartment cars for year 2017. The dashed line shows the average demand is calculated as the line of the tenth order polynomial regression

Рассмотрим более детально последовательность предлагаемого метода прогнозирования. Выполним прогноз спроса для 2018 г. на основе данных опорной зоны, включающей два предыдущих года — 2016-й и 2017-й. Для любой недели с номером j каждого года опорной зоны ($1 \leq j \leq 52$) принимается среднее по обоим годам значение спроса для этой недели, вычисляемое по соответствующим линиям регрессии (эти значения отвечают отсчетам спроса для штриховых линий на рис. 3 и 4). Если нет необходимости учитывать наличие тренда, то полученные для надлежащих значений j эти средние величины переносятся далее для тех же номеров недель в зону глубины прогноза, т. е. на 2018 г., при этом неделя, включающая первые дни марта для високосного года, а также последняя неделя года — восьмидневные. Это позволяет для любого j сохранять внутригодовое положение праздничных и каникулярных дней. Для указанных случаев в расчет вносятся программные поправки.

Безусловно, сравнение точности прогнозирования спроса, получаемой описанным способом, с точностью, обеспечиваемой иными расчетными методами, представляет особый интерес.

Предваряя результаты сравнительных оценок точности прогноза по описанному алгоритму, отметим, что авторами ранее был разработан мультимодельный подход, при котором расчетный прогнозный метод находится программно из определенного количества моделей. На практике в их число входили модель декомпозиции и две модели, учитывающие автокорреляционные связи для элементов временных рядов спроса, — модель Хольта–Винтерса и ARIMA. В отношении модели ARIMA была выполнена ее адаптация, связанная с тем, что на практике автокорреляция показателей спроса практически не проявлена.

При осуществлении упомянутого мультимодельного подхода наиболее подходящая модель выбирается автоматически после оценки параметров временного ряда — относительной амплитуды сезонной неоднородности, дисперсионных показателей и выявленных резких изменений спроса в виде выбросов либо провалов. Такой способ расчета прогноза был реализован в разработанном ранее программном комплексе OPTIMUM-T, являющемся основой автоматизированной системы управления рентабельностью пассажирских перевозок (АСУРПП) [13].

Расчеты, выполненные с использованием АСУРПП для значительного спектра различающихся временных рядов спроса, показали, что модель ARIMA обеспечивает в большинстве случаев наиболее высокую точность. Поэтому результаты расчета по данной модели целесообразно принять за базу для сравнения.

Пример прогноза пассажирского спроса на основе предлагаемой регрессионной модели. Поскольку сезонная неравномерность спроса является определяющим фактором при прогнозировании, целесообразно оценивать отдельно точность прогноза для различных временных отрезков года. С этой целью весь 2018 г., соответствующий полной глубине прогноза, был разделен на 10 временных отрезков, и для любого из этих отрезков точность прогноза определялась независимо. Каждый отрезок имел протяженность в четыре недели и начальные даты соседних отрезков различались на месяц.

В таблице для двух различных расчетных моделей даны усредненные результаты оценки точности недельного прогнозирования в пределах каждого временного отрезка. Для каждого из них приведена средняя абсолютная процентная ошибка прогноза MAPE [14–16].

Для регрессионной модели был использован полином шестой степени.

Анализируя данные таблицы, можно сделать вывод, что усредненное значение ошибки MAPE при однолетней опорной зоне на 13,1 % меньше, чем для модели ARIMA, а при двухлетней — меньше на 24,6 %.

В целом использование регрессионной модели вместо модели ARIMA приводит к росту точности по нескольким причинам. В первую очередь следует отметить, что применение в опорной зоне вместо реальных величин спроса их регрессированных значений уменьшает величину разброса данных в зоне глубины прогноза. При этом в опорной зоне среднеквадратичная разность между исходными и регрессированными величинами имеет наименьшее возможное значение, определяемое степенью регрессионного полинома. Что касается модели ARIMA, то находимое в зоне глубины прогноза среднее значение спроса после цикла конечно-разностного дифференцирования имеет порядок остатка авторегрессионной модели.

Наконец, при реализации конечно-разностного дифференцирования в модели ARIMA требуется, чтобы первый год опорной зоны использовался лишь для задания начальных данных с целью последующего выполнения целочисленного интегрирования для зоны глубины прогноза [6, 8]. Это приводит к тому, что сама опорная зона модели ARIMA фактически укорачивается на один год. Факт такого укорочения можно считать одним из недостатков для моделей с автокорреляцией.

Следует отметить, что для первого временного отрезка (см. таблицу) регрессионный подход дает невысокую точность. Это связано как с низким значением реального спроса, приходящимся на начало года (рис. 1–4), так и с резким его спадом в тот же период. При этом малая величина реального спроса приводит

Прогнозная ошибка MAPE для различных расчетных моделей
Forecast error MAPE for various computational models

Номер временного отрезка	Модель ARIMA, опорный период 2016–2017 гг.	Регрессионная модель, опорные периоды	
		2017 г.	2016–2017 гг.
1	13,78	19,44	15,64
2	26,52	14,01	15,91
3	15,16	15,66	14,24
4	13,64	11,69	12,93
5	8,76	4,88	5,27
6	7,07	7,72	10,06
7	3,27	6,25	4,94
8	13,89	11,10	8,38
9	21,07	19,40	9,74
10	16,21	11,01	7,98
Среднее	13,94	12,12	10,51

к дополнительному росту расчетной ошибки MAPE, так как реальный спрос задается в знаменателе относительной ошибки. В то же время при недостаточно высокой степени регрессионного полинома ухудшается соответствие кривой регрессии реальным данным.

Тем не менее данные, приведенные в таблице, убедительно свидетельствуют о преимуществах в рассмотренном случае регрессионной модели по отношению к модели ARIMA. Эти преимущества вызваны, как отмечено выше, тем, что пассажирский спрос не обнаруживает того уровня автокорреляции, при котором модель ARIMA могла бы выявить присущие ей преимущества.

Отметим, что сходные выводы оказались возможным формулировать также применительно к другим поездкам, в частности к ночным поездкам направления Санкт-Петербург—Москва.

О реализации регрессионного подхода при отсутствии выраженной сезонности. На практике может оказаться, что сезонная зависимость спроса не проявлена. Этот случай реализуется, например, для класса мягких вагонов поезда № 17 за 2018 г. (рис. 5).

Здесь сезонная неоднородность практически отсутствует, а имеющиеся выбросы имеют случайный характер. Эти выбросы по датам не повторяются для других лет и, возможно, вызваны ошибками учета спроса. При прогнозировании спроса подобные выбросы не учитываются, как предложено в [14–16].

Из-за низкого среднего значения спроса и высокой дисперсии по относительной оценке MAPE по недельный прогноз в рассматриваемом случае оказывается менее точным, чем для класса купейных вагонов. Однако и здесь регрессионный подход дает

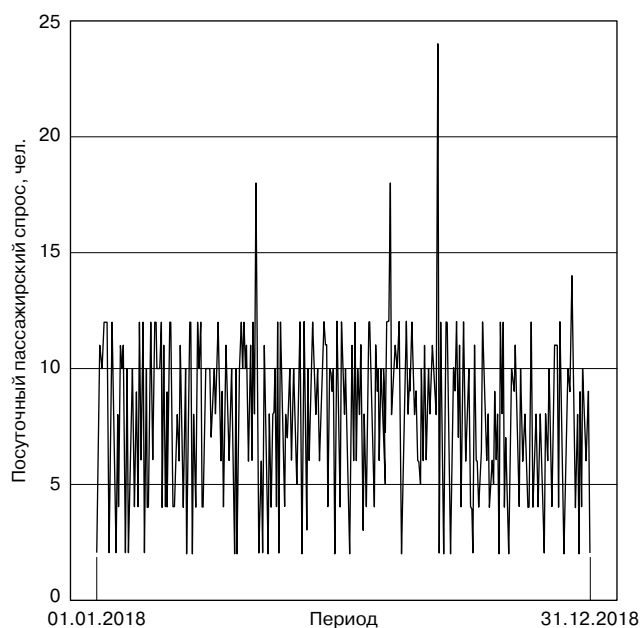


Рис. 5. Посуточный спрос для поезда № 17 в классе мягких вагонов за 2018 г.
Fig. Average daily demand for deluxe sleeping car class of the train No. 17 for year 2018

более качественный прогнозный результат: в среднем по десяти временным отрезкам ошибка MAPE для понедельного прогноза составляет 20,3%, а при регрессионном подходе — 18,5%. Таким образом, и при отсутствии выраженной сезонности регрессионный подход в рассмотренном примере оказывается предпочтительным.

Восстановление недельной зависимости спроса. При необходимости детализации прогноза до суточных значений следует при получении соответствующего результата на базе понедельного прогноза предварительно определить весовые коэффициенты каждого дня недели. Для этого сначала отбираются временные отрезки, для которых распределение спроса по дням недели может считаться достаточно характерным применительно ко всей зоне глубины прогноза или ее фрагментам. Так, например, если прогнозируется спрос для середины года, то целесообразно при оценке весовых коэффициентов не учитывать начало или конец года, а также праздничные дни.

Расчет весовых коэффициентов выполняется в форме оценки отношения среднего спроса для определенного дня недели к среднему полнедельному спросу.

Если выполненные предварительные оценки показывают, что недельная неоднородность спроса не имеет яркой выраженности, то целесообразно использовать статистические критерии, чтобы принять или отклонить гипотезу о равенстве весовых не-

дельных коэффициентов. В случае когда после отбора надлежащих временных отрезков объем выборок оказывается сравнительно невысоким, либо распределение спроса резко отличается от нормального (как, например, на рис. 5), целесообразно использовать непараметрические критерии, в частности ранговый критерий Краскела—Уоллиса [17, 18].

Как показывают расчеты, посуточное прогнозирование спроса дает уровень ошибки MAPE примерно в полтора-два раза более высокий, чем вариант понедельного прогноза при его одинаковой глубине. В соответствии с рис. 1 и 2 такое увеличение ошибки естественно, так как для посуточного распределения спроса во времени коэффициент вариации существенно превосходит его значение для понедельного распределения.

Ряд дополнительных вопросов, касающихся затронутых в статье тем, представлен в зарубежных публикациях [19, 20], однако в них не приводится описание принципов построения алгоритмов, а указываются лишь общие подходы, связанные с задачей прогнозирования пассажирского спроса для железнодорожного транспорта.

Заключение. 1. Детализация прогнозов вплоть до суточных значений является необходимым условием для разработки практических мероприятий по оптимальному управлению подвижным составом в условиях изменяющегося пассажирского спроса.

2. Отсутствие статистически значимой автокорреляции для временных рядов пассажирского спроса, высокий уровень дисперсии и сезонная зависимость востребованности в поездках резко осложняют расчет прогноза пассажирского спроса. Сезонная зависимость и общий тренд спроса, как показали расчеты, являются единственными информационными факторами, составляющими основу для успешного прогнозирования.

3. Мультимодельная система прогнозирования на базе модифицированных моделей экспоненциального сглаживания Хольта—Винтерса, а также авторегрессии и интегрированного скользящего среднего (ARIMA) позволила добиться приемлемых результатов для высокодетализированных прогнозов. Однако перечисленные модели прогноза спроса основаны на учете автокорреляции, и по этой причине в ряде случаев их применение либо не оправдано, либо затруднено.

4. Разработанная регрессионная модель была имплементирована в автоматизированную систему управления рентабельностью пассажирских перевозок, что позволило произвести расчеты на базе реальных данных по эксплуатации поездов и доказать ее эффективность для построения прогноза на основе временных рядов пассажирского спроса при широком наборе их параметров.

5. Выполненные расчеты показали, что усредненное значение ошибки MAPE для регрессионной модели может оказаться ниже примерно на 20 % по сравнению с моделью ARIMA.

6. Создан инструмент формирования прогнозов пассажирского спроса с высоким уровнем детализации, что позволяет эффективно применять экономико-математическое моделирование для управления подвижным составом как на уровне филиалов Федеральной пассажирской компании, так и на уровне линейных предприятий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ефимов С. М. Методика анализа факторов, определяющих спрос на пассажирские перевозки // Мир транспорта. 2015. Т. 13. № 2. С. 114–120.
2. Talluri K. T., van Ryzin G. J. The Theory and Practice of Revenue Management. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2004. 713 p.
3. Венедиктов Г. Л., Кочетков В. М. Экономические модели повышения доходности при жестком ограничении предложения // Экономика и математические методы. 2012. Т. 48. № 1. С. 111–118.
4. Реализация экономико-математических моделей в автоматизированных системах управления рентабельностью пассажирских перевозок / О. Ф. Мирошниченко [и др.] // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2011. № 4. С. 33–39.
5. Box G., Jenkins G. Time Series Analysis, Forecasting and Control. San Francisco: Holden Day, 1970. 365 p.
6. Brockwell P. J., Davis R. A. Introduction to Time Series and Forecasting. New York: Springer, 2002. 434 p.
7. Канторович Г. Г. Анализ временных рядов // Экономический журнал ВШЭ. 2002. № 2. С. 251–269.
8. Венедиктов Г. Л., Кочетков В. М. Эффективные методы прогнозирования пассажирского спроса на железнодорожном транспорте // Экономика железных дорог. 2016. № 6. С. 36–45.

9. Айвазян С. А., Мхитарян В. С. Прикладная статистика и основы эконометрики. М.: Юнити, 1998. 1006 с.
10. Айвазян С. А. Основы эконометрики: учеб. для студентов экон. специальностей вузов. В 2 т. Т. 2. М.: Юнити, 2001. 432 с.
11. Орлов А. И. Эконометрика. М.: Экзамен, 2002. 575 с.
12. Diebold F. X. Elements of Forecasting. [S. l.]: South-Western College Pub, 2007. P. 129–384.
13. Автоматизированная система управления рентабельностью пассажирских перевозок на железнодорожном транспорте: пат. 112465 Российская Федерация: МПК G06F 17/00 / Г. Л. Венедиктов, В. М. Кочетков. № 2011133550/08; заявл. 11.08.2011; опубл. 10.01.2012, Бюл. № 1.
14. Четыркин Е. М. Статистические методы прогнозирования. М.: Статистика, 1977. 329 с.
15. Точность и достоверность прогнозов [Электронный ресурс]. URL: <http://poisk-ru.ru/s24541t2.html> (дата обращения: 06.02.2020 г.).
16. Оценка точности и надежности прогнозов [Электронный ресурс]. URL: <https://studfiles.net/preview/3490105/page:44> (дата обращения: 06.02.2020 г.).
17. Кобзарь А. И. Прикладная математическая статистика. М.: Физматлит, 2006. С. 466–468.
18. Ликеш И., Ляга Й. Основные таблицы математической статистики. М.: Финансы и статистика, 1985. 489 с.
19. Helve V. Demand Forecasting in a Railway Revenue Management System. Helsinki: Aalto University School of Business, 2015. 82 p.
20. Milenkovic M., Bojovic N. Railway Demand Forecasting // Handbook of Research on Emerging Innovations in Rail Transportation. [S. l.]: IGI Global, 2016. June issue. P. 100–129. DOI: 10.4018/978-1-5225-0084-1.ch005.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

ВЕНЕДИКТОВ Геннадий Львович,

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

КОЧЕТКОВ Валерий Михайлович,

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

Статья поступила в редакцию 06.08.2020 г., принята к публикации 01.12.2020 г.

Для цитирования: Венедиктов Г. Л., Кочетков В. М. О регрессионном подходе к прогнозированию пассажирского спроса на железнодорожном транспорте // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2021. Т. 80. № 1. С. 45–52. DOI: <https://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-1-45-52>.

On regression approach to forecasting passenger demand in railway transport

G. L. VENEDIKTOV, V. M. KOCHETKOV

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

Abstract. Due to the fact that the autocorrelation of time series of passenger demand under normal conditions is, as a rule, practically undeveloped, traditional forecasting methods based on taking into account autocorrelation dependences are not effective enough. The article proposes a direct accounting of the main factor affecting the accuracy of forecasting, namely the factor of seasonal heterogeneity of demand. This accounting is made on the basis of polynomial regression for the time dependence of demand. A specific design example demonstrates the comparative advantages of this approach to assessing the forecast of demand for rail transport.

The regression approach is applied to the weekly averaged demand metrics for the time domain, where these metrics are considered known from the sales history. If there is a weekly demand heterogeneity in the forecast zone, an algorithm is proposed to restore such heterogeneity from the initial data.

The forecast accuracy based on the proposed method is compared with the results achieved on the basis of the ARIMA model, which reveals, according to preliminary estimates, fairly high accuracy parameters. It is shown on the calculated examples that for the series of demand, which can be considered typical for the sphere

of passenger traffic, the regression approach gives the forecast accuracy higher than the ARIMA model. The reasons are considered, due to which, for typical series of passenger demand, the regression approach can be considered as more promising than methods that include taking into account autocorrelation.

Keywords: passenger transportation; passenger demand forecast; autoregression; ARIMA; polynomial regression; autocorrelation; seasonal variability in demand

DOI: <https://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-1-45-52>

REFERENCES

1. Efimov S.M. *Metodika analiza faktorov, opredelyayushchikh spros na passazhirskie perevozki* [Method of analysis of factors that determine the demand for passenger transportation]. World of Transport and Transportation, 2015, Vol. 13, no. 2, pp. 114–120.
2. Talluri K. T., van Ryzin G. J. *The Theory and Practice of Revenue Management*. Boston, Kluwer Academic Publishers, 2004, 713 p.
3. Venediktov G. L., Kochetkov V. M. *Ekonomicheskie modeli povysheniya dokhodnosti pri zhestkom ogranichenii predlozheniya* [Economic models of increasing profitability under severe supply constraints]. Economics and Mathematical Methods, 2012, Vol. 48, no. 1, pp. 111–118.
4. Miroshnichenko O. F., Venediktov G. L., Kochetkov V. M., Pastukhov S. S. *Realizatsiya ekonomiko-matematicheskikh modeley v avtomatizirovannykh sistemakh upravleniya rentabel'nost'yu passazhirskikh perevozok* [Realizing economic and mathematical models at automatized management systems of passenger service profitability]. Vestnik VNIIZhT [Vestnik of the Railway Research Institute], 2011, no. 4, pp. 33–39.
5. Box G., Jenkins G. *Time Series Analysis, Forecasting and Control*. San Francisco, Holden Day Publ., 1970, 365 p.
6. Brockwell P. J., Davis R. A. *Introduction to Time Series and Forecasting*. New York, Springer Publ., 2002, 434 p.
7. Kantorovich G. G. *Analiz vremennykh ryadov* [Analysis of time series]. Higher School of Economics Economic Journal, 2002, no. 2, pp. 251–269.
8. Venediktov G. L., Kochetkov V. M. *Effektivnye metody prognozirovaniya passazhirskogo sprosa na zheleznodorozhnom transporte* [Effective methods of forecasting passenger demand on railway transport]. Railway Economics, 2016, no. 6, pp. 36–45.

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

9. Ayvazyan S. A., Mkhitarian V. S. *Prikladnaya statistika i osnovy ekonometriki* [Applied statistics and foundations of econometrics]. Moscow, Unity Publ., 1998, 1006 p.

10. Ayvazyan S. A. *Osnovy ekonometriki. Ucheb. dlya studentov ekon. spetsial'nostey vuzov. V 2 t. T. 2* [Fundamentals of econometrics. Reference book for students of economic specialties of universities. In 2 volumes. Vol. 2]. Moscow, Unity Publ., 2001, 432 p.

11. Orlov A. I. *Ekonometrika* [Econometrics]. Moscow, Ekzamen Publ., 2002, 575 p.

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

13. Venediktov G. L., Kochetkov V. M. *Automated system for managing the profitability of passenger transportation by rail*. Patent no. 112465; publ. January 10, 2012, Bull. no. 1 (in Russ.).

14. Chetyrkin E. M. *Statisticheskie metody prognozirovaniya* [Statistical forecasting methods]. Moscow, Statistika Publ., 1977, 329 p.

15. *Tochnost' i dostovernost' prognozov* [Accuracy and reliability of forecasts]. URL: <http://poisk-ru.ru/s24541t2.html> (retrieved on 06.02.2020) (in Russ.).

16. *Otsenka tochnosti i nadezhnosti prognozov* [Assessment of the accuracy and reliability of forecasts]. URL: <https://studfiles.net/preview/3490105/page:44> (retrieved on 06.02.2020) (in Russ.).

17. Kobzar' A. I. *Prikladnaya matematicheskaya statistika* [Applied Mathematical Statistics]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2006, pp. 466–468.

18. Likesh I., Lyaga Y. *Osnovnye tablitsy matematicheskoy statistiki* [Basic tables of mathematical statistics]. Moscow, Finansy i statistika [Finance and Statistics] Publ., 1985, 489 p.

19. Helve V. *Demand Forecasting in a Railway Revenue Management System*. Helsinki, Aalto University School of Business Publ., 2015, 82 p.

20. Milenkovic M., Bojovic N. *Railway Demand Forecasting*. Handbook of Research on Emerging Innovations in Rail Transportation. [S. l.], IGI Global Publ., 2016, June issue, pp. 100–129. DOI: 10.4018/978-1-5225-0084-1.ch005.

ABOUT THE AUTHORS

Gennadiy L. VENEDIKTOV,
Cand. Sci. (Eng.), General Director, LLC "Ekspress-L"

Valeriy M. KOCHETKOV,
Cand. Sci. (Phys.-Math.), Head of the Project, LLC "Ekspress-L"

Received 06.08.2020

Accepted 01.12.2020

For citation: Venediktov G. L., Kochetkov V. M. On regression approach to forecasting passenger demand in railway transport // VNIIZHT Scientific Journal. 2021. 80 (1): 45–52 (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-1-45-52>.

ВЫШЛИ В СВЕТ ТРУДЫ ВНИИЖТ

Экономические исследования железнодорожного комплекса и их практическое значение / под ред. О. Ф. Мирошнichenko. М.: РАС, 2019. 210 с.

Изложены результаты исследований по актуальным проблемам экономики железнодорожного комплекса: ценообразование на грузовые и пассажирские перевозки, прочие виды деятельности; управление затратами, зависимость их от объема перевозок, формирование удельных оценочных затрат; оценка экономической эффективности технологических решений и инвестиционных железнодорожных про-

ектов; совершенствование системы управления железнодорожным транспортом.

Книга рассчитана на специалистов, занимающихся вопросами экономики железнодорожного транспорта, может быть полезна преподавателям и студентам транспортных вузов.

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

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

Определение предельной численности работников ОАО РЖД, занятых в перевозочной деятельности, при планировании мероприятий программ по повышению производительности труда

Е. Н. ЕФИМОВА, П. А. ШАНЧЕНКО, Е. В. ЕРШОВА

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

Аннотация. Внедрение мероприятий, направленных на повышение производительности труда, должно обеспечить рост эффективности производственных процессов в части затрат, связанных в первую очередь с трудовыми ресурсами. Оптимизация их численности отражается на характеристиках производственного процесса, и прежде всего на его устойчивости. Под устойчивостью подразумевается способность процесса возвращаться в свое первоначальное состояние вопреки действию внешних и внутренних факторов. Устойчивость характеризуется показателями надежности, безопасности и стабильности производственного процесса и определяется комплексным индексным индикатором, включающим в себя перечисленные характеристики. Необоснованная рекомендация и реализация мероприятий по росту производительности труда с высвобождением работников без учета достигнутого уровня устойчивости может привести к снижению эффективности функционирования производства, росту эксплуатационных расходов и нарушению основных производственных процессов. В связи с этим возникает задача определения допустимого резерва высвобождения работников при планировании организационно-управленческих мероприятий с учетом обеспечения устойчивости производственных процессов, связанных с перевозочной деятельностью.

Ключевые слова: производительность труда; мероприятия, обеспечивающие рост производительности труда; устойчивость производственных процессов; характеристики устойчивости; интегральный индексный индикатор устойчивости; матрица состояний устойчивости; коэффициент устойчивости; коэффициент резерва; предельная численность работников

Введение. Повышение производительности труда в части высвобождения численности за счет организационных мероприятий обеспечивает экономию трудозатрат на отдельных рабочих местах, что, в свою очередь, отражается на эксплуатационных, технических и технологических характеристиках всего производственного процесса. Вследствие этого оценка допустимого уровня снижения численности работников при обеспечении устойчивости производственных процессов приобретает актуальное значение.

Мероприятия, обеспечивающие рост производительности труда. Планирование величины производительности труда (далее — Прт) на предстоящий период является основной задачей системы управления трудовыми ресурсами. В Программе среднесрочной перспективы развития ОАО «РЖД» до 2025 года определены нормативы ежегодного прироста этого показателя, которые составляют в среднем 5 %.

Достижение установленного норматива реализуется как за счет прироста объема произведенной продукции (услуг), так и за счет оптимизации численности работников. Компания ОАО «РЖД» относится к группе транспортных систем, обслуживающих производственный комплекс России, поэтому прирост продукции (услуг) ОАО «РЖД» напрямую зависит от прироста произведенной продукции в экономике страны. Вследствие этого элемент модели производительности труда — объем произведенной продукции (услуг) в системе ОАО «РЖД» по своему предназначению не является управляющим и основная нагрузка в части обеспечения установленного прироста показателя Прт приходится на другой элемент модели — затраты трудовых ресурсов, которые определяются среднесписочной численностью работников. В этом случае прирост Прт осуществляется оптимизацией численности за счет внедрения мероприятий, обеспечивающих рост производительности труда.

В настоящее время в ОАО «РЖД» классификация таких мероприятий принята по следующим группам:

- обновление и модернизация производства (группа ОП);
- совершенствование технологических процессов (группа ТП);
- замена устаревших рабочих мест (группа УРМ);
- организационные мероприятия (группа ОМ);
- передача работников на другие источники финансирования (группа ПР).

Особенности перечисленных групп мероприятий. Мероприятия группы ОМ являются по своей сути затратными, поскольку обеспечиваются соответствующим финансированием, определенным Программой инвестиций.

Мероприятия групп ТП, УРМ и ОМ относятся к незатратным и характеризуют такие направления, как укрупнение предприятий, совмещение профессий, пересмотр нормативных документов по труду и т. д.

Мероприятия группы ПР относятся к так называемым управленческим и связаны только с формальной передачей численности работников на другие источники финансирования, включая инвестиции, подсобно-вспомогательную деятельность и т. д.

С учетом перечисленных групп общее количество работников, высвобождаемых за счет реализации мероприятий, обеспечивающих рост производительности труда, составит

$$Ч_0 = Ч_{оп} + Ч_{тп} + Ч_{урм} + Ч_{ом} + Ч_{пр}. \quad (1)$$

В условиях оптимизации инвестиционной программы реализация мероприятий группы ОП затруднена. Для обеспечения планов прироста производительности труда выбираются и планируются мероприятия других групп. Необоснованный выбор таких мероприятий в увязке с ожидаемыми планами высвобождения, например, по группам ТП, УРМ и ОМ может негативно отразиться на качестве и стабильности производственных процессов, особенно связанных с перевозочной деятельностью.

Характеристика устойчивости производственного процесса в системе ОАО «РЖД». Анализ научно-технической литературы, посвященной вопросам устойчивости [1–7], показывает, что в настоящее

время понятие устойчивости применительно к организационным и техническим системам рассматривается с позиций оценки изменения показателей их функционирования. В общем случае устойчивость производственного процесса — это стремление процесса к сохранению равновесного стабильного состояния независимо от влияния внешних и внутренних воздействий. Применительно к системе железнодорожного транспорта определение устойчивости процесса является актуальнейшей задачей, поскольку основной продукцией транспорта являются сами производственные процессы перевозки грузов и пассажиров.

Производственный процесс каждого из подразделений производственного блока ОАО «РЖД» включает в себя совокупность подпроцессов, затраты на выполнение которых отражаются в управленческой отчетности. Устойчивость подпроцессов, а следовательно, и производственного процесса в целом является комплексным показателем, который включает в себя следующие составляющие:

- надежность;
- безопасность;
- стабильность.

Каждая из составляющих отражает определенное свойство производственного процесса и характеризуется соответствующими показателями, представленными на рисунке.

Следует отметить, что показатели составляющих устойчивости отражают эффективность производственных процессов, относящихся к перевозочной деятельности каждого регионального подразделения филиалов производственного блока ОАО «РЖД». Применительно к прочим филиалам, производственная деятельность которых не связана непосредствен-



Схема формирования понятия устойчивости производственного процесса ОАО «РЖД» с учетом ее составляющих
Formation scheme of sustainability concept of production process of the JSC "Russian Railways", taking into account its components

но с перевозочной деятельностью, составляющие устойчивости производственных процессов будут характеризоваться другими показателями.

С точки зрения аналитического представления показатель «устойчивость производственных процессов» представляет собой комплексный индексный индикатор, определяемый по формуле

$$\text{Уст}_i = \sqrt[3]{\text{Бзп}_i \cdot \text{Нд}_i \cdot \text{Стб}_i}, \quad (2)$$

где Бзп_i — комплексный измеритель технологической безопасности i -го производственного процесса; Нд_i — комплексный измеритель надежности i -го производственного процесса; Стб_i — комплексный измеритель стабильности i -го производственного процесса.

В свою очередь, каждый из измерителей представляет собой агрегированную величину, которая должна включать в себя количественный и качественный признак используемого измерителя.

Так, количественная сторона технологической безопасности производственного процесса перевозочной деятельности характеризуется суммарным количеством отказов, произошедших в перевозочном процессе по вине работников конкретного подразделения ОАО «РЖД». В зависимости от степени тяжести отказа, выраженной суммарным временем задержек поездов, отказы разделяются на категории. Суммарное количество отказов определяется как

$$N_{\text{отк } i}^{1\text{к}+2\text{к}} = N_{\text{отк } i}^{1\text{к}} + N_{\text{отк } i}^{2\text{к}}, \quad (3)$$

где $N_{\text{отк } i}^{1\text{к}}$, $N_{\text{отк } i}^{2\text{к}}$ — количество отказов 1-й и 2-й категории соответственно, произошедших в i -ом производственном процессе перевозочной деятельности, ед.

Качественная характеристика измерителя технологической безопасности включает в себя продолжительность отказов.

Этот показатель определяется как

$$T_{\text{отк } i}^{1\text{к}+2\text{к}} = T_{\text{отк } i}^{1\text{к}} + T_{\text{отк } i}^{2\text{к}}, \quad (4)$$

где $T_{\text{отк } i}^{1\text{к}}$, $T_{\text{отк } i}^{2\text{к}}$ — продолжительность отказов 1-й и 2-й категории соответственно, возникших в i -ом производственном процессе перевозочной деятельности, ч.

Поскольку устойчивость производственного процесса характеризует способность процесса стремиться к возврату первоначального состояния, составные элементы устойчивости также должны отражать этот признак.

В этом случае измеритель Бзп_i определяется как

$$\text{Бзп}_i = \sqrt{I(N_{\text{отк } i}^{1\text{к}+2\text{к}}) \cdot I(T_{\text{отк } i}^{1\text{к}+2\text{к}})}, \quad (5)$$

$$I(N_{\text{отк } i}^{1\text{к}+2\text{к}}) = \frac{(N_{\text{отк } i}^{1\text{к}} + N_{\text{отк } i}^{2\text{к}})^t}{(N_{\text{отк } i}^{1\text{к}} + N_{\text{отк } i}^{2\text{к}})^{t-1}}, \quad (5.1)$$

$$I(T_{\text{отк } i}^{1\text{к}+2\text{к}}) = \frac{(T_{\text{отк } i}^{1\text{к}} + T_{\text{отк } i}^{2\text{к}})^t}{(T_{\text{отк } i}^{1\text{к}} + T_{\text{отк } i}^{2\text{к}})^{t-1}}, \quad (5.2)$$

где $I(N_{\text{отк } i}^{1\text{к}+2\text{к}})$ — индекс изменения суммарного количества отказов 1-й и 2-й категории соответственно, произошедших в i -ом производственном процессе; $I(T_{\text{отк } i}^{1\text{к}+2\text{к}})$ — индекс изменения суммарной продолжительности отказов 1-й и 2-й категории соответственно, произошедших в i -ом производственном процессе; $(N_{\text{отк } i}^{1\text{к}} + N_{\text{отк } i}^{2\text{к}})^t$, $(N_{\text{отк } i}^{1\text{к}} + N_{\text{отк } i}^{2\text{к}})^{t-1}$ — суммарное количество отказов 1-й и 2-й категории соответственно, произошедших в i -ом производственном процессе в отчетном периоде t и периоде, предшествующем отчетному $t-1$, ед.; $(T_{\text{отк } i}^{1\text{к}} + T_{\text{отк } i}^{2\text{к}})^t$, $(T_{\text{отк } i}^{1\text{к}} + T_{\text{отк } i}^{2\text{к}})^{t-1}$ — суммарная продолжительность отказов 1-й и 2-й категории соответственно, произошедших в i -ом производственном процессе в отчетном периоде t и периоде, предшествующем отчетному $t-1$, ч.

Совокупный измеритель надежности, характеризующий уровень эксплуатационной надежности подвижного состава и технических средств, может, в свою очередь, быть определен как

$$\text{Нд}_i = \sqrt{I(N_{\text{отк } i}^{3\text{к}}) \cdot I(T_{\text{отк } i}^{3\text{к}})}, \quad (6)$$

$$I(N_{\text{отк } i}^{3\text{к}}) = \frac{N_{\text{отк } i}^{3\text{к } t}}{N_{\text{отк } i}^{3\text{к } t-1}}, \quad (6.1)$$

$$I(T_{\text{отк } i}^{3\text{к}}) = \frac{T_{\text{отк } i}^{3\text{к } t}}{T_{\text{отк } i}^{3\text{к } t-1}}, \quad (6.2)$$

где $I(N_{\text{отк } i}^{3\text{к}})$ — индекс изменения количества отказов 3-й категории, произошедших в i -ом производственном процессе; $I(T_{\text{отк } i}^{3\text{к}})$ — индекс изменения продолжительности отказов 3-й категории, произошедших в i -ом производственном процессе; $N_{\text{отк } i}^{3\text{к } t}$, $N_{\text{отк } i}^{3\text{к } t-1}$ — количество отказов 3-й категории, произошедших в i -ом производственном процессе в отчетном периоде t и периоде, предшествующем отчетному $t-1$, ед.; $T_{\text{отк } i}^{3\text{к } t}$, $T_{\text{отк } i}^{3\text{к } t-1}$ — продолжительность отказов 3-й категории, произошедших в процессе перевозочной деятельности n -го подразделения за отчетный период t и период, предшествующий отчетному $t-1$, ч.

Измеритель Стб_i , характеризующий стабильность производственного процесса, отражает количество технологических нарушений $N_{\text{тх}}$ при его выполнении, однако качественным признаком является не продолжительность технологических нарушений, а общая сумма времени задержек поездов вследствие их возникновения. Это обусловлено тем, что продолжительность задержки, связанная с одним случаем технологического нарушения, является по сравнению со временем одного категорийного отказа ничтожной.

Измеритель $Стб_i$ определяется по формуле

$$Стб_i = \sqrt{I(N_{тхн\ i}^{1к+2к}) \cdot I(T_{зд\ тхн\ i}^{1к+2к})}; \quad (7)$$

$$I(N_{тхн\ i}^{1к+2к}) = \frac{(N_{тхн\ i}^{1к} + N_{тхн\ i}^{2к})^t}{(N_{тхн\ i}^{1к} + N_{тхн\ i}^{2к})^{t-1}}; \quad (7.1)$$

$$I(T_{зд\ тхн\ i}^{1к+2к}) = \frac{(T_{зд\ тхн\ i}^{1к} + T_{зд\ тхн\ i}^{2к})^t}{(T_{зд\ тхн\ i}^{1к} + T_{зд\ тхн\ i}^{2к})^{t-1}}, \quad (7.2)$$

где $I(N_{тхн\ i}^{1к+2к})$ — индекс изменения суммарного количества технологических нарушений 1-й и 2-й категории соответственно, произошедших в i -ом производственном процессе; $I(T_{зд\ тхн\ i}^{1к+2к})$ — индекс изменения суммарной продолжительности задержек всех поездов вследствие технологических нарушений 1-й и 2-й категории соответственно, произошедших в i -ом производственном процессе; $(N_{тхн\ i}^{1к} + N_{тхн\ i}^{2к})^t$, $(N_{тхн\ i}^{1к} + N_{тхн\ i}^{2к})^{t-1}$ — суммарное количество технологических нарушений 1-й и 2-й категории соответственно, произошедших в i -ом производственном процессе за отчетный период t и период, предшествующий отчетному $t-1$, ед.; $(T_{зд\ тхн\ i}^{1к} + T_{зд\ тхн\ i}^{2к})^t$, $(T_{зд\ тхн\ i}^{1к} + T_{зд\ тхн\ i}^{2к})^{t-1}$ — суммарная продолжительность задержек поездов вследствие технологических нарушений 1-й и 2-й категории соответственно, произошедших в i -ом производственном процессе за отчетный период t и период, предшествующий отчетному $t-1$, ч.

Методология определения коэффициента устойчивости. Как отмечалось выше, в условиях специфики работы железнодорожного транспорта управляющим элементом в модели показателя производительности труда является численность работников. Поэтому из всей последовательности этапов, связанных с выбором мероприятий по росту производительности труда, ключевым звеном такой модели является пара «высвобождение работников—устойчивость производственного процесса».

Особенность этого звена заключается в том, что если вектор задающего параметра — численность работников имеет конкретное направление оптимизации, то зависящий от него параметр — устойчивость производственного процесса может увеличиваться или уменьшаться.

Индикатором, характеризующим изменение устойчивости в зависимости от изменения численности работников, является коэффициент устойчивости, который определяется по формуле

$$Ку_{ст\ i} = \frac{I(Чо_i)}{I(Уст_i)}, \quad (8)$$

где $I(Чо_i)$ — индекс общей численности работников, занятых на i -ом производственном процессе, чел.;

$I(Уст_i)$ — индекс устойчивости i -го производственного процесса.

Индекс общей численности работников определяется по формуле

$$I(Чо_i) = \frac{Чо_i^t}{Чо_i^{t-1}}, \quad (9)$$

где $Чо_i^t$, $Чо_i^{t-1}$ — общая численность работников, занятых в производственном процессе в отчетном периоде t и периоде, предшествующем отчетному $t-1$, чел.

Индекс устойчивости производственного процесса определяется по формуле

$$I(Уст_i) = \frac{Уст_i^t}{Уст_i^{t-1}}, \quad (10)$$

где $Уст_i^t$, $Уст_i^{t-1}$ — показатели устойчивости производственного процесса в отчетном периоде t и периоде, предшествующем отчетному $t-1$.

Значение коэффициента устойчивости, близкое или значительно превышающее 1, характеризует производственный процесс как устойчивый, иные значения могут быть сигналом ухудшения устойчивости.

Определение предельной численности. Устойчивость как одна из характеристик производственного процесса имеет свои диапазоны изменения, которые в общем случае можно представить в виде двух пространств с общей границей: хорошо-плохо. В этом случае в зависимости от нахождения показателя устойчивости в каком-либо из пространств можно определить допустимый резерв высвобождения работников. По величине $Ку_{ст\ i}$, а также характеру изменения показателей $I(Чо_i)$ и $I(Уст_i)$ определяется соответствующая характеристика устойчивости производственного процесса в планируемом периоде. Навигатором оценки состояний устойчивости служит матрица состояний устойчивости [8], которая является диагностическим инструментом предварительной оценки уровня устойчивости конкретного производственного процесса. Сформированная для отдельного филиала ОАО «РЖД» матрица состояний устойчивости позволяет выделить те региональные подразделения филиала, для которых в целях обеспечения устойчивости необходим расчет допустимого резерва высвобождения работников.

Для расчета допустимого резерва высвобождения работников определим коэффициент резерва по следующей формуле:

$$Крез = \frac{\Delta Чо_i}{\Delta Уст_i}, \quad (11)$$

где $\Delta Чо_i$ — изменение общей численности работников, занятых в i -ом производственном процессе;

ΔU_{st_i} — изменение устойчивости i -го производственного процесса.

Далее найдем величину допустимого резерва высвобождения работников, занятых на i -ом производственном процессе

$$\Delta \mathcal{C}_i^{t+1} = \mathcal{C}_i' \cdot \text{Крез}, \quad (12)$$

где $\mathcal{C}_i'$ — численность работников, занятых на i -ом производственном процессе в отчетном периоде t , чел.

Рассчитанный таким образом резерв численности является предельно допустимой величиной при выборе мероприятий, обеспечивающих рост производительности труда по группам работ ТП, УРМ, ОМ.

Заключение. 1. По результатам оценки влияния мероприятий программ по повышению производительности труда на устойчивость производственных процессов и расчета допустимого резерва высвобождения работников на предстоящий период по предлагаемому методу каждая региональная дирекция и филиал ОАО «РЖД» в целом могут принимать следующие варианты решения:

- сохранение сформированного перечня мероприятий по росту производительности труда в предстоящем периоде (при обеспечении устойчивости производственных процессов);
- пересмотр планируемых мероприятий в части расширения инвестиционного портфеля, а также выбор среди них приоритетных в части получения синергетического эффекта по росту производительности труда;
- актуализация заданных нормативов по темпу роста производительности труда на предстоящий период.

2. Предлагаемый метод расчета допустимого резерва высвобождения работников может служить элементом планирования организационных мероприятий, обеспечивающих рост производительности труда с учетом сохранения устойчивости производственных процессов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горшенина Е. В., Хомяченкова Н. А. Мониторинг устойчивости развития промышленного предприятия // Российское предпринимательство. 2011. № 1 (2). С. 63.

2. Шипанов В. В., Антипов Д. В., Антипова О. И. К вопросу о повышении устойчивости функционирования производственной системы предприятия // Современные финансово-экономические инструменты развития экономики регионов: сб. ст. XIV Междунар. науч.-практ. конф. (Уфа, 24 ноября 2016 г.). Уфа: ООО «Аэтерна», 2016. С. 360–362.

3. Шарипов Ш. Ш., Олещук В. А. Влияние системы планирования на устойчивость работы предприятия // Научно-техническое творчество аспирантов и студентов: материалы 47-й науч.-техн. конф. студентов и аспирантов (Комсомольск-на-Амуре, 10–21 апреля 2017 г.) / отв. ред. Э. А. Дмитриева. Комсомольск-на-Амуре, 2017. С. 1215–1217.

4. Елисеев А. С. Модели и методы анализа устойчивости производственных процессов в условиях неопределенности: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.06. Пермь: Пермский нац. исслед. политехн. ун-т, 2013. 130 с.

5. Комплексная безопасность на железнодорожном транспорте и метрополитене: монография: в 2 ч. Ч. 2 / Б. В. Бочаров [и др.]; под ред. В. М. Пономарева и В. И. Жукова. М.: ФГБУ ДПО «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2015. 494 с.

6. Экономическая безопасность железнодорожного транспорта: учебник / Р. А. Кожевников [и др.]. М.: ФГБУ ДПО «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2017. 388 с.

7. Яшин М. Г. Устойчивость функционирования магистральных железных дорог // Транспорт России: проблемы и перспективы—2018: материалы Междунар. науч.-практ. конф. (Санкт-Петербург, 13–14 ноября 2018 г.). СПб.: ИПТ РАН, 2018. Т. 1. С. 130–133.

8. Ефимова Е. Н., Шанченко П. А. Влияние мероприятий программ по повышению производительности труда на устойчивость производственных процессов // Экономика железных дорог. 2020. № 9. С. 13–24.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

ЕФИМОВА Елена Николаевна,
канд. экон. наук, директор НЦ «Экономика»,
АО «ВНИИЖТ»

ШАНЧЕНКО Павел Алексеевич,
канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник, лаборатория
«Эффективность корпоративной системы бюджетного
управления», НЦ «Экономика», АО «ВНИИЖТ»

ЕРШОВА Елена Владимировна,
ведущий экономист, лаборатория «Эффективность
корпоративной системы бюджетного управления»,
НЦ «Экономика», АО «ВНИИЖТ»

Статья поступила в редакцию 03.10.2020 г., принята к публикации 07.11.2020 г.

Для цитирования: Ефимова Е. Н., Шанченко П. А., Ершова Е. В. Определение предельной численности при планировании мероприятий программ по повышению производительности труда // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2021. Т. 80. № 1. С. 53–58. DOI: <https://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-1-53-58>.

Determination of the maximum number of employees of the JSC Russian Railways engaged in transportation activities when planning measures for programs to increase labor productivity

E. N. EFIMOVA, P. A. SHANCHENKO, E. V. ERSHOVA

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

Abstract. Introduction of measures aimed at increasing labor productivity should ensure an increase in the efficiency of production processes in terms of costs associated primarily with labor resources. Optimization of its number is reflected in the characteristics of the production process, and above all on its sustainability. Sustainability means the ability of a process to return to its original state despite the action of external and internal factors. Sustainability is characterized by indicators of reliability, safety and stability of the production process and is determined by a complex index indicator that includes the listed characteristics. Unreasonable recommendation and implementation of measures to increase labor productivity with the release of employees without taking into account the achieved level of sustainability can lead to a decrease in the efficiency of production, an increase in operating costs and disruption of basic production processes. In this regard, the problem arises of determining the permissible reserve for the release of employees when planning organizational and managerial measures, taking into account the sustainability of production processes associated with transportation activities.

Keywords: labor productivity; measures to ensure the growth of labor productivity; sustainability of production processes; sustainability characteristics; integral index indicator of sustainability; matrix of sustainability states; sustainability coefficient; reserve ratio; maximum number of employees

DOI: <https://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-1-53-58>

REFERENCES

1. Gorshenina E. V., Khomyachenkova N. A. *Monitoring ustoychivosti razvitiya promyshlennogo predpriyatiya* [Monitoring the sustainability of industrial enterprise development]. Russian Journal of Entrepreneurship, 2011, no. 1 (2), p. 63.
2. Shchipanov V. V., Antipov D. V., Antipova O. I. *K voprosu o povyshenii ustoychivosti funktsionirovaniya proizvodstvennoy sistemy predpriyatiya* [On the issue of increasing the stability of the functioning of the production system of the enterprise]. Sovremennye finansovo-ekonomicheskie instrumenty razvitiya ekonomiki regionov. Sb. st. XIV Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. (Ufa, 24 noyabrya 2016 g.) [Modern financial and economic instruments for the development of the regional economy. Coll. of articles of the XIV International scientific and practical conference (Ufa, November 24, 2016)]. Ufa, LLC "Aeterna" Publ., 2016, pp. 360–362.
3. Sharipov Sh. Sh., Oleshchuk V. A. *Vliyaniye sistemy planirovaniya na ustoychivost' raboty predpriyatiya* [Influence of the planning system on the sustainability of the enterprise]. Nauchno-tekhnicheskoe tvorchestvo aspirantov i studentov. Materialy 47-y nauch.-tekhn. konf. studentov i aspirantov (Komsomol'sk-na-Amure, 10–21 aprelya 2017 g.) / otv. red. E. A. Dmitrieva [Scientific and technical creativity of post-graduate students and students. Materials of the 47th scientific and technical conference of students and post-graduate students (Komsomolsk-on-Amur, April 10–21,

2017); Executive Editor E. A. Dmitrieva]. Komsomol'sk-na-Amure, 2017, pp. 1215–1217.

4. Eliseev A. S. *Modeli i metody analiza ustoychivosti proizvodstvennykh protsessov v usloviyakh neopredelennosti. Dis. ... kand. tekhn. nauk* [Models and methods of analysis of the stability of production processes in conditions of uncertainty. Cand. tech. sci. diss.]. Perm', Permskiy nats. issled. politekh. un-t [Perm National Research Polytechnic University] Publ., 2013, 130 p.

5. Bocharov B. V., Ponomarev V. M., Zhukov V. I., Struchalin V. G., Zharikova M. F., Sokolov V. A. *Kompleksnaya bezopasnost' na zheleznodorozhnom transporte i metropolitene. Monografiya. V 2 ch. Ch. 2* [Integrated safety in railway transport and metro. Monograph. In 2 parts. Part 2]. Moscow, FGBU DPO "Uchebno-metodicheskiy tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte" [FGBU DPO "Educational and methodological center for education in railway transport"], 2015, 494 p.

6. Kozhevnikov R. A., Mezhhokh Z. P., Tereshina N. P. [et al.]. *Ekonomicheskaya bezopasnost' zheleznodorozhnogo transporta. Uchebnik* [Economic safety of railway transport. Textbook]. Moscow, FGBU DPO "Uchebno-metodicheskiy tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte" [FGBU DPO "Educational and methodological center for education in railway transport"], 2017, 388 p.

7. Yashin M. G. *Ustoychivost' funktsionirovaniya magistral'nykh zheleznnykh dorog* [Stability of functioning of main railways]. Transport Rossii: problemy i perspektivy – 2018. Materialy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. (St. Petersburg, 13–14 noyabrya 2018 g.) [Transport of Russia: problems and prospects – 2018. Materials of the International scientific-practical conference (St. Petersburg, November 13–14, 2018)]. St. Petersburg, IPT RAN Publ., 2018, Vol. 1, pp. 130–133.

8. Efimova E. N., Shanchenko P. A. *Vliyaniye meropriyatiy program po povysheniyu proizvoditel'nosti truda na ustoychivost' proizvodstvennykh protsessov* [Influence of measures of programs to increase labor productivity on the stability of production processes]. Railway Economics, 2020, no. 9, pp. 13–24.

ABOUT THE AUTHORS

Elena N. EFIMOVA,
Cand. Sci. (Econ.), Director of the SC "Economics", JSC "VNIIZHT"

Pavel A. SHANCHENKO,
Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher, Laboratory "Efficiency of the corporate budget management system", SC "Economics", JSC "VNIIZHT"

Elena V. ERSHOVA,
Leading Economist, Laboratory "Efficiency of the corporate budget management system", SC "Economics", JSC "VNIIZHT"

Received 03.10.2020

Accepted 07.11.2020

■ E-mail: ershova.elena@vniizht.ru (E. V. Ershova)

For citation: Efimova E. N., Shanchenko P. A., Ershova E. V. Determination of the maximum number of employees of the JSC Russian Railways engaged in transportation activities when planning measures for programs to increase labor productivity // VNIIZHT Scientific Journal. 2021. 80 (1): 53–58 (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-1-53-58>.

Правила оформления статей, публикуемых в журнале «Вестник ВНИИЖТ»

Статьи, направляемые в редакцию журнала «Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта», должны удовлетворять следующим требованиям:

1. Редакция журнала «Вестник ВНИИЖТ» принимает только ранее не публиковавшиеся авторские материалы — научные (практические) статьи, обзоры (обзорные статьи), соответствующие тематике нашего журнала.

2. Авторские материалы принимаются в распечатанном виде с пронумерованными страницами, в объеме 10–25 тыс. знаков, включая пробелы, на русском языке (набор через 1,5–2 интервала, размер шрифта (кегль) 14), а также в электронном виде (по электронной почте в формате текстового редактора MS Word for Windows 6.0/95/97/2000/XP/) и через сайт журнала. Для направления статьи через сайт необходимо пройти по ссылке <https://vestnik.vniizht.ru/jour/author/submit/1> и заполнить все поля формы «Отправить статью».

Текст статьи набирается с использованием минимального форматирования. Формулы следует набирать в формульном редакторе MS Word (Equation Editor) или MathType без принудительного увеличения или уменьшения размера символов. Простые формулы (или обозначения математических величин в тексте) необходимо набирать следующим образом: латинские символы — курсивом, русские буквы и функции, например $\sin$, — обычным шрифтом (прямое начертание), греческие — шрифтом Symbol (прямое начертание).

Все текстовые материалы, относящиеся к статье (кроме рисунков), желательно предоставлять в виде одного файла.

3. Наряду с текстом статьи авторы должны предоставлять в редакцию структурированную аннотацию (не менее 250 слов), ключевые слова (5–7), пристатейные библиографические списки (при этом автор отвечает за достоверность сведений, точность цитирований и ссылок на официальные документы и другие источники), оформленные в соответствии с ГОСТ Р 7.0.5–2008. Пристатейные библиографические списки (список литературы) должны быть приведены в конце статьи, состоять не менее чем из 15 источников для научной статьи и не менее чем из 30 источников для обзора и содержать полные библиографические данные. Ссылки даются в оригинальной транслитерации в порядке упоминания ссылок в тексте. Ссылки на неопубликованные работы не допускаются. Также необходимо указать номер УДК в строгом соответствии с Универсальной десятичной классификацией.

4. Рисунки и графики предоставляются на отдельных листах. Они должны быть выполнены в специализированных программах (Excel и т. п.) либо в виде сканированных изображений разрешением не менее 300 точек на дюйм (dpi) с учетом их конечного размера. В последнем случае к распечатке следует прикладывать оригиналы рисунков.

Обязательно предоставление иллюстративного материала в электронном виде (форматы tif, psx, bmp, jpg, cdr, ai, eps, wmf).

5. Таблицы располагаются непосредственно в тексте статьи. Каждая таблица должна иметь заголовок. В таблицах обязательно указываются единицы измерения величин.

Ссылки в тексте на рисунки и таблицы обязательны. В конце статьи (после списка литературы) прилагается список подрисуночных подписей, в котором должны быть раскрыты все обозначения, использованные на рисунках.

6. Обозначения, принятые в статье, расшифровываются непосредственно в тексте и, кроме того, должны быть вынесены на отдельную страницу.

7. При упоминании иностранных фамилий в тексте необходимо давать их на языке оригинала в скобках после русского написания (за исключением общеизвестных фамилий, встречающихся в энциклопедии, и фамилий, на которые даются ссылки в списке литературы). При упоминании иностранных учреждений, фирм, фирменных продуктов и т. д. в русской транслитерации в скобках должно быть дано их оригинальное написание.

8. Размерность всех величин, принятых в статье, должна соответствовать Международной системе единиц измерений (СИ). Не следует употреблять сокращенных слов, кроме общепринятых (например — т. е., и т. д., и т. п.).

9. Статья должна быть подписана автором(-ами). Автору(-ам) необходимо на отдельной странице сообщить о себе на русском и английском языках следующие сведения: фамилия, имя, отчество, полный рабочий почтовый адрес, телефон, факс, адрес электронной почты, а также место работы, должность, ученое звание, ученую степень. Обязательно указать автора, с которым следует вести переписку. Вместе со статьей в редакцию направляется официальное разрешение на бланке организации о возможности опубликования научных результатов исследования в открытой печати.

10. Все статьи проходят рецензирование.

11. Редакция оставляет за собой право производить редакционные изменения и сокращения, не искажающие основного содержания статьи.

12. Требования к рекламным материалам: фото; текст на 1–2 стр; почтовый адрес, название организации, телефон/факс, электронный адрес (для дополнительной информации об использовании предлагаемого устройства, прибора, оборудования и др.) или готовый макет рекламного модуля в формате pdf (после предварительного согласования).

13. Плата с авторов за публикацию рукописей не взимается.

14. Материалы, присланные в редакцию, обратно не высылаются.

Справки по телефонам: (495) 602-81-10, 602-80-37, e-mail: journal@vniizht.ru

«Вестник ВНИИЖТ» ГДЕ подписаться?

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

Подписной индекс журнала — 70116.

Также можно оформить подписку (годовую и полугодовую) на договорных условиях в редакции. Адрес редакции журнала: 129626, Москва, 3-я Мытищинская ул., д. 10, тел.: +7 (495) 602-84-56, e-mail: journal@vniizht.ru.

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



Vestnik VNIIZhT

Vestnik of the Railway Research Institute

The founder (publisher) of journal — JSC “VNIIZhT” (Joint Stock Company Railway Research Institute). Journal first published in 1942, is published six times a year.

ISSN 2223-9731

The purpose of the journal — presentation of results of scientific researches and developments in the field of enhancement of transport technologies and technical means of railway transport in the directions traffic safety, infrastructure, traction rolling stock, wagons, high-speed and heavy haul transport, interaction of track and railway vehicles, transport materials science, management of transportation process, energy efficiency, resource-saving, economy, logistics.

Publication language: Russian, English. Russian (full text) with English contents, titles, abstracts, keywords, references etc.

Subscription

You may sign up for a subscription of the scientific journal “Vestnik of the Railway Research Institute” (Vestnik VNIIZhT) from subscription agency Ural-Press, Export & Import Department: export@ural-press.ru, phone +7 (499) 705 91 55 for Print version or via the Scientific Electronic Library <http://www.elibrary.ru> for Digital version.

Subscription index — 70116

You may also sign up for a subscription (annual or semi-annual) on contract terms at the editorial office. Address of the journal's editorial office: 10, 3rd Mytischinskaya str., Moscow, 129626, tel.: +7 (495) 602 84 56, e-mail: journal@vniizht.ru.

The journal is presented on the Internet at: <https://www.journal-vniizht.ru/jour/index>

2 Great Shows 1 Exciting Rail Event

Book Your Stand Now

**Joining forces
to shape the future of UK rail**

In 2021 Raitex will play host to Infrarail.

The UK's most important events in the rail calendar will come together to form the ultimate show for the rail industry.

To be part of the most comprehensive rail exhibition of 2021 contact the team on **+44 (0)1727 814 400** or via email **uk-railhub@mackbrooks.co.uk**

**7-9 Sept 2021
NEC, Birmingham**

www.uk-railhub.com

The logo for RAILTEX features a stylized blue train silhouette above the word "RAILTEX" in a bold, blue, sans-serif font.

RAILTEX

**15th International Exhibition of
Railway Equipment, Systems & Services**

The logo for INFRARAIL features a stylized graphic of magenta and black lines representing railway tracks, with the word "INFRARAIL" in a bold, black, sans-serif font below it.

INFRARAIL

**13th International Railway
Infrastructure Exhibition**



Электроника Транспорт 2021

14-я специализированная выставка электроники и информационных технологий
для пассажирского транспорта и транспортной инфраструктуры

Проводится в рамках Российской недели общественного транспорта www.publictransportweek.ru



12-14 МАЯ, МОСКВА
КВЦ «СОКОЛЬНИКИ»
WWW.E-TRANSPORT.RU