

## НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

ИЗВЕСТИЯ ПЕТЕРБУРГСКОГО УНИВЕРСИТЕТА ПУТЕЙ  
СООБЩЕНИЯ, том 14, выпуск 2, 2017

ISSN (Print) 1815-588X

### Учредитель и издатель

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

### Адрес учредителя и издателя

190031, СПб., Московский пр., 9,  
тел. (812) 314-92-32

### Адрес редакции

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

### Свидетельство о регистрации средства массовой информации

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

### Журнал зарегистрирован

в Российском индексе научного цитирования (РИНЦ)

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

**Журнал имеет** институт рецензирования

### Журнал распространяется

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

## РЕДАКЦИЯ ЖУРНАЛА

### Главный редактор

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

### Заместитель главного редактора

В. В. Сапожников, д-р техн. наук, профессор

### Научный редактор

А. К. Канаев, д-р техн. наук, доцент

### Выпускающий редактор

Э. А. Горелик

### Перевод на английский язык

Ю. А. Фаттахова

### Верстка

А. А. Стуканова

### Редактор сайта

Л. А. Стрелкова

## МЕЖДУНАРОДНЫЙ РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

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

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

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

**Ситаж Марек**, профессор, Силезский технический  
университет, Польша

**Христов Христо**, профессор, Технический  
университет, София, Болгария

## РЕДКОЛЛЕГИЯ

**Сапожников Валерий Владимирович**,  
д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург,  
Россия, председатель редколлегии

**Бадер Михаил Петрович**, д-р техн. наук,  
профессор, МГУПС (МИИТ), Москва, Россия

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

**Гуда Александр Николаевич**, д-р техн. наук,  
профессор, РГУПС, Ростов-на-Дону, Россия

**Корниенко Анатолий Адамович**, д-р техн. наук,  
профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

**Ледяев Александр Петрович**, д-р техн. наук,  
профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

**Нестеров Валерий Леонидович**, д-р техн. наук,  
профессор, УрГУПС, Екатеринбург, Россия

**Титова Тамила Семеновна**, д-р техн. наук,  
профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

**Канаев Андрей Константинович**, д-р техн. наук,  
доцент, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

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

**Подписано в печать** с оригинал-макета 05.07.2017.  
Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная. Печать МФУ.  
Усл. печ. л. 26,125. Установочный тираж 300 экз.  
Заказ 612. Цена свободная.

**Отпечатано в типографии** ПГУПС  
190031, СПб., Московский пр., 9.

© ФГБОУ ВО ПГУПС, 2017

## SCIENTIFIC PUBLICATION

PROCEEDINGS OF PETERSBURG TRANSPORT UNIVERSITY, volume 14, issue 2, 2017

ISSN (Print) 1815-588X

### Founder and publisher

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

### Founder and publisher address

190031, St. Petersburg, Moskovskiy pr., 9, (812) 314-92-32

### Editorial address

190031, St. Petersburg, Moskovskiy pr., 9, (812) 314-92-32

e-mail: izvestia@izvestiagups.org

### Mass media registration certificate number

П И Н Ф С 2 - 7 4 9 9 dd. 06.04.2005 issued by the Federal service for the monitoring of legislation compliance in the sphere of mass communications and the preservation of cultural heritage, North West Federal district division

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

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

**The Journal has** the Peer-review division

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

## JOURNAL STAFF

### Editor-in-chief

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

### Deputy chief editor

V. Sapozhnikov, D.Eng., Professor

### Science editor

A. Kanayev, D.Eng., Associate Professor

### Executive editor

E. Gorelik

### English translation

Yu. Fattakhova

### Layout

A. Stukanova

### Online content editor

L. Strelkova

## INTERNATIONAL EDITORIAL BOARD

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

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

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

**Marek Sitazh**, Professor, Silesian University of Technology, Poland

**Khristo Khristov**, Professor, Technical University of Sofia, Bulgaria

## EDITORIAL TEAM

**Valeriy Sapozhnikov**, D.Eng., Professor, Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia, Chairman of Editorial team

**Mikhail Badyer**, D.Eng., Professor, Moscow State University of Railway Engineering, Moscow, Russia

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

**Aleksander Guda**, D.Eng., Professor, Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russia

**Anatoliy Kornienko**, D.Eng., Professor, Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

**Aleksander Ledyayev**, D.Eng., Professor, Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

**Valeriy Nesterov**, D.Eng., Professor, Ural State University of Railway Transport, Ekaterinburg, Russia

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

**Andrey Kanayev**, D.Eng., Assoc. Professor, Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

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

© Petersburg State Transport University, 2017

## СОДЕРЖАНИЕ

### → ПРОБЛЕМАТИКА ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

**О. Б. Маликов**, **О. Д. Покровская**

Анализ системы нормирования на железнодорожном транспорте с позиций логистики и клиентоориентированности 187

**Т. С. Титова, А. М. Евстафьев**

Повышение энергетической эффективности локомотивов с накопителями энергии 200

### → СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ – ТРАНСПОРТУ

**А. А. Белый, А. А. Барановский, Д. Е. Воробьев, К. Ю. Долинский, Л. К. Дьяченко, Г. В. Осадчий**

Проектирование и организация системы мониторинга мостовых сооружений на высокоскоростных железнодорожных магистралях 211

**В. В. Говоров, Н. Н. Султанов, М. С. Чусовитин**

Универсальный метод оценки прочности элементов верхнего строения железнодорожного пути на основе расчетной модели балки на упругом основании 223

**Е. П. Дудкин, В. А. Черняева, С. А. Дороничева, К. А. Смирнов**

Повышение эффективности и конкурентоспособности трамвая на рынке пассажирских перевозок 230

**Н. В. Канашин, А. А. Никитчин, Д. А. Афонин**

Опыт применения трехмерного моделирования при реконструкции мостов 238

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

Эквивалентная конусность и ее влияние на движение подвижного состава 247

**В. А. Кручек, А. М. Евстафьев**

Влияние технологических погрешностей на кинематику вращательного перемещения осевого редуктора с горизонтальной реактивной тягой в групповом тяговом приводе локомотива 256

**В. А. Кручек, А. В. Грищенко, Т. С. Титова**

Коэффициент использования сцепной массы локомотива с групповым тяговым приводом колесных пар 267

**А. Д. Манаков, А. Г. Кабецкий, А. А. Трошин, Ю. М. Пашаев**

Асимметрия рельсовых цепей с реле ДСШ-2 280

**А. Н. Марикин, В. А. Мирощенко**

Анализ электромагнитных процессов в устройстве компенсации реактивной мощности с переменной индуктивностью 298

**Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов, Д. В. Пивоваров**

Применение равновесного кода «1 из 5» для организации контроля комбинационных схем 307

<b>Д. В. Седых, С. В. Белоусов, М. Н. Василенко</b>	
Автоматизация составления инструкций по пользованию устройствами сигнализации, централизации и блокировки	320
<b>А. Д. Чепурной, А. В. Додонов, А. Е. Афанасьев, А. К. Шевченко, Р. И. Шейченко</b>	
Постановка на производство нового семейства вагонов-платформ	333
<b>С. В. Чижов, Е. Б. Шестакова, Э. Т. Яхшиев, А. А. Антонюк</b>	
Принципы расчета предварительно напряженных железобетонных элементов пролетного строения при дисперсном армировании	343
<b>А. С. Шепель</b>	
Динамическая система показателей, определяющая техническую оснащенность инфраструктуры железнодорожных станций	354
<b>→ ОБЩЕТЕХНИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ</b>	
<b>А. В. Ануфренко, А. К. Канаев</b>	
Формирование требований к узлу агрегации с использованием имитационного моделирования процесса его функционирования	364
<b>А. Г. Котенко, И. М. Кокурин, В. Л. Белозеров, В. С. Тимченко</b>	
Методика оценки пропускной способности реконструируемой железнодорожной линии на основе имитационного моделирования	372
<b>Т. И. Олевинская</b>	
Использование виртуальной глissады для вычисления отклонений летательного аппарата на конечном участке посадки	381



УДК 656.073:658.8

**О. Б. Маликов**, О. Д. Покровская

## **АНАЛИЗ СИСТЕМЫ НОРМИРОВАНИЯ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ С ПОЗИЦИЙ ЛОГИСТИКИ И КЛИЕНТООРИЕНТИРОВАННОСТИ**

Дата поступления: 20.01.2017

Решение о публикации: 24.04.2017

### **Аннотация**

**Цель:** Изучение системы нормирования на железнодорожном транспорте с позиций клиентоориентированности и логистики, в частности разработка конкретных практических предложений по оптимизации системы доставки грузов и по оценке показателей логистической (терминально-складской) деятельности ОАО «РЖД». **Методы:** Используются аналитический метод исследования, а также экономико-математические средства теории терминалистики как нового научного направления. **Результаты:** Предпринята попытка критического анализа существующей системы доставки грузов железнодорожным транспортом. Отмечается, что неоправданно исключать из логистической цепи грузоперерабатывающие элементы – логистические объекты (ЛО) различного типа, с которых груз поступает на железную дорогу и на которых покидает ее. Внимание к технико-эксплуатационным показателям работы и лишь к собственно транспортному участку логистической цепи искусственно обедняет мощнейший функционал предприятий железнодорожной отрасли, приводя к упрощенческому подходу к управлению перевозочным процессом и не способствует переключению на железные дороги новых грузопотоков. Предложена новая система индикаторов для экономического обоснования и проведения расчетов параметров ЛО и ТС, которые прежде отсутствовали. Все показатели разработаны с учетом существующей системы экономических и эксплуатационных показателей работы складов и железных дорог. Новая система может применяться для логистического нормирования и анализа терминально-складской инфраструктуры ОАО «РЖД». Она может использоваться для: 1) идентификации ЛО; 2) выбора ЛО с учетом его функциональных возможностей, дислокации и др.; 3) оценки проектов строительства и реконструкции объектов терминально-складской инфраструктуры железных дорог; 4) оценки логистической деятельности холдинга ОАО «РЖД»; 5) проектирования ЛО; 7) прогнозирования и планирования работы железнодорожного транспорта. **Практическая значимость:** Для ОАО «РЖД» применение разработанной авторской системы индикаторов позволит оптимально проектировать, эффективно эксплуатировать и планировать работу объектов терминально-складской инфраструктуры. Эффективность предлагаемой транспортно-складской системы заключается в ускорении доставки грузов потребителям, сокращении расходов на техническое содержание и ремонт малодейственных подъездных путей и станций участка, высвобождении маневровых и вывозных поездных локомотивов, а также приемоотправочных путей участковой станции для более эффективного формирования отправительских маршрутов, увеличении технической и участковой скоростей по основному направлению магистральных перевозок через опорную участковую станцию в связи с высвобождением части ниток графика движения поездов, занятых сейчас движением сборно-разборных вывозных поездов.

**Ключевые слова:** Клиентоориентированность, логистическое и техническое нормирование, транспортно-складская система, терминальная сеть, логистический объект.

**Oleg B. Malykov**, D. Sci., professor; **\*Oksana D. Pokrovskaya**, Cand. Sci., associate professor, insight1986@inbox.ru (Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University) RATE-SETTING SYSTEM ANALYSIS OF RAILROAD TRANSPORT FROM A POSITION OF LOGISTICS AND CUSTOMER-ORIENTED APPROACH

### Summary

**Objective:** The study of railroad transport rate-setting system from a position of customer-oriented approach and logistics, particularly the development of specific practical proposals of freight delivery system optimization and the assessment of OJSC “Russian Railways” logistic (terminal stocking) activity indices. **Methods:** Analytical method was applied, as well as economical and mathematical tools of terminalistics, being a new school. **Results:** An attempt was made to review the existing railway freight delivery system. It was observed that it was unreasonable to exclude materials handling elements – logistical objects (LO) of different types, from a logistical chain as by means of the element in question the freight arrives at as well as leaves the railroad. If the focus is made only on operating indices of functioning and traffic section of a logistical chain, it artificially impoverishes the strongest functional of railway enterprises, leading to a simplistic approach of traffic process managing and does not contribute to freight flow transferring to railroads. A new system of indicators was suggested for economic justification and calculation of parameters LO and TS, which were missing before. All indices were adjusted to the existing system of economical and operational indices of storage yard and railroads functioning. The new system may be applied in logistical rating, as well as terminal and stocking infrastructure of OJSC “Russian Railroads”. It may be used for: 1) LO identification; 2) LO selection taking into account its functionality, dislocation, etc.; 3) construction projects’ assessment and reconstruction of terminal and stocking railroads’ infrastructure facilities; 4) logistical functioning of OJSC “Russian Railroads” holding company; 5) LO construction; 6) railroad transport functioning forecasting and planning. **Practical importance:** The application of the originally developed system of indicators will allow OJSC “Russian Railroads” to effectively design, operate and plan the functioning of terminal and stocking infrastructure facilities. The effectiveness of the suggested TSS is in more rapid freight delivery to consumers, expenditure reduction in technical maintenance and ineffective railway sidings and section’s stations repair, shunting and exporting train locomotives release, as well as passing siding of a section’s station for more effective formation of exit routes, technical and station’s speed increase of line haul main directions through home-base station, due to a number of train operation paths release, occupied with demountable export trains’ operation.

**Keywords:** Custom-oriented approach, logistic and technical rate-setting, storage-retrieval system, terminal network, logistic object.

### Актуальность и цель работы

Стратегия развития железнодорожного транспорта до 2030 года [1], а также Концепция создания сети транспортно-логистических центров на территории РФ [2] и Концепция развития контейнерного бизнеса холдинга ОАО «РЖД» [3] предусматривают реализацию принципа клиентоориентированности при оказании транспортно-экспедиционных,

складских и интегрированных логистических услуг. Но ориентирована ли на клиента железных дорог система нормирования показателей работы? Действительно ли логистические принципы охватывают всю систему доставки грузов железнодорожным транспортом?

Требуется не просто обновление системы показателей логистической деятельности, а их функциональная интеграция. Для общего удобства и полноценного использования всеми

участниками рынка система норм проектирования и оценки логистических объектов (ЛО) должна отражать интересы всех участников процесса перевозки, а не только решать локальные задачи формирования терминально-складской инфраструктуры, станций, узлов и эксплуатации транспорта с позиции железнодорожной отрасли.

В современных условиях недостаточно просто построить железнодорожный ЛО. Чтобы он эффективно работал, его надо «подключить» к общей сети, прежде всего – к сети ЛО, в которых стыкуются сферы деятельности других игроков рынка перевозок, обеспечить «бесшовный» сервис для клиентов.

Очевидно, что и транспортные узлы, и складская инфраструктура, и сеть опорных станций, и сеть логистических центров, в итоге – ЛО различной функциональной специализации и уровня. Поскольку все они включены в любую логистическую цепь и имеют системообразующий, узловый характер, то они должны быть сгруппированы в одну единую группу ЛО и рассматриваться в совокупности. А «сбитый» «прицел» не только превращает работу звеньев логистических цепей железных дорог в местечковую, но и значительно снижает ее эффективность [4].

Создание единой системы нормирования показателей логистической деятельности и работы транспортно-складских систем (ТСС) железнодорожного транспорта, адекватной интересам всех участников транспортно-логистического рынка, очевидно. Решение этой задачи поможет разработать клиентоориентированный пакет транспортно-логистических услуг, оптимизировать параметры работы ЛО всех типов, рационально проектировать их и успешно «подключать» к существующей опорной железнодорожной сети и транспортным коридорам. А также позволит выработать рекомендации по созданию государственного стандарта для логистической инфраструктуры России.

По нашему мнению, целесообразно разработать единую систему индикаторов на основе новых и модифицированных критериев

оценки. Это возможно в рамках нового интегрированного научного направления логистики и теории складских систем – терминалистики (логистики терминалов и терминальной инфраструктуры) [5]. В этом заключается **цель данной работы** – предложить авторскую систему индикаторов для проектирования, планирования развития и оценки объектов терминально-складской инфраструктуры ОАО «РЖД» с учетом принципов логистики и клиентоориентированности.

### **Существующая система нормирования**

Анализ существующей ситуации позволяет сделать некоторые замечания.

1. При детальной проработке вопросы эксплуатации транспортных единиц, технического нормирования и обеспечения высоких качественных и количественных показателей работы, к сожалению, не учитывается следующее. Груз поступает на железнодорожный транспорт от отправителя и затем выдается получателю на ЛО различного типа и принадлежности (места общего пользования, места необщего пользования). Длина же логистической цепи не ограничивается только транспортным участком с тарифным расстоянием от станции погрузки до станции выгрузки груза. Рассмотрение только собственно транспортировки грузов, пусть и важнейшей части логистической цепи, сводит на нет все изыскания по повышению клиентоориентированности и эффективности работы железнодорожного транспорта, поскольку не включает изучение вопросов эксплуатации другого, не менее значимого элемента – хранения и складской грузопереработки перевозимых товаров. Такое неоправданное исключение из логистической цепи грузоперерабатывающих элементов искусственно обедняет мощнейший функционал предприятий железнодорожной отрасли, приводит к упрощенческому подходу к управлению перевозочным процессом и не способствует переключению на же-

лезные дороги новых грузопотоков (рис. 1) с очерченным сегментом логистической цепи.

2. Парадокс сложившейся ситуации в том, что железнодорожные узлы, выполняя логистические функции и играя роль полноценных многофункциональных ЛО, рассматриваются в транспортной науке и практике односторонне – только как транспортные, но не как транспортно-складские системы, что тоже не позволяет говорить об исчерпывающем характере их изучения. Методологической основой данного исследования стали труды таких отечественных ученых как В. Н. Образцов, С. В. Земблинов, В. А. Персианов, И. Е. Савченко, И. И. Страковский, Н. В. Правдин, С. П. Вакуленко, В. И. Апатцев, Ю. И. Ефименко, А. А. Смехов, Э. З. Бройтман, Н. П. Журавлев, А. М. Гаджинский, С. Ю. Елисеев, А. С. Балалаев, О. Н. Числов, Т. А. Прокофьева, В. И. Сергеев, Л. Б. Миротин, В. В. Дыбская и др. [6–16].

3. В последнее время ОАО «РЖД» проводит работу по увеличению ориентации работы на обслуживание грузовладельцев, грузоотправителей, грузополучателей, чтобы привлечь больше грузопотоков на железнодорожный транспорт. Однако по существу организация управления поездопотоками, основанная на технических нормах, не меняется.

На железнодорожном транспорте рассчитываются и применяются для управления движением поездов несколько десятков технических норм, регламентирующих различные технологические операции по переработке

поездов и вагонопотоков, по работе и планированию работы станций и т. д.

Приведем несколько примеров, подтверждающих, что некоторые технические нормы не соответствуют стратегии ОАО «РЖД» на «клиентоориентированность».

1. Полный рейс вагона, который определяют при техническом нормировании  $l$ , состоит из длины груженого пробега  $l_{гр}$  и длины порожнего пробега  $l_{п}$ :

$$l = l_{гр} + l_{п}.$$

Однако грузовладельца не интересует полный оборот вагона. Ему надо знать, за какое время железнодорожный транспорт перевезет его груз, а что будет потом с освободившимся от его груза порожним вагоном, ему не важно. Чтобы порожний рейс вагона был минимальным – это уже дело внутренних железнодорожных технологий (регулирование порожних вагонопотоков и т. д.).

2. Коэффициент местной работы определяют по формуле

$$K_M = \frac{u_{п} + u_{в}}{u},$$

где  $u_{п}$  – общее количество погруженных вагонов на станции за сутки;  $u_{в}$  – общее количество выгруженных вагонов на станции за сутки;  $u$  – общее количество вагонов по станции за сутки.

Из всего количества выгруженных вагонов на станции за сутки конкретного грузовла-

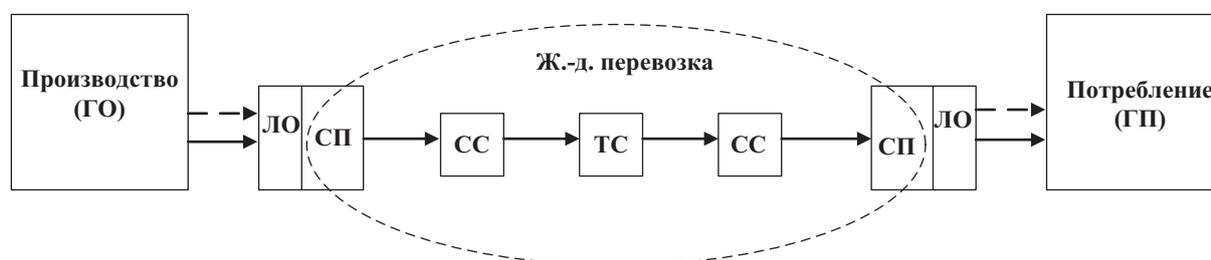


Рис. 1. Существующая логистическая система доставки грузов: от сферы производства – грузоотправителей (ГО) к сфере потребления – грузополучателям (ГП) через станции примыкания (СП), сортировочные станции (СС) и промежуточные технические станции (ТС), без рассмотрения работы ЛО, тяготеющих к железной дороге и доставки груза до них авто- (пунктир) или железнодорожным транспортом

дельца интересуют только его вагоны, т. е. выгружен ли его груз, а остальные – нет. Также и из всего количества погруженных станцией вагонов за сутки грузоотправителя интересуют только те вагоны, в которые должен быть погружен его груз.

Большой или маленький коэффициент местной работы на этой станции грузовладельца тоже не интересует. Для железнодорожной станции коэффициент местной работы – важный показатель, так как чем он больше, тем большее время оборота вагонов по всей станции («плохой» показатель). Таким образом, станции выгодно как можно больше транзитных поездов и вагонов, что может быть достигнуто при незначительном коэффициенте местной работы, т. е. чтобы на ней как можно меньше грузилось и разгружалось груза. Причем выгодно сокращение взаимодействия с клиентами, а это приводит к уменьшению общего объема погрузки, который тоже является важным показателем, так как чем больше железнодорожный транспорт грузит грузов, тем выше его доходы. Итак, в отношении «клиентоориентированности» данные показатели противоречат друг другу.

3. Оборот вагона определяют по 3-членной формуле

$$\vartheta = \frac{1}{24} \left[ \frac{(1 + \alpha)l_{гр}}{v_{уч}} + K_M \cdot t_{гр} + \frac{(1 + \alpha)l_{гр}}{l_{тех}} \cdot t_{тех} \right],$$

где  $l_{гр}$  – рейс вагона в груженом состоянии, км;  $\alpha$  – коэффициент порожнего пробега;  $v_{уч}$  – участковая скорость, км/ч;  $K_M$  – коэффициент местной работы;  $t_{гр}$  – средняя продолжительность грузовой операции, ч;  $l_{тех}$  – вагонное плечо, км;  $t_{тех}$  – среднее время нахождения вагона на технической станции, ч.

За время перевозки груза поезд может пройти в среднем не одну, а 5–6 попутных технических станций, и время простоя на них  $t_{тех}$  зависит от многих технологических и организационных факторов, которые имеют случайный характер (от типа станции – сортировочная или участковая, с переработкой транзитных поездов или без нее, от времени маневровой

работы, объема местной работы, времени накопления вагонов на полный состав, времени ожидания маневровых или поездных локомотивов, ожидания смены поездного локомотива или локомотивной бригады и т. д.).

Участковая скорость может быть важна для пропускной способности перегонов, но может не влиять на общее время доставки грузов, так как вагоны могут быстро пойти перегон, а потом стоять на станции под накоплением или другими технологическими операциями.

Все это приводит к выводу, что существующие нормы железнодорожных операций не ориентированы на увеличение скорости доставки грузов, т. е. на клиента-грузовладельца, которого интересует только доставка его грузов как можно скорее и в полной сохранности.

## Предложения и обсуждение результатов

Причины этого, на наш взгляд, связаны со следующими недостатками в построении системы доставки грузов.

Продвижение грузопотоков по транспортной сети состоит из двух основных операций: перемещение грузов и задержка грузов на станциях. Прямая транспортировка грузов по транспортной сети возможна между двумя пунктами – отправления и прибытия грузов. Даже в этой простой схеме имеются два пункта задержки грузов: в пункте отправления (подготовка к отправке, погрузка, операции по отправлению) и в конечной точке рейса (операции по приему и выгрузке). К такого рода перевозкам относятся автомобильный транспорт, часть морских, водных и железнодорожных перевозок.

Причинами задержек грузопотоков в железнодорожной транспортной сети могут быть необходимость: 1) обгона скоростными пассажирскими и грузовыми поездами, следующими без остановок; 2) скрещения таких же встречных поездов; 3) смены поездных локомотивов или локомотивных бригад; 4) отцепки части вагонов или выгрузки части грузов на

попутных промежуточных станциях; 5) дополнения составов другими вагонами (грузевыми или порожними), следующих в тех же направлениях; а также формирование: 6) технических маршрутных поездов на сортировочных и участковых станциях; 7) ступенчатых маршрутов на промежуточных технических станциях и т. д.

Эти задержки вагонов на попутных технических станциях служат основной причиной медленной доставки грузов потребителям и снижает конкурентоспособность железнодорожного транспорта. Особенно большой недостаток доставки грузов железнодорожным транспортом состоит в том, что груженные вагоны простаивают по многим причинам. При этом не только уменьшается скорость доставки грузов, но и неэффективно используются сами вагоны, так как они не перевозят грузы и к тому же занимают приемоотправочные пути. Потому работники железнодорожного транспорта все время стараются строить все новые пути на станциях и заставляют их груженными и порожними вагонами, что приводит к дополнительным затратам и неэффективному применению вагонов и существующих путей на станциях.

На железнодорожном транспорте большое значение придается повышению участковой и технической скоростей движения поездов по перегонам. Нередко можно услышать сообщения о том, что эти скорости увеличены на 1–2%. Однако вряд ли это является главным для выполнения основной задачи железнодорожного транспорта – увеличения скорости доставки грузов потребителям. Получается, что техническая и участковая скорости повышаются, а общая скорость доставки грузов из-за больших простоев вагонов на станциях сохраняется на уровне 12–15 км/ч. Это объясняется тем, что основное время (примерно 70–80%) вагоны простаивают на станциях под разными технологическими операциями. Так что увеличение технической скорости ускоряет не процесс доставки грузов потребителям, а проход отдельных перегонов и участков железнодорожных линий.

Известно, что дороже хранить грузы в вагонах, чем на складах, т. е. если нужно накопление грузов, то их желательно хранить не в вагонах, а на складах, не занимая вагоны и пути. Поэтому в пунктах длительной задержки грузопотоков на железнодорожном транспорте следует создавать перевалочные склады, а не строить дополнительные приемоотправочные пути для отстоя вагонов. Грузы надо разгружать из вагонов в такие склады, освобождая вагоны и отправляя их в очередной рейс, используя для перевозки других грузов. Последнее позволило бы уменьшить потребное число вагонов на сети, сократить оборот вагона, высвободить пути на станциях от стоящих вагонов, привести к уменьшению затрат на строительство дополнительных путей на станциях, повысить всю эффективность работы железнодорожного транспорта. Что касается оставленных на складах грузов, то их хранение будет дешевле (в 7–8 раз, чем в вагонах), и они могут быть погружены в следующий поезд нужного направления. Стоимость строительства таких складов на транспорте может быстро окупиться за счет высвобождения вагонов для перевозок полезных грузов для народного хозяйства [8, 17].

### Предложение первое

Предлагается создать *единую терминальную сеть (ТС)*, в которую будут входить и грузовые терминалы, и грузовые дворы (после их существенной модернизации и реконструкции), т. е. ЛО разных типов, часть которых может принадлежать ОАО «РЖД», а часть – сторонним торговым и логистическим компаниям. Узловыми ЛО, между которыми курсируют ускоренные маршрутные поезда (контейнерные или составленные из универсальных крытых вагонов, полувагонов, платформ с разными штучными грузами), могут служить крупные грузовые дворы железнодорожных станций. Таких грузовых дворов и отдельных складов имеется около 500 на сети железных дорог, но они требуют существен-

ного переустройства, модернизации и современного технического оснащения. При этом следует иметь в виду, что временно хранить грузы на хорошо оснащённом складе в 7–8 раз дешевле, чем в вагонах [17].

Недостатки существующей системы доставки: большое число технических станций, как следствие – невысокие скорости продвижения вагонопотоков по сети; существенные затраты на строительство путей отстоя вагонов на всех типах станций; занятие значительной площади под путевое развитие стан-

ций для маневров и отстоя; высокие затраты локомотиво-часов на маневровые и сортировочные работы.

Сравнение существующей и предлагаемой схем организации перевозок в узле дано на рис. 2. Преимущество такой ТСС в том, что перевозки всегда осуществляются от ЛО до ЛО, поэтому требуется единая ТС, на ЛО которой аккумулируются и комплектуются грузы для перевозок. Кроме того, одновременно будет решена проблема доставки грузов в адрес малодейтельных станций участка.

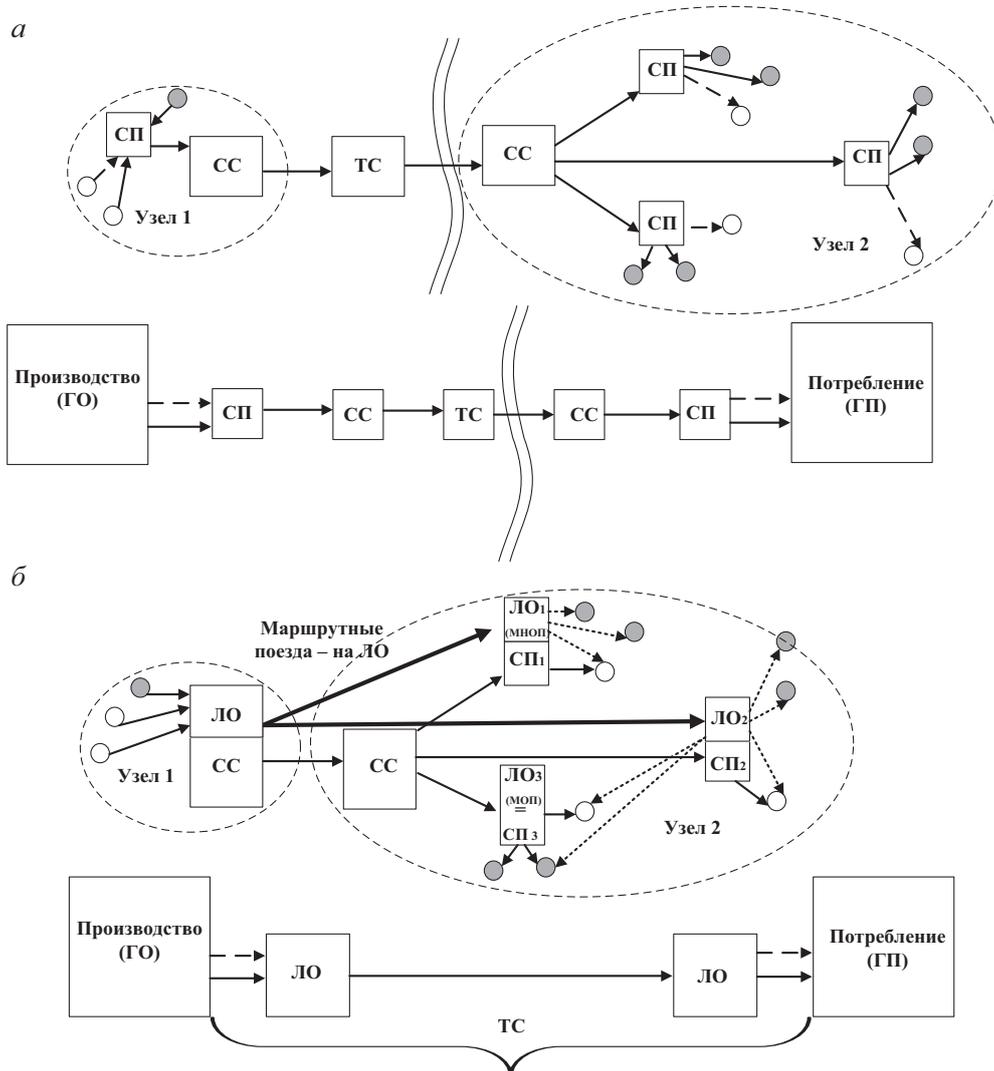


Рис. 2. Схемы организации региональной ТСС в узле:

*а* – существующая (через СС); *б* – предлагаемая (через ЛО).

СС – сортировочная станция узла; ЛО<sub>1</sub>, ЛО<sub>2</sub>, ЛО<sub>3</sub> – разные логистические объекты; СП<sub>1</sub>, СП<sub>2</sub>, СП<sub>3</sub> – станции примыкания;  $\longrightarrow$  – перевозки железнодорожным транспортом;  $\dashrightarrow$  – перевозки автомобильным транспортом;  $\bigcirc$  – клиенты, получающие грузы через ЛО (места общего пользования);  $\bullet$  – клиенты, имеющие свои подъездные пути и ЛО (места необщего пользования)

Эффективность предлагаемой ТСС заключается в: ускорении доставки грузов потребителям на 1–2 суток; сокращении расходов на техническое содержание и ремонт малодеятельных подъездных путей и станций участка; высвобождении маневровых и вывозных поездных локомотивов, а также приемоотправочных путей участковой станции для более эффективного формирования отправительских маршрутов; увеличении технической и участковой скоростей по основному направлению магистральных перевозок через опорную участковую станцию в связи с высвобождением части ниток графика движения поездов, занятых сейчас движением

сборно-разборных вывозных поездов. Затраты на строительство ЛО и местных автодорог быстро окупятся за счет сокращения расходов и активного взаимодействия железнодорожного транспорта с другими отраслями экономики [18, 19].

### Предложение второе

Предлагается на основе авторской системы показателей (индикаторов) оценивать эффективность запроектированной ТСС, которая может быть представлена как ТС, так и отдельными ЛО.

#### Авторские индикаторы для оценки железнодорожных ТСС

Индикатор	Расчетная формула
1. Коэффициент логистической полезности склада	$LOG = \frac{\Delta S_{гр VAL}}{\sum S_{гр}},$ <p>где <math>\Delta S_{гр VAL}</math> – изменение добавленной стоимости перерабатываемого на складе груза/товара, тыс. руб.; <math>\sum S_{гр}</math> – суммарная стоимость всего находящегося на складе груза/товара, тыс. руб.</p>
2. Показатель качества терминально-складского обслуживания	$K_{скл} = \frac{S_{кач}}{\sum S_{рег}},$ <p>где <math>S_{кач}</math> – общая площадь качественных складских площадей класса «А», «А+» по международным классификациям, тыс. кв. м; <math>\sum S_{рег}</math> – суммарная площадь складских комплексов в регионе, тыс. кв. м</p>
3. Показатель транспортно-логистической обеспеченности региона, в ед.	$K_{ТЛО} = \frac{K_{скл}}{\sum \left( \frac{N_{РЖД}}{N_{скл}} + N_{скл} \right)},$ <p>где <math>K_{скл}</math> – показатель качества терминально-складского обслуживания; <math>N_{скл}</math> – суммарное количество ЛО в регионе, ед.; <math>N_{РЖД}</math> – суммарное количество ЛО ОАО «РЖД», ед.</p>
4. Логистический рейтинг участка ж.-д. сети – это обеспеченность качественным логистическим сервисом клиентов данного экономико-географического района, в котором находится исследуемый	$R_{LOG}^{ж-д} = \left( \frac{Q_{скл,усл} \cdot Q_{лог}}{LOG} \right) \cdot K_{ТЛО},$ <p>где <math>Q_{скл,усл}</math> – объем стандартных складских услуг (хранение, прием-выдача), предоставляемых объектами ОАО «РЖД», руб.; <math>Q_{лог}</math> – объем дополнительных транспортно-логистических услуг (комплексный пакет расширенного сервиса, включая VAL-услуги, маркировку, «последнюю милю» и др.), предоставляемых объектами ОАО «РЖД», руб.; <math>LOG</math> – коэффициент логистической полезности склада; <math>K_{ТЛО}</math> – показатель транспортно-логистической обеспеченности региона.</p>

Продолжение таблицы

Индикатор	Расчетная формула
участок общей сети железных дорог, в тыс. руб. · ед.	<p>В качественном виде <math>R_{\text{LOG}}^{\text{рег}} = \frac{I_{\text{ж-д}} \cdot P_{\text{ж-д}}}{K_{\text{ТЛО}} \cdot S_{\text{рег}}}</math>,</p> <p>где <math>P_{\text{ж-д}}</math> – густота ж.-д. коммуникаций в регионе, км/кв. км; <math>I_{\text{ж-д}}</math> – грузонапряженность ж.-д. линий, т/км; <math>K_{\text{ТЛО}}</math> – показатель транспортно-логистической обеспеченности региона; <math>S_{\text{рег}}</math> – площадь региона, кв. км.</p> <p>В количественном виде <math>R_{\text{LOG}}^{\text{рег}} = \frac{I_{\text{ж-д}} \cdot P_{\text{ж-д}}}{\sum_i P_{\text{скл}}} / S_{\text{рег}}</math>,</p> <p>где <math>P_{\text{ж-д}}</math> – густота ж.-д. коммуникаций в регионе, км/кв. км; <math>I_{\text{ж-д}}</math> – грузонапряженность ж.-д. линий, т/км; <math>\sum_i P_{\text{скл}}</math> – суммарная грузоперерабатывающая способность всех ЛО, включая объекты ОАО «РЖД», млн т/год; <math>S_{\text{рег}}</math> – площадь региона, кв. км</p>
5. Комплексный показатель оценки целесообразности формирования ТСС в регионе – это оптимальный вариант сети ЛО по соотношению «инвестиции–полезная мощность–логистическая эффективность»	<p>КПО(opt) = <math>\{F_{\text{ТСС}}^{\Phi}; F_{\text{ТСС}}^{\text{T}}; F_{\text{ТСС}}^{\text{K}}\}</math>,</p> <p>где <math>F_{\text{ТСС}}^{\Phi}</math> – набор параметров целевой функции финансового вида;  <math>F_{\text{ТСС}}^{\text{T}}</math> – набор параметров целевой функции технического вида;  <math>F_{\text{ТСС}}^{\text{K}}</math> – набор параметров целевой функции качественного вида, при условии реализации экстремумов указанных целевых функций</p>
6. Обеспеченность логистической инфраструктурой – определяет доступность ж.-д. инфраструктуры, в ед.	$INF = \frac{L_{\text{ЛО ср}} \cdot N_{\text{ЛО}}}{L_{\text{ж-д}}}$ <p>где <math>L_{\text{ЛО ср}}</math> – средняя удаленность ЛО в составе ТС, км (взаимная локация); <math>N_{\text{ЛО}}</math> – количество ЛО в составе ТС, ед.; <math>L_{\text{ж-д}}</math> – длина анализируемого участка железнодорожной сети, км</p>
7. Коэффициент комплексности сервиса на ЛО	$R_{\text{компл}} = \frac{Q_{\text{ед}}}{Q_{\text{компл}} \cdot K_{\text{лс}}}$ <p>где <math>Q_{\text{ед}}</math> – объем единичных (простейших) логистических операций, общей стоимостью не выше 15–20% общей прибыли ЛО, у. е./год;  <math>Q_{\text{компл}}</math> – объем сложных составных логистических операций, общей стоимостью не менее 70% от общей прибыли ЛО, у. е./год; <math>K_{\text{лс}}</math> – коэффициент совмещения логистических операций, 1,1, ..., 1,5</p>
8. Коэффициент плотности логистической сети	$K_{\text{пл.лс}} = \frac{\sum N_{\text{ЛО}} S_{\text{торг}}}{S_{\text{рег}}}$ <p>где <math>N_{\text{ЛО}}</math> – количество ЛО в составе ТС, ед.; <math>S_{\text{торг}}</math> – общая площадь торговых помещений для товаров потребительского назначения FMCG (только крупных торговых сетей) региона, кв. м; <math>S_{\text{рег}}</math> – площадь региона, кв. км</p>

Продолжение таблицы

Индикатор	Расчетная формула
<p>9. Комплексный коэффициент логистической локации – это количественный показатель размещения логистической инфраструктуры с учетом плотности железных дорог, населения, торговых сетей и социально-экономических факторов, в ед./кв. км</p>	$K_{\text{компл лог}} = \frac{N_{\text{ЛО}}}{S_{\text{тер}} \sum R},$ <p>где <math>N_{\text{ЛО}}</math> – количество ЛО в составе ТС, ед.; <math>S_{\text{тер}}</math> – площадь территории региона, кв. км; <math>\sum R</math> – комплексный рейтинг региона, по балльно-весовой экспертной оценке, включающий:</p> $\sum R = \{R_{\text{ж-д}}; R_{\text{ад}}; R_{\text{н}}; R_{\text{т}}; R_{\text{ту}}; R_{\text{эк}}; R_{\text{гео}}; R_{\text{п}}; T; S_{\text{к}}; S_{\text{кач}}; S_{\text{кол}}\},$ <p><math>R_{\text{ж-д}}</math> – густота железных дорог; <math>R_{\text{ад}}</math> – густота автодорог; <math>R_{\text{н}}</math> – плотность населения; <math>R_{\text{т}}</math> – общая площадь торговых площадей крупных федеральных компаний; <math>R_{\text{ту}}</math> – плотность размещения транспортных узлов; <math>R_{\text{эк}}</math> – экономическое благополучие региона; <math>R_{\text{гео}}</math> – географическое расположение региона; <math>R_{\text{п}}</math> – перспективы развития проектов ОАО «РЖД», инвестиционная привлекательность региона; <math>T</math> – продолжительность прохождения транзитных грузопотоков; <math>S_{\text{к}}</math> – полнота комплексного логистического сервиса; <math>S_{\text{кач}}</math> – качественная структура складских площадей; <math>S_{\text{кол}}</math> – количественная структура складских площадей</p>
<p>10. Емкость терминальной сети ОАО «РЖД» на отдельном участке, в тыс. т/год</p>	$E_{\text{лог}} = Q_{\text{уч.ж-д}} \cdot \frac{Q'_i}{100} \cdot \frac{S_{\text{лог } i}}{100},$ <p>где <math>Q_{\text{уч.ж-д}}</math> – общий объем грузовых перевозок участка сети железных дорог (отделения), тыс. т/год; <math>Q'_i</math> – удельный объем <math>i</math>-того груза, переработанного на ЛО терминально-складской инфраструктуры участка, %; <math>S_{\text{лог } i}</math> – удельные логистические затраты грузовладельцев в общей величине затрат на перевозку груза, %</p>
<p>11. Скорость логистического обслуживания клиентов на ЛО, в тыс. руб./сут.</p>	$V_{\text{ЛО}} = \frac{Q}{T_{\text{лог серв}}},$ <p>здесь <math>Q</math> – объем логистических услуг, реализуемых ЛО, тыс. руб./сут.; <math>T_{\text{лог серв}}</math> – средняя продолжительность выполнения стандартного комплекса логистических операций с грузом на ЛО, сут. (время нахождения груза в обработке на ЛО): <math>T_{\text{лог серв}} = (T_{\text{подг-закл}} + T_{\text{погр-выгр}} + T_{\text{сорт}} + T_{\text{хран}} + T_{\text{доп усл}}) \cdot K_{\text{лс}}</math>, сут., где <math>T_{\text{подг-закл}}</math> – продолжительность операций по оформлению, приемке–выдаче, размещению грузов, ч; <math>T_{\text{погр-выгр}}</math> – продолжительность выполнения погрузочных/выгрузочных работ, ч; <math>T_{\text{сорт}}</math> – продолжительность сортировки грузов, ч; <math>T_{\text{хран}}</math> – продолжительность хранения груза, ч; <math>T_{\text{доп усл}}</math> – продолжительность дополнительных логистических услуг, повышающих добавленную стоимость груза, ч; <math>K_{\text{лс}}</math> – коэффициент совмещения логистических операций, 1,1, ..., 1,5</p>

Индикатор	Расчетная формула
12. Потенциальное количество ЛО на базе ж.-д. станций для обслуживания региона, в ед.	$P_{\text{ЛО}} = \frac{N_{\text{ж-д}}}{N_{\text{проект}} \cdot N_{\text{ТСК}} \cdot Q_{\text{ТСК}}},$ <p>где <math>N_{\text{ж-д}}</math> – количество грузовых железнодорожных станций, открытых для выполнения грузовых операций, на территории региона или исследуемом участке опорной железнодорожной сети, ед.; <math>N_{\text{проект}}</math> – общее количество реализуемых и стратегических проектов ОАО «РЖД» по развитию терминально-складской инфраструктуры в данном регионе, ед.; <math>N_{\text{ТСК}}</math> – количество высококачественных терминально-складских комплексов со складами класса не ниже А и А+ и не старше 5 лет эксплуатации, размещенные на станциях региона, ед.</p>

В работе предложена система индикаторов для экономического обоснования и проведения расчетов параметров ЛО и ТС, которые прежде отсутствовали. Все показатели разработаны с учетом существующей системы экономических и эксплуатационных показателей работы складов и железных дорог. Новая система показателей может применяться для логистического нормирования и анализа терминально-складской инфраструктуры ОАО «РЖД». Она взята за основу при разработке логистического руководства для железнодорожного транспорта [20].

Предлагаемый экономико-математический инструментарий может использоваться для: 1) идентификации ЛО; 2) выбора ЛО с учетом его функциональных возможностей, дислокации и др.; 3) оценки проектов строительства и реконструкции объектов терминально-складской инфраструктуры железных дорог; 4) оценки логистической деятельности холдинга ОАО «РЖД»; 5) проектирования ЛО; 7) прогнозирования и планирования работы железнодорожного транспорта.

### Библиографический список

1. Стратегия развития железнодорожного транспорта РФ на период до 2030 года. – М. : Красный пролетарий, 2008. – 183 с.

2. Концепция создания терминально-логистических центров на территории РФ. – М., 2012. – 97 с.

3. Концепция комплексного развития контейнерного бизнеса в холдинге ОАО «РЖД». – М., 2012. – 117 с.

4. Покровская О. Д. «Сбитый прицел» клиентоориентированности / О. Д. Покровская // РЖД-Партнер. – 2016. – URL: <http://www.rzd-partner.ru/interviews/mnenia/sbityi-pritsel-klientoorientirovannosti/?print> (дата обращения: 11.01.2017).

5. Покровская О. Д. Терминалистика как новое научное направление / О. Д. Покровская // Путь науки. – 2014. – № 3 (3). – С. 21–24.

6. Ефименко Ю. И. Железнодорожные станции и узлы / Ю. И. Ефименко, В. И. Апатцев, Н. В. Правдин и др. ; под ред. В. И. Апатцева, Ю. И. Ефименко. – М. : ФБГОУ «Учеб.-метод. центр по образованию на ж.-д. транспорте», 2014. – 450 с.

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

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

9. Гаджинский А. М. Современный склад / А. М. Гаджинский. – М. : ИТК Дашков и Ко, 2009. – 196 с.

10. Земблинов С. В. Основы построения транспортных узлов / С. В. Земблинов, В. А. Бураков, А. М. Обермейстер и др. ; под общ. ред. С. В. Земблинова. – М. : Транспорт, 1959. – 47 с.

11. Стыковые пункты транспортных узлов / под ред. К. Ю. Скалова, Г. С. Молярчук. – М. : Транспорт, 1977. – 184 с.

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

13. Балалаев А. С. Транспортно-грузовые системы железных дорог : учеб. пособие / А. С. Балалаев, И. А. Чернышова, А. Ю. Костенко. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2006. – 108 с.

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

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

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

17. Маликов О. Б. Грузовые терминалы в системе организации поездопотоков / О. Б. Маликов // Железнодорожный транспорт. – 2011. – № 9. – С. 74–76.

18. Покровская О. Д. Терминалистика: общие вопросы : монография / О. Д. Покровская. – Казань : Изд-во «Бук», 2016. – 142 с.

19. Pokrovskaya O. D. Terminalistica as a new methodology for the study of transport and logistics systems of the regions / O. D. Pokrovskaya // Sustainable economic development of regions : monograph. Vol. 3 / ed. by L. Shlossman. – Vienna : «East West», 2014. – P. 154–177.

20. Покровская О. Д. Логистическое руководство : математические основы терминалистики, маркировка, классификация и идентификация логистических объектов железнодорожного транспорта : монография / О. Д. Покровская. – Казань : Изд-во «Бук», 2017. – 281 с.

## References

1. *Strategiya razvitiya zheleznodorozhnogo transporta RF na period do 2030 g.* [Development strategy of the Russian Federation railway transport for the period until 2030]. Moscow, Krasniy proletariat Publ., 2008, 183 p. (In Russian)

2. *Kontseptsiya sozdaniya terminalno-logisticheskikh tseftrov na territorii RF* [Generation concept of terminal and logistical centres on the territory of the Russian Federation]. Moscow, 2012, 97 p. (In Russian)

3. *Kontseptsiya kompleksnogo razvitiya konteyner-nogo byznesa v kholdynge OAO "RZhD"* [Integrated development concept of container business in OJSC "Russian Railroads" holding company]. Moscow, 2012, 117 p. (In Russian)

4. Pokrovskaya O. D. "Sbytiy prytsel" kliyentoorientirovannosty ["Upset sight" of customer-oriented approach]. *RZhD-Partner*, 2016. URL: <http://www.rzd-partner.ru/interviews/mneniia/sbityi-pritsel> – klientoorientirovannosti/?print (accessed: 11.01.2017). (In Russian)

5. Pokrovskaya O. D. Terminalistika kak novoye nauchnoye napravleniye [Terminalistics as a new school]. *Science path*, 2014, no. 3 (3), pp. 21–24. (In Russian)

6. Yefimenko Y. I., Apattsev V. I., Pravdyn N. V. et al. *Zheleznodorozhniye stantsii i uzly* [Railway stations and junctions]. Moscow, Learning and teaching educational centre of railway transport Publ., 2014, 450 p. (In Russian)

7. Pravdyn N. V., Vakulenko S. P., Golovnich A. K. et al. *Proyektyrovaniye infrastruktury zheleznodorozhnogo transporta (stantsii, zheleznodorozhniye i transportniye uzly)* [Railroad transport infrastructure designing (stations, railway junctions and transport nodal points)]. Moscow, Marshrut Publ., 2014, 1086 p. (In Russian)

8. Malykov O. B. *Perevozky i skladyrovaniye tovarov v tsepyakh postavok* [Traffic and storing in supply chains]. Moscow, Learning and teaching educational centre of railway transport Publ., 2014, 536 p. (In Russian)

9. Gadzhinskiy A. M. *Sovremenniy sklad* [Modern storage]. Moscow, Publishing Trading Corporation, Dashkov and Co Publ., 2009, 196 p. (In Russian)

10. Zemblinov S. V., Burakov V. A., Obermeister A. M. et al. *Osnovy postroyeniya transportnykh uzlov* [Transport nodal points' construction foundation]. Moscow, Transport Publ., 1959, 47 p. (In Russian)
11. *Stykoviye punkty transportnykh uzlov* [Transport division points]. Moscow, Transport Publ., 1977, 184 p. (In Russian)
12. Prokopfyeva T. A., Sergeyev V. I. *Logisticheskiye tsentry v transportnoy sisteme Rossii* [Logistic centres in the transport system of Russia]. Moscow, PH "Ekonomicheskaya gazeta" Publ., 2012, 522 p. (In Russian)
13. Balalayev A. S., Chernyshova I. A., Kostenko A. Y. *Transportno-gruzoviye sistemy zheleznikh dorog* [Railway transport and cargo systems]. Khabarovsk, DVGUPS Publ., 2006, 108 p. (In Russian)
14. Yeliseyev S. Y. *Systema logisticheskogo upravleniya vzaimodeystviyem s morskymy i rechnymy portamy i drugymy vydamy transporta* [The system of logistical control of sea ports and river ports and other types of transport interaction]. Moscow, VINITI RAN Publ., 2005, 96 p. (In Russian)
15. Dybskaya V. V. *Upravleniye skladyvaniyem v tsepyakh postavok* [Storing management in supply chains]. Moscow, Alpha-Press Publ., 2009, 720 p. (In Russian)
16. Myrotyn L. B., Bulba A. V., Demyn V. A. *Logistika, tekhnologiya, proyektirovaniye skladov, transportnykh uzlov i termynalov* [Logistics, technology, designing of stores, transport nodal points and rail-heads]. Rostov-on-Don, Phoenix Publ., 2009, 408 p. (In Russian)
17. Malykov O. B. *Gruzoviye termynaly v sisteme organizatsii poyezdopotokov* [Freight terminals in train flows arrangement system]. *Railway transport*, 2011, no. 9, pp. 74–76. (In Russian)
18. Pokrovskaya O. D. *Terminalistika: obshnye voprosy* [Terminalistics: general questions]. Kazan, Book Publ., 2016, 142 p. (In Russian)
19. Pokrovskaya O. D. *Sustainable economic development of regions*. Vienna, "East West" Publ., 2014, vol. 3, 261 p.
20. Pokrovskaya O. D. *Logisticheskoye rukovodstvo: matematicheskiye osnovy terminalistyky, markirovka, klassifikatsiya i identifikatsiya logisticheskikh obyektov zheleznodorozhnogo transporta* [Logistics guide: mathematical grounds of terminalistics, labeling, classification and identification of logistic rail transport facilities]. Kazan, Book Publ., 2017, 281 p. (In Russian)

МАЛИКОВ Олег Борисович – доктор техн. наук, профессор; \*ПОКРОВСКАЯ Оксана Дмитриевна – канд. техн. наук, доцент, insight1986@inbox.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 629.3.02-83+629.3.02-83-843

**Т. С. Титова, А. М. Евстафьев****ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ  
ЛОКОМОТИВОВ С НАКОПИТЕЛЯМИ ЭНЕРГИИ<sup>1</sup>**

Дата поступления: 13.02.2017

Решение о публикации: 10.05.2017

**Аннотация**

**Цель:** Развитие гибридных технологий представляет собой направление, несущее серьезные изменения для железнодорожной промышленности, ее конструкторско-технологической базы. Эти преобразования обеспечивают научно-технические прорывы в гораздо большей степени, чем реализация любых новых проектов в рамках традиционных форм. **Методы:** Значительный интерес вызывает решение задачи взаимодействия гибридных локомотивов и соответствующей структуры электроснабжения. Кроме того, существуют проблемы обеспечения качества и надежности такого подвижного состава. Важнейшее значение для успешного внедрения гибридных локомотивов с комбинированной силовой установкой приобретают взаимосвязь между тремя наборами технологий, а также качество их обеспечения. **Результаты:** Первичными проблемами проектов таких локомотивов являются хранение электроэнергии, глубокая модернизация тягового привода и реализация алгоритмов оптимального управления движением в различных режимах. Повышение уровня плотности энергии, хранимой в тяговой аккумуляторной батарее, при снижении массы транспортного средства позволяет обеспечить конкурентные преимущества экологичных гибридных локомотивов в сравнении с традиционными. Стоимость тяговой аккумуляторной батареи постоянно доминирует над соответствующими экономическими параметрами других компонентов тягового привода гибридных локомотивов, поэтому актуальны проекты, имеющие высокий технический уровень при обеспечении уменьшения общей массы транспортного средства. Однако в последнее десятилетие в связи с повышением значимости электронных компонентов в транспортной промышленности наряду с обозначенными выше задачами на первое место выходят проблемы оптимизации управления системами подвижного состава и обеспечения соответствующего уровня качества управления. Рассмотрены вопросы применения накопителей энергии на гибридном локомотиве и их преимущества перед используемыми в настоящее время источниками энергии. **Практическая значимость:** Показано, что внедрение гибридной системы хранения энергии дает возможность значительно увеличить эффективность и надежность локомотива.

**Ключевые слова:** Гибридный привод, накопитель энергии, рекуперативное торможение, степень заряда, гибридная система хранения энергии, глубина разряда.

**Tamila S. Titova**, D. Sci., professor, titova@pgups.ru; **\*Andrey M. Evstafev**, Cand. Sci., associate professor, evstam@mail.ru (Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University) ENERGY EFFICIENCY IMPROVEMENT OF LOCOMOTIVES WITH ENERGY STORAGEES

**Summary**

**Objective:** The development of hybrid technologies is an aspect that carries serious changes for the railway industry, its design and technological base. These changes provide the scientific and technological

<sup>1</sup> Публикация осуществлена в рамках реализации гранта ОАО «РЖД» на развитие научно-педагогических школ в области железнодорожного транспорта.

breakthroughs to a much greater extent than the implementation of any new projects in traditional forms.

**Methods:** Of great interest is the solution to the problem of hybrid locomotives and related power supply interaction. In addition, there are problems of quality and reliability of the rolling stock. The relationship between the three sets of technology, as well as the problem of support quality of the latter, becomes essential for the successful implementation of hybrid locomotives with a combined power plant.

**Results:** The primary problems of locomotive projects in question are: electric power storage, in-depth modernization of the traction drive, and implementation of an optimal motion control algorithms in different modes. Increasing energy density stored in the traction battery, while reducing vehicle mass, ensures competitive advantages of eco-friendly hybrid locomotives versus traditional. The cost of the traction battery tends to dominate over the relevant economic parameters of other components of the traction drive hybrid locomotives, therefore, projects with a high technological level are relevant, while ensuring lower total weight of the vehicle. However, in the last decade, due to the increasing importance of electronic components in the transportation industry, along with the objectives stated above, problems of management optimization of rolling stock systems and provision of an appropriate level of quality control take center stage. Issues of energy storage application in the hybrid locomotive and their advantages over the currently used energy sources are considered in the article. **Practical importance:** It is shown that the use of a hybrid energy storage system will significantly increase the efficiency and reliability of the locomotive.

**Keywords:** Hybrid vehicle, energy storage system, regenerative braking, state of charge, hybrid energy storage system, depth of discharge.

## Введение

При разработке новых типов тягового подвижного состава в целях снижения удельного расхода энергии на тягу поездов ведущие производители железнодорожного транспорта руководствуются следующими принципами:

- 1) применение имеющих небольшие массу и габариты асинхронных тяговых двигателей;
- 2) повышение эффективности рекуперативного торможения;
- 3) создание облегченных конструкций кузовов и оборудования вагонов;
- 4) улучшение аэродинамики формы концевых вагонов с кабинами управления для уменьшения аэродинамического сопротивления.

Эффективное использование кинетической энергии поезда при торможении является одним из действенных способов повышения экономичности. Чтобы добиться как можно более высоких показателей по снижению энергопотребления и вредных выбросов, необходимо наряду с оптимизацией традиционных видов

привода стимулировать инновационные разработки, применяющие возможность накопления кинетической энергии подвижного состава.

Особенно к большой выгоде с точки зрения снижения расхода топливно-энергетических ресурсов и уменьшения объема выбросов  $\text{CO}_2$  может привести рекуперация энергии торможения на поездах местного и регионального сообщения, а также на промышленном и маневровом тяговом подвижном составе, условия эксплуатации которого отличаются повышенной цикличностью работы. Для этого требуется эффективный перевод кинетической энергии поезда в электрическую при торможении, которую необходимо сохранить для последующего преобразования в кинетическую при очередном ускорении поезда. Одним из достижений в работе по снижению расхода энергии на тягу поездов стало создание опытных образцов подвижного состава с гибридным (комбинированным) тяговым приводом. При этом возникает необходимость в надежном и эффективном накопителе электрической энергии. Основную трудность при разработке

гибридного энергопитания представляет согласованное использование различных источников энергии [1].

### Системы хранения энергии

Основным средством для накопления и сохранения вырабатываемой при рекуперативном торможении энергии для питания тяговых электродвигателей при разгоне, а также питания вспомогательных бортовых потребителей во время стоянки в настоящее время являются системы хранения энергии на основе аккумуляторных батарей (BESS) и конденсаторов большой емкости (UESS), получивших название «Ультраконденсаторы» (UC) или «Суперконденсаторы». Эти устройства – одна из последних инноваций в области хранения электрической энергии [2] и считаются перспективной технологией для будущих электрических и гибридных транспортных средств. Действие аккумуляторных батарей и суперконденсаторов основано на электрохимических процессах, однако их относительную энергию (relative energy) и удельную мощность (power density) определяют разные электрохимические механизмы. В течение последних лет исследования в области хранения энергии значительно расширились, получены новые материалы, использование которых позволяет сочетать высокую плотность энергии аккумуляторных батарей с длительным жизненным циклом и значительной скоростью зарядки суперконденсаторов. Суперконденсаторные устройства, известные как конденсаторы с двойным электрическим слоем (EDLCs), хранят заряд путем адсорбции ионов электролита на поверхности электродных материалов, *которые включают углеродные частицы или пористый углерод*. Никаких окислительно-восстановительных реакций не требуется, поэтому отклик на изменение потенциала без диффузионных ограничений происходит быстро и обеспечивает большую мощность. Но заряд ограничивается поверхностью, и плотность энергии электрохими-

ческих конденсаторов с двойным электрическим слоем меньше, чем в аккумуляторных батареях. В электрохимических конденсаторах *окислительно-восстановительная псевдоемкость возникает при интеркаляции (внедрении ионов в принимающий материал)*. Такая псевдоемкость (pseudocapacitance) представляет собой второй механизм емкостного накопления энергии. Наиболее известны псевдоконденсаторы, использующие обратимые электрохимические процессы на поверхности электродов на основе  $\text{RuO}_2$  и  $\text{MnO}_2$ . Окислительно-восстановительные процессы обеспечивают хранение заряда большей величины (charge storage). Псевдоемкостные материалы дают возможность достичь плотности энергии (energy density) на уровне аккумуляторных батарей в сочетании с длинным жизненным циклом и значительной плотностью мощности (power density) конденсаторов с двойным электрическим слоем.

В гибридном тяговом приводе аккумуляторная батарея служит для накопления и сохранения вырабатываемой при рекуперативном торможении энергии и питания вспомогательных бортовых потребителей во время стоянки и тяговых двигателей при разгоне. Если емкость батареи недостаточна, она не может в достаточной мере аккумулировать вырабатываемую при торможении энергию, в связи с чем существенное повышение энергетической эффективности системы становится проблематичным. Однако при излишней емкости батареи эффективность системы снижается, поскольку выработка энергии при рекуперативном торможении ограничена. На рис. 1 представлена зависимость между емкостью аккумуляторной батареи и повышением энергетической эффективности системы хранения энергии. При достижении определенного уровня емкости батареи рост эффективности прекращается [3].

Чтобы контролировать напряжение и ток аккумуляторной батареи или конденсатора во время переходных процессов при ускорении или замедлении подвижного состава с гибрид-

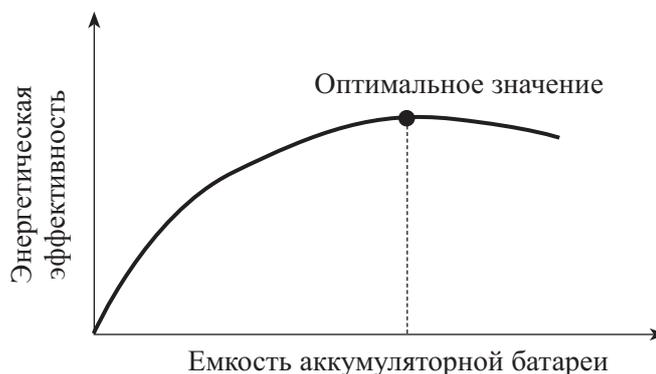


Рис. 1. Зависимость энергетической эффективности гибридного тягового привода от емкости аккумуляторной батареи

ным приводом, необходимо иметь их математические и компьютерные модели, в которых учтены постоянные времени, обусловленные электрохимическими реакциями в аккумуляторных батареях, а также ограничениями на скорость заряда и разряда в ультраконденсаторах [4, 5].

Для аккумуляторной батареи основными характеристиками являются ее электрическая емкость, напряжение, величины максимального тока разряда и заряда, эквивалентное последовательное сопротивление (ESR).

Емкость аккумуляторной батареи описывается формулой Пейкерта

$$C_p = I_{\text{раз}}^k \cdot t,$$

где  $k$  – константа Пейкерта

$$k = I_p^n \cdot C,$$

$k = 1$  для идеальной батареи, для свинцовых аккумуляторных батарей  $k$  может варьироваться в пределах от 1,05 до 2;  $I_{\text{раз}}$  – ток разряда (в А · ч).

Количество запасенной батареей энергии выражается в ватт-часах и численно равно напряжению на выводах батареи в цикле разряда, умноженному на ее емкость:

$$W = U \cdot C = \int_0^t I_{\text{раз}} \cdot U_{\text{раз}} d\tau.$$

Здесь  $U$  – напряжение аккумуляторной батареи в цикле разряда (В);  $C$  – емкость аккумуляторной батареи (в А · ч).

Таким образом, энергия, хранящаяся в аккумуляторе, является не постоянной величиной, а функция двух переменных – напряжения и емкости, которые сильно зависят от температуры и степени заряда аккумуляторной батареи. Степень заряда (state of charge, SOC), т. е. мера возможности батареи отдавать электрическую энергию, – один из важнейших параметров системы хранения энергии. Так, если батарея заряжается током  $I_{\text{зар}}$ , то за период  $T = t - t_0$  полученный батареей заряд будет равен

$$Q_{(t)} = \int_{t_0}^t I_{\text{зар}(\tau)} d\tau.$$

При полном цикле заряда заряд батареи

$$Q_{100\%} = \int_{t_0}^{t_2} I_{\text{зар}(\tau)} d\tau,$$

где  $t_2$  – время окончания полного цикла заряда.

Тогда степень заряда батареи составит

$$\text{SOC} = \frac{Q_{(t)}}{Q_{100\%}} \cdot 100\%.$$

Разряд аккумуляторной батареи характеризуется глубиной разряда (depth of discharge, DOD)

$$\text{DOD} = \frac{Q_{100\%} - \int_{t_0}^t I_{\text{раз}}(\tau) d\tau}{Q_{100\%}} \cdot 100\%,$$

где  $I_{\text{раз}}$  – ток разряда аккумуляторной батареи;  $t$  – текущее время в цикле разряда аккумуляторной батареи.

Аккумуляторные батареи критичны к глубокому разряду и не должны подвергаться ему, так как это может привести к необратимым повреждениям. Обычно рекомендуется поддерживать степень заряда батареи в пределах 20–95%. Энергетическая эффективность аккумуляторной батареи определяется как коэффициент, показывающий, какая часть энергии, полученная при заряде аккумуляторной батареи, может быть отдана в нагрузку при разряде, и зависит от величины разрядного тока. Типовое его значение лежит в пределах 55–95%.

Простейшая модель, которая позволяет исследовать и описать процессы, происходящие в аккумуляторной батарее, приведена на рис. 2. Она включает электродвижущую силу (ЭДС) батареи с напряжением на разомкнутых выводах  $U_{xx}$  и эквивалентного последовательного сопротивления  $R$ , которое зависит от степени заряда и температуры аккумуляторной батареи:

$$U_{xx} = E_0 + \left( \frac{R \cdot T}{F} \right) \cdot \ln \left( \frac{\text{SOC}}{1 - \text{SOC}} \right),$$

здесь  $E_0$  – ЭДС аккумуляторной батареи;  $R$  – идеальная газовая постоянная;  $T$  – абсолютная температура;  $F$  – постоянная Фарадея.

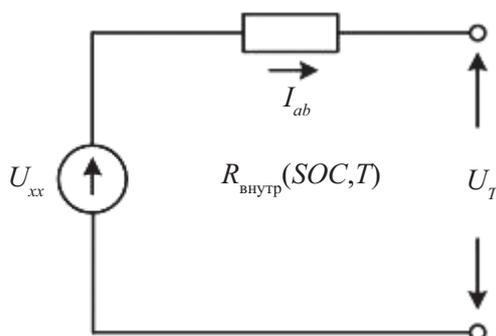


Рис. 2. Схема замещения аккумуляторной батареи с одним внутренним сопротивлением

Напряжение на выводах батареи будет составлять

$$U_T = U_{xx} - I_B \cdot R_{\text{внутр}}.$$

Для описания динамических процессов, протекающих в аккумуляторной батарее при изменяющихся параметрах в циклах заряд – разряд, можно использовать модель, приведенную на рис. 3. В ней учтена разница в величине внутреннего сопротивления батареи в зависимости от направления тока в циклах заряд – разряд и которая изменяется автоматически переключением двух идеальных диодов, включенных встречно-параллельно в цепь внутренних сопротивлений.

Зависимость напряжения холостого хода от глубины разряда для кислотной батареи описывается формулой

$$U_{xx} = (2,15 - \text{DOD}X(2,15 \div 2, 0)).$$

В зависимости от потребляемой мощности ток аккумуляторной батареи будет

$$I_B = \frac{U_{xx} - \sqrt{U_{xx}^2 - 4 \cdot R \cdot P_{\text{req}}}}{2R},$$

где

$$R = \begin{cases} R_{\text{раз}}(\text{SOC}, T) & \text{при } I_B > 0, P > 0, \\ R_{\text{зар}}(\text{SOC}, T). \end{cases}$$

Емкость конденсатора  $C$  позволяет учесть динамические процессы при компьютерном моделировании батареи с помощью программ математического моделирования.

В настоящее время разработано много различных по количеству элементов и сложности моделей ультраконденсаторов [6].

Накопленный в конденсаторе электрический заряд равен

$$Q = C \cdot U,$$

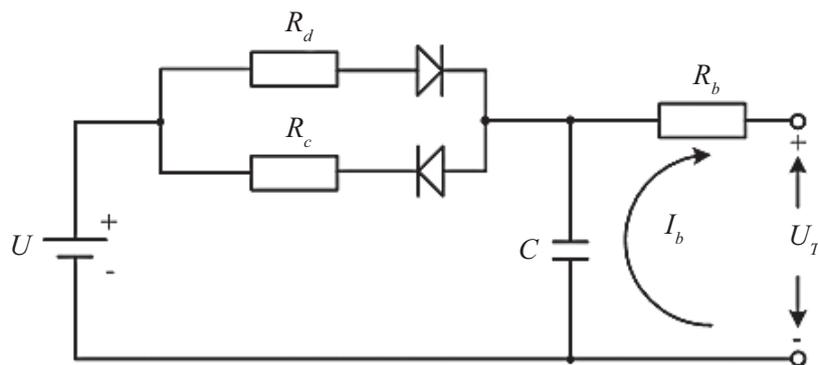


Рис. 3. Схема замещения аккумуляторной батареи для описания динамических процессов, протекающих в аккумуляторной батарее в циклах заряд–разряд

а энергия составляет

$$W = \frac{C \cdot U^2}{2},$$

здесь  $Q$  – электрический заряд конденсатора (Кл);  $C$  – емкость конденсатора (Ф);  $U$  – напряжение заряженного конденсатора (В);  $W$  – энергия заряженного конденсатора (Дж).

Степень заряда конденсатора SOC может быть вычислена по следующей формуле:

$$SOC = \frac{C \cdot (U - U_{\min})}{C \cdot (U_{\max} - U_{\min})} = \frac{U_i - U_{\min}}{U_{\max} - U_{\min}},$$

в которой  $U_{\max}$  и  $U_{\min}$  – максимально и минимально допустимые напряжения на ультра-

конденсаторе;  $U_i$  – текущее значение напряжения на ультраконденсаторе.

Модель ультраконденсатора, представленная на рис. 4, достаточно точная для использования в модели электропривода, но ее разработка и исследование стоят дорого и требуют больших затрат времени.

В этой модели емкость  $C$  является функцией температуры, напряжения и времени эксплуатации, а эквивалентное последовательное сопротивление ESR – функцией температуры, времени и частоты тока нагрузки,

$$U = U_c - i_c \cdot ESR - L \frac{di_c}{dt},$$

где  $U_c$  – напряжение на конденсаторе;  $i_c$  – ток конденсатора;  $L$  – индуктивность; ESR –

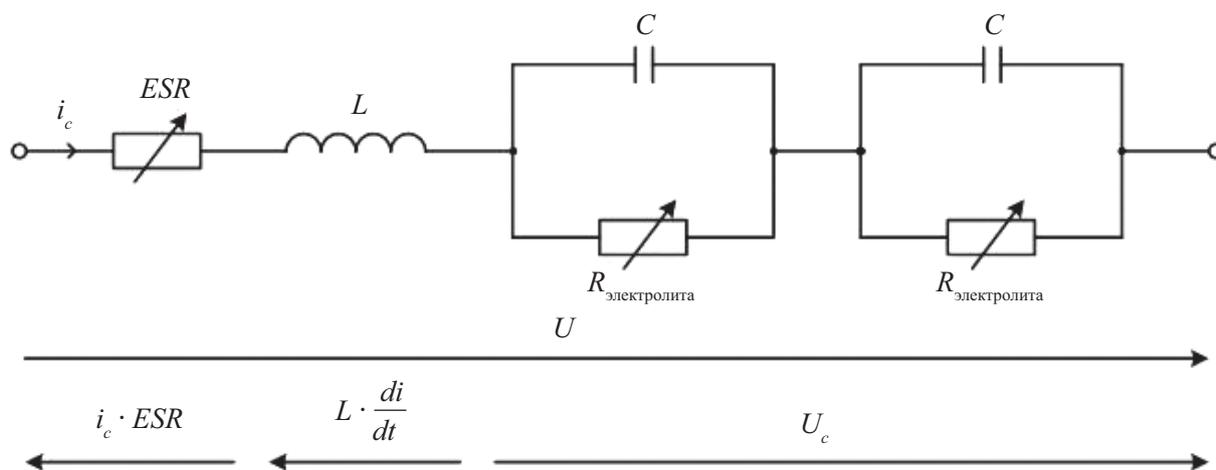


Рис. 4. Схема замещения ультраконденсатора

эквивалентное последовательное сопротивление.

В некоторых случаях можно пренебречь малозначительными факторами, которые оказывают небольшое влияние на анализируемые процессы. В случае деления мощности и анализа потока энергии в тяговых приводах, где постоянные времени имеют большие величины (в секундах), можно исключить из модели почти все элементы, за исключением емкости и внутреннего сопротивления. Параметры  $C$  и  $ESR$  ультраконденсатора зависят от температуры, напряжения и количества циклов заряд – разряд.

Простейшая модель системы хранения энергии на основе ультраконденсатора UEES приведена на рис. 5. В ней емкость ультраконденсатора  $C$  включена последовательно с внутренним эквивалентным последовательным сопротивлением  $ESR$  и параллельно с сопротивлением  $R_{EPR}$  (equivalent parallel resistance), которое позволяет учесть внутренние потери энергии.

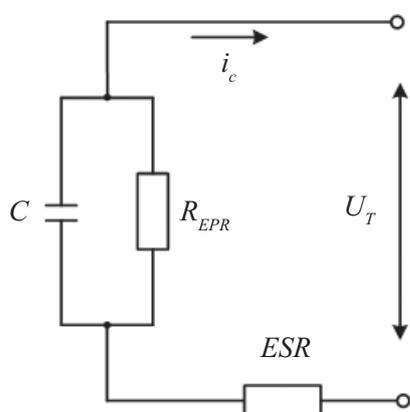


Рис. 5. Простейшая модель системы хранения энергии на основе ультраконденсатора UEES

Точное моделирование ультраконденсатора в диапазоне рабочих частот возможно с помощью многозвенной модели (рис. 6).

Наилучшие результаты построения систем накопления энергии для гибридных транспортных средств дает комбинация батарейной BESS и конденсаторной UEES систем, как видно из диаграммы, приведенной на рис. 7. При оптимальном соотношении батарейная и конденсаторная системы накопления и хранения энергии дополняют друг друга, улучшая показатели плотности энергии и мощности на единицу веса, что является одним из важнейших показателей для любых транспортных средств. Такая, комбинированная, система хранения энергии получила название гибридной (hybrid energy storage system – HESS) [7].

Упрощенная модель гибридной системы хранения энергии HESS приведена на рис. 8. В ней потери в ультраконденсаторе представлены одним сопротивлением  $R_c$ , внутреннее эквивалентное последовательное сопротивление аккумуляторной батареи – сопротивлениями  $R_{rc}$  при заряде и  $R_{dc}$  при разряде батареи. Параметры аккумуляторной батареи имеют нелинейный характер, зависят от температуры и степени заряда батареи.

### Управление гибридным тяговым приводом

Для эффективного функционирования гибридного тягового привода необходимо решить задачу оптимизации использования

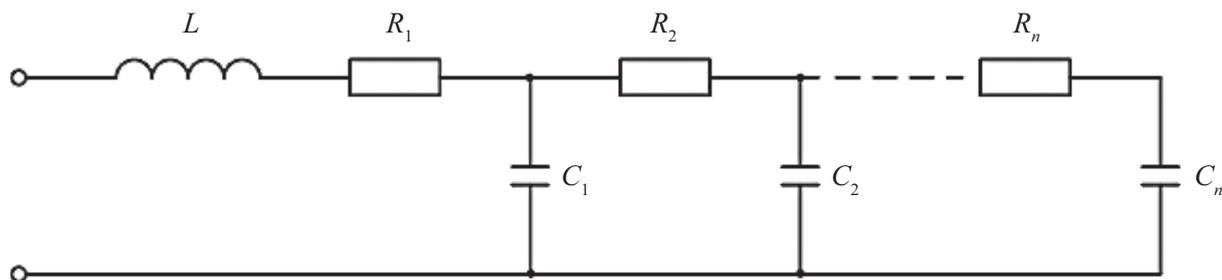


Рис. 6. Многозвенная модель ультраконденсатора



Рис. 7. Сравнение характеристик батарейной BESS и конденсаторной UESS систем хранения энергии

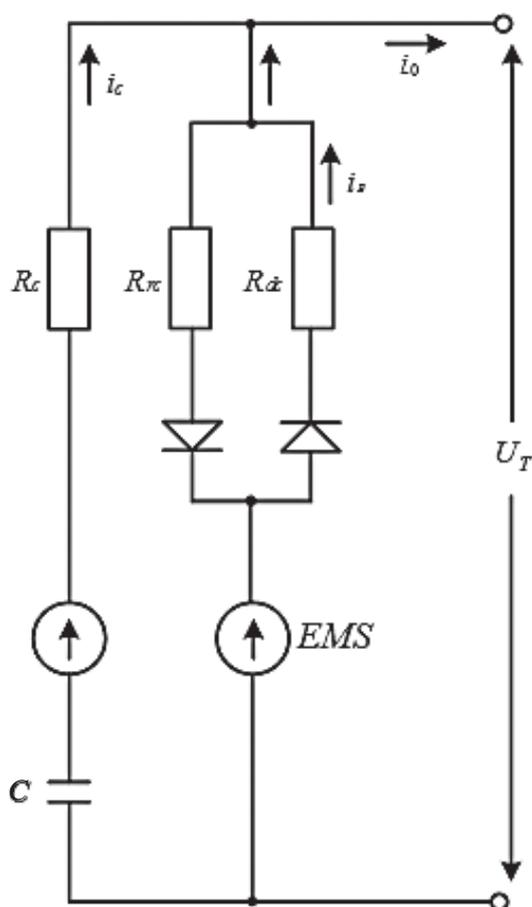


Рис. 8. Упрощенная модель гибридной системы хранения энергии HESS

энергии, вырабатываемой в режиме рекуперативного торможения.

Учитывая продолжительность жизненного цикла аккумуляторных батарей, следует поддерживать уровень их заряда в диапазоне 20–60%. Поэтому управление зарядом должно осуществляться таким образом, чтобы показатель SOC был максимальным при разгоне гибридного тягового подвижного состава. Подзарядка аккумулятора до заданного уровня напряжения происходит при выбеге и в режиме рекуперативного торможения так, чтобы к следующей остановке уровень заряда батареи вновь достиг заданного значения (рис. 9).

На рис. 9 представлены три зоны, соответствующие различным режимам движения гибридного подвижного состава с накопителем энергии. Система управления должна обеспечивать состояния заряда аккумуляторной батареи SOC, приближенной к зоне A, соответствующей нормальному тяговому режиму. Если во время движения происходит снижение уровня заряда аккумуляторной батареи ниже установленного (зона B), система управления должна стремиться вернуть показатель SOC в зону A.

Поскольку запас энергии, накапливаемой при рекуперативном торможении, зависит от скорости начала торможения, уровень заряда при движении в режиме выбега необходимо регулировать в соответствии со скоростью движения и состоянием аккумуляторной батареи.

Для контроля состояния и функционирования оборудования гибридного тягового привода нужно иметь информацию о текущих значениях фактической скорости движения, напряжения основного источника напряжения и аккумуляторной батареи, тока в тяговом инверторе, параметров режима зарядки (разрядки) аккумуляторной батареи и температуры ее элементов.

Преобразователь аккумуляторной батареи осуществляет ее зарядку или разрядку, получая сигналы от тягового инвертора и устройства управления. Контрольные действия в отношении аккумуляторной батареи заключаются в поддержании постоянного на-

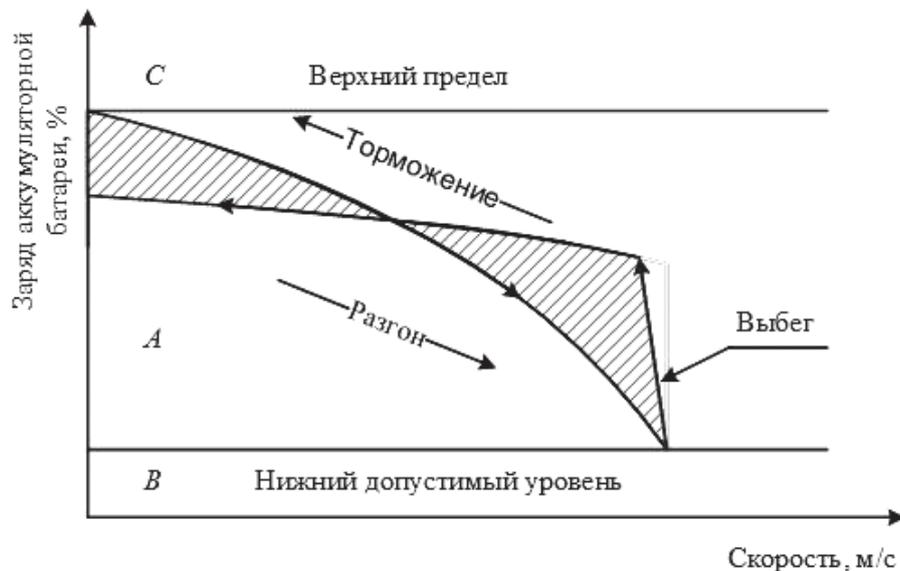


Рис. 9. Управление состоянием заряда аккумуляторной батареи SOC в зависимости от режима движения гибридного подвижного состава

пряжения в шине, соединяющей преобразователь аккумуляторной батареи, инвертор и устройство управления. Если напряжение в шине превышает заданное значение, преобразователь переводит аккумуляторную батарею в режим зарядки, если это напряжение ниже установленного, — в режим разрядки. Для этих режимов заранее определены пороговые значения — SOC CEO для зарядки аккумуляторной батареи и SOC CSO для ее разрядки. В зависимости от скорости движения преобразователь аккумуляторной батареи корректирует параметры CEO и CSO для обеспечения максимального накопления энергии электрического торможения в зависимости от скорости движения. Соответственно SOC должна быть ниже на стоянке (или при небольшой скорости движения). Во избежание возникновения резонанса из-за колебаний сигнала SOC величину CSO устанавливают меньше, чем CEO, на 10–15%.

Для управления гибридным тяговым приводом в экстренных ситуациях контролер управления инвертором должен выполнять следующие функции:

1) если получен сигнал «Аккумуляторная батарея перезаряжена», инвертор прекра-

щает прием энергии электрического торможения;

2) если получен сигнал «Аккумуляторная батарея разряжена», режим работы инвертора снижается, и энергия поступает только от основного источника;

3) если напряжение на входе инвертора понижается, он уменьшает свою выходную мощность с целью поддержания напряжения постоянного тока на заданном уровне.

## Заключение

Гибридный тяговый привод широко применяется для модернизированных и новых локомотивов. Он способен оптимально согласовываться с различными классами мощности тягового подвижного состава. Планируя использование гибридного тягового привода, необходимо начинать подготовку с анализа будущего характера работы локомотива, профиля линий, условий в местах эксплуатации, а также поставленных целей. Тщательность и точность при проведении анализа являются решающими факторами, призванными обе-

спечить экономический успех гибридного тягового привода [8–15].

### Библиографический список

1. Гибридные системы тягового привода компании Voith // Железные дороги мира. – 2011. – № 3. – С. 36–38.
2. Simon P. Where Do Batteries End and Supercapacitors Begin? / P. Simon, Yu. Gogotsi, B. Dunn // U.S. Department of energy, Office of science. – 2014. – Vol. 343. – P. 1210. – URL: <http://science.energy.gov/bes/efrc/publications> (дата обращения: 20.12.2016).
3. Подвижной состав компании JR East с гибридным тяговым приводом // Железные дороги мира. – 2011. – № 1. – С. 26–31.
4. Повышение энергоэффективности локомотивов // Железные дороги мира. – 2010. – № 10. – С. 40–45.
5. Энергоэффективность гибридного тягового привода // Железные дороги мира. – 2011. – № 5. – С. 39–44.
6. Szumanowski A. Hybrid electric power train engineering and technology : modeling, control, and simulation / A. Szumanowski. – Hershey (USA) : IGI Global, 2013. – 422 p.
7. Mi Ch. Hybrid Electric Vehicles: Principles and Applications with Practical Perspectives / Ch. Mi, M.A. Masrur, D. Wenzhong Gao. – Chennai (India) : John Wiley & Sons Ltd, 2011. – 448 p.
8. Гибридный маневровый локомотив // Железные дороги мира. – 2010. – № 9. – С. 26–29.
9. Козловский В. Н. Моделирование систем электромобилей и автомобилей с комбинированной установкой в процессах проектирования и производства / В. Н. Козловский, В. И. Строганов. – М. : МАДИ, 2014. – 264 с.
10. Магистральный локомотив ALP-45DP с комбинированным тяговым приводом // Железные дороги мира. – 2011. – № 5. – С. 31–38.
11. Снижение вредных выбросов при тепловозной тяге // Железные дороги мира. – 2011. – № 5. – С. 59–62.
12. Проекты гибридных локомотивов // Железные дороги мира. – 2015. – № 4. – С. 56–60.

13. Гибридный привод моторного вагона на базе дизеля // Железные дороги мира. – 2015. – № 4. – С. 61–64.

14. Моделирование гибридной конфигурации дизель-поездов // Железные дороги мира. – 2015. – № 6. – С. 52–56.

15. Компоненты гибридного локомотива ALP-45DP // Железные дороги мира. – 2013. – № 3. – С. 49–50.

### References

1. Voith's hybrid systems of traction drive. *World Railways*, 2011, no. 3, pp. 36–38. (In Russian)
2. Simon P., Gogotsi Yu. & Dunn B. Where Do Batteries End and Supercapacitors Begin? *U.S. Department of energy, Office of science*, 2014, vol. 343, pp. 1210. – URL: <http://science.energy.gov/bes/efrc/publications/> (accessed: 20.12.2016).
3. JR East's rolling stock with hybrid traction drive. *World Railways*, 2011, no. 1, pp. 26–31. (In Russian)
4. Locomotive energy efficiency improvement. *World Railways*, 2010, no. 10, pp. 40–45. (In Russian)
5. Energy efficiency of hybrid traction drive. *World Railways*, 2011, no. 5, pp. 39–44. (In Russian)
6. Szumanowski A. *Hybrid electric power train engineering and technology: modeling, control, and simulation*. Hershey (USA), IGI Global Publ., 2013, 422 p.
7. Szumanowski A. *Hybrid electric power train engineering and technology: modeling, control, and simulation*. New York et al. Publ. in the United States of America by Engineering Science Reference (an imprint of IGI Global), 2013, 422 p.
8. Mi Ch., Masrur M.A. & Wenzhong Gao D. *Hybrid electric vehicles: principles and applications with practical perspectives*. Chennai (India), John Wiley & Sons Ltd Publ., 2011, 448 p.
9. Hybrid yard locomotive. *World Railways*, 2010, no. 9, pp. 26–29. (In Russian)
10. Stroganov V. & Kozlovsky V. *Modelling systems of electromobiles and automobiles with combined plant in engineering and manufacture processes*. Moscow, MADI Publ., 2014, 264 p. (In Russian)

10. ALP-45DP main-line locomotive with combined traction drive. *World Railways*, 2011, no. 5, pp. 31–38. (In Russian)
11. The reduction of polluting emissions with diesel traction. *World Railways*, 2011, no. 5, pp. 59–62. (In Russian)
12. Projects of hybrid locomotives. *World Railways*, 2015, no. 4, pp. 56–60. (In Russian)
13. Hybrid drive of a motor car on the basis of a diesel engine. *World Railways*, 2015, no. 4, pp. 61–64. (In Russian)
14. Modeling of hybrid configuration of diesel trains. *World Railways*, 2015, no. 6, pp. 52–56. (In Russian)
15. Components of ALP-45DP hybrid locomotive. *World Railways*, 2013, no. 3, pp. 49–50. (In Russian)

ТИТОВА Тамила Семеновна – доктор техн. наук, профессор, проректор по научной работе, [titova@rgups.ru](mailto:titova@rgups.ru); \*ЕВСТАФЬЕВ Андрей Михайлович – канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой, [evstam@mail.ru](mailto:evstam@mail.ru) (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).



УДК 625.096

**А. А. Белый, А. А. Барановский, Д. Е. Воробьев,  
К. Ю. Долинский, Л. К. Дьяченко, Г. В. Осадчий**

## **ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ОРГАНИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА МОСТОВЫХ СООРУЖЕНИЙ НА ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ МАГИСТРАЛЯХ**

Дата поступления: 09.03.2017

Решение о публикации: 24.04.2017

### **Аннотация**

**Цель:** Проектирование мероприятий по мониторингу инженерных конструкций сооружений высокоскоростной железнодорожной магистрали для снижения риска утраты несущими конструкциями своих потребительских свойств. **Методы:** Анализ и учет специфических условий и воздействий, присущих сооружениям высокоскоростных железнодорожных магистралей, в совокупности с действующими нормативными и регламентными документами, а также мировым опытом проектирования и создания систем мониторинга мостовых объектов. Системный подход к решению сформулированной цели, выражающийся в подготовке проектных решений, базирующихся на интегральных принципах функционирования разработанной системы мониторинга. **Результаты:** Подготовлены проектные решения по мониторингу инженерных конструкций сооружений высокоскоростной железнодорожной магистрали «Москва–Казань–Екатеринбург». В частности, разработаны мероприятия по организации мониторинга на унифицированных конструкциях пролетных строений и опор (в том числе на их отдельных элементах), учитывающие как статическую, так и динамическую составляющие воздействий и планируемых к обращению нагрузок. Основными параметрами, подлежащими мониторингу, являются абсолютное и относительное смещение конструкций, динамические характеристики, напряженно-деформированное состояние пролетного строения, свай и рельс, температура рельс. **Практическая значимость:** Изложены разработанные авторами мероприятия по проектированию и организации мониторинга мостовых сооружений на высокоскоростных железнодорожных магистралях, не имеющие аналогов в отечественной практике до настоящего времени. Во главу исследований были поставлены экономическая эффективность и унифицированный подход к предложенным решениям. С практической точки зрения данные мероприятия позволят в будущем обеспечить и поддерживать заданные нормативные (проектные) уровни надежности, безопасности и долговечности мостовых сооружений.

**Ключевые слова:** Высокоскоростная железнодорожная магистраль, специфические условия, надежность, безопасность, долговечность, мост, мониторинг инженерных конструкций.

\***Andrei A. Belyi**, Cand. Sci., associated professor, andbeliy@mail.ru; **Aleksei A. Baranovskii**, associated professor, balexspb@yandex.ru; **Dmitrii E. Vorobiev**, bridge laboratory chief, most-lab@yandex.ru (Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University); **Kirill Y. Dolinskii**, deputy director, kdmonitoring@mail.ru (CJSC STC “Monitoring of bridges”); **Leonid K. Dyachenko**, assistant, leonid\_dyachenko@mail.ru; **German V. Osadchiy**, assistant, osgerman@mail.ru (Emperor Alexander I

## St. Petersburg State Transport University) DESIGN AND ORGANISATION OF STRUCTURAL HEALTH MONITORING SYSTEM ON HIGH-SPEED RAILWAY BRIDGE CONSTRUCTIONS

**Summary**

**Objective:** Structural health monitoring actions designing for high-speed railway engineering constructions to decrease risk of loss consumer properties of bearing designs. **Methods:** The analysis and accounting of the specific conditions and impacts inherent in constructions of high-speed railways, in total with the existing normative and regulatory documents, and also international background of design and development of structural health monitoring systems on bridge objects. The system approach to the solution of the formulated purpose which is expressed in preparation of the project decisions that are based on the integrated principles of functioning of developed structural health monitoring system. **Results:** Project decisions on structural health monitoring system of high-speed railway Moscow–Kazan–Yekaterinburg constructions were made. In particular, the actions for the monitoring organization on the unified designs of superstructures and piers (including their separate elements) are developed, considering both static and dynamic components of impacts and loadings being planned. The key parameters subject to monitoring are: absolute and relative designs shift; dynamic characteristics; the stressed-deformed condition of superstructure, piles, a rail and rail temperature. **Practical importance:** The actions, developed by authors and stated in the article, for design and organization of bridge constructions structural health monitoring on high-speed railways have no analogs in domestic practice so far. Cost efficiency and the unified approach to the proposed solutions were considered as of primary importance in the given study. From the practical point of view, in the future, these actions will make it possible to provide and support the set standard (project) levels of reliability, safety and durability of bridge constructions.

**Keywords:** High-speed railway, specific conditions, reliability, safety, durability, bridge, structural health monitoring.

**Введение**

Мировой опыт использования систем мониторинга [1–4] свидетельствует о востребованности современных способов диагностики и контроля мостовых объектов. Более того, повсеместно идет введение обязательности применения этих систем.

В России ситуация во многом идентична. Существует целый ряд работ, направленный на оценку эффективности применения данных систем [5–9]. В соответствии с действующими регламентными документами [10–12] системами мониторинга инженерных конструкций (СМИК) [12] подлежат оснащению объекты капитального строительства, в проектной документации которых предусмотрена хотя бы одна из следующих характеристик:

- 1) высота более 100 м;
- 2) пролеты более 100 м;
- 3) наличие консоли более 20 м;

4) заглубление подземной части (полностью или частично) ниже планировочной отметки земли более чем на 15 м.

Следует отметить, что приведенные характеристики сооружений не исчерпывают всех факторов риска и обобщают «уникальные параметры» уже существующих инженерных конструкций.

Вместе с тем стоит подчеркнуть, что решение о возможности обеспечения безопасной эксплуатации проектируемого сооружения принимается лицом, осуществляющим подготовку проектной документации (п. 9 ст. 15 [10]), в том числе необходимость проведения мониторинга состояния основания, строительных конструкций и систем инженерно-технического обеспечения в качестве одной из таких мер.

Проектируемые мероприятия по обеспечению безопасности должны быть обоснованы одним или несколькими способами:

- 1) результатами исследований;
- 2) расчетами и (или) испытаниями, выполненными по сертифицированным или апробированным иным способом методикам;
- 3) моделированием сценариев возникновения опасных природных процессов и явлений и (или) техногенных воздействий, в том числе при неблагоприятном сочетании опасных природных процессов и явлений и (или) техногенных воздействий;
- 4) оценкой риска возникновения опасных природных процессов и явлений и (или) техногенных воздействий.

Таким образом, налицо необходимость применения систем мониторинга на тех объектах, где безопасность строительства или последующей эксплуатации невозможно обеспечить иными способами, и при этом мероприятия по обеспечению безопасности в полной мере обоснованы. Такой случай изложен, к примеру, в работе [13], где обоснование применения системы мониторинга на транспортном объекте вызвано не нормированной «уникальностью», а выполненным риском возникновения чрезвычайной ситуации ввиду сложных геологических и природно-климатических условий.

Еще более ярким примером служит необходимость использования средств мониторинга на высокоскоростных магистралях (ВСМ). Она вызывается прежде всего отсутствием в настоящее время в России опыта эксплуатации мостовых сооружений на железных дорогах с высокоскоростным (до 350 км/ч) движением поездов, а также тем, что высокие скорости движения поездов обуславливают возникновение специфических явлений, нехарактерных для обычных железных дорог.

К основным особенностям проектирования мостов на ВСМ относятся [14]:

- динамический характер взаимодействия подвижного состава и мостовых сооружений, в том числе опасность возникновения резонансных колебаний пролетных строений мостов [15–19], и колебаний подвижного состава;
- аэродинамическая нагрузка от высокоскоростных поездов, представляющая собой

ударно-волновой импульс [20], оказывающая воздействие на объекты инфраструктуры и искусственных сооружений, расположенных в непосредственной близости от ВСМ, и способствующая интенсивному накоплению усталостных повреждений вследствие знакопеременности воздействия, а в некоторых случаях к механическим повреждениям или потере общей устойчивости конструкций;

- аэродинамические эффекты, появляющиеся при движении поезда по мостам больших пролетов и воздействии бокового ветра [20], что в совокупности с эффектами взаимодействия поезда и пролетного строения может привести к обезгруживанию колес поезда и его опрокидыванию;

- дополнительные усилия в элементах системы «мост–бесстыковой путь» [21–23], возникающие в связи с деформативностью моста при изменениях температуры воздуха и поездных вертикальных и горизонтальных воздействиях.

В соответствии с указанными обстоятельствами в составе требований СТУ «Сооружения искусственные участка Москва – Казань высокоскоростной железнодорожной магистрали «Москва–Казань–Екатеринбург». Технические нормы и требования к проектированию и строительству» [20] одним из ключевых положений является указание об оснащении системой мониторинга мостовых сооружений на линии высокоскоростного движения на период строительства и эксплуатации.

Задача проектирования ВСМ «Москва–Казань–Екатеринбург» поставила перед инженерами чрезвычайно сложные вопросы. В проекте ВСМ были использованы последние достижения в области отечественного и зарубежного проектирования и строительства мостов, а многие требования и параметры впервые применены в отечественной практике проектирования. Однако для проверки принятых проектных решений в процессе эксплуатации необходимы полномасштабные экспериментальные исследования.

В сложившихся условиях одним из важнейших инструментов обеспечения безопасно-

сти движения становится мониторинг искусственных сооружений, который в некоторой степени может скомпенсировать отсутствие и обеспечить накопление экспериментальных данных.

### **Постановка задачи**

Мониторинг мостовых сооружений на линии высокоскоростного движения предусмотрен трех видов, различающихся по целям проведения, периодичности, объемам собираемой информации и количеству обследуемых сооружений [20]:

- контрольный мониторинг;
- эксплуатационный мониторинг;
- исследовательский мониторинг.

*Контрольный мониторинг* – вид мониторинга, который выполняется с целью технического контроля состояния мостового сооружения. Получаемая информация о фактическом состоянии мостового сооружения анализируется и сравнивается с заранее установленными требованиями, критериями в автоматическом режиме для принятия решений о безопасном режиме эксплуатации мостового сооружения.

*Эксплуатационный мониторинг* – вид мониторинга, который выполняется с целью наблюдения за деструктивными длительными процессами, планирования эксплуатационных ремонтных мероприятий, предупреждения необратимых изменений состояния мостового сооружения. При эксплуатационном мониторинге определяется соответствие состояния мостового сооружения требованиям государственных стандартов, нормативных документов и проектной документации.

*Исследовательский мониторинг* – вид мониторинга, который выполняется для накопления данных о работе мостового сооружения, при воздействии реальных подвижных нагрузок и природных факторов с целью совершенствования проектирования, строительства и эксплуатации мостов и оценки эффективности новых конструктивно-технологических

решений строительства, ремонта или реконструкции мостов.

### **Цели создания СММК ВСМ**

Целью работы является проектирование мероприятий для снижения риска утраты несущими конструкциями характеристик (или «потребительских свойств» – [24]), определяющих их надежность посредством своевременного обнаружения на ранней стадии негативного изменения технического состояния (прежде всего напряженно-деформированного) данных конструкций, которое может привести к их разрушению и повлечь людские потери, переход сооружений в ограниченно работоспособное, аварийное состояние, к полной или частичной потере несущей способности, что полностью соответствует ГОСТ Р 22.1.12–2005 [12].

В связи с большим количеством искусственных сооружений на проектируемой трассе ВСМ одной из основных задач была унификация принимаемых технических решений по искусственным сооружениям. Например, при создании унифицированных конструкций опор были рассмотрены и увязаны между собой проектные решения, разрабатываемые российской и китайской сторонами. На основе анализа совместной работы пролетных строений, опор и бесстыкового рельсового пути и выполненных поверочных расчетов предложены унифицированные конструкции пролетных строений, промежуточных опор и устоев.

Аналогичный принцип унификации был положен в основу и при разработке проектных решений по мониторингу сооружений ВСМ.

### **Параметры конструкций, подлежащие мониторингу**

При проведении мониторинга строительных конструкций мостов для пропуска вы-

сокоскоростных поездов, которые относятся к сложнейшим инженерным сооружениям, предусматривается определение необходимых параметров различных частей объекта. Мониторингу подлежат элементы сооружения, подверженные наибольшему воздействию и наибольшему изменению состояния в процессе строительства и эксплуатации: опоры и пролетные строения.

Основными параметрами, подлежащими мониторингу, являются:

- абсолютное и относительное смещение конструкций;
- динамические параметры;
- напряженно-деформированное состояние пролетного строения;
- напряженно-деформированное состояние свай;
- напряженно-деформированное состояние рельс;
- температура рельс.

Для решения поставленных задач в составе СММК ВСМ используются:

1. Подсистема мониторинга напряженно-деформированного состояния. Рабочим элементом подсистемы являются тензометрические датчики (тензометры), измеряющие деформации (напряжения).

2. Подсистема мониторинга изменения конфигурации конструкции. Состоит из двухосевых датчиков угла наклона – инклинометров, которые, измеряя отклонения конструкции от вертикали, позволяют определять положение (смещение) в точках установки через уклоны. Величины уклонов, найденные при измерениях в двух перпендикулярных осях, дают возможность получить наклон в любом направлении.

3. Подсистема измерения динамических характеристик конструкции. Она снимает информацию от показаний акселерометров (датчиков ускорений) и позволяет определять динамический отклик элементов конструкции на внешние воздействия, а также статические и динамические параметры конструкции, в частности собственные частоты, параметры затухания колебаний и др.

4. Подсистема мониторинга оценки внешних климатических воздействий (датчики контроля скорости и направления ветра, влажности, температуры окружающей среды, давления и интенсивности осадков и др.).

## **Элементы строительных конструкций моста и внешние факторы, подлежащие мониторингу**

### **Опоры**

#### *Статическая диагностика опор*

На каждой стойке опор размещаются двухосевые датчики наклона – инклинометры, которые определяют уклоны опор. Сдвиг опор в горизонтальном направлении практически исключен, поэтому их перемещение может носить преимущественно характер наклона с неподвижной нижней частью. Инклинометры устанавливаются на внешних углах стоек по диагонали, что дает возможность с максимальной точностью проводить измерения, при этом минимизировав объем оборудования.

#### *Динамическая диагностика опор*

Трехосевые акселерометры располагаются на каждой стойке опор. В отличие от инклинометров точки установки определены в середине внутренних сторон стоек, где вибрационная составляющая внешнего воздействия проявляется максимально. Схема установки датчиков на опорах приведена на рис. 1.

### **Пролетные строения**

Независимо от типа унифицированных пролетных строений основа мониторинга также максимально унифицирована и состоит из комбинации подсистем мониторинга изменения конфигурации конструкции и подсистем измерения ее динамических характеристик. Для сталежелезобетонных пролетных строений дополнительно используется подсистема

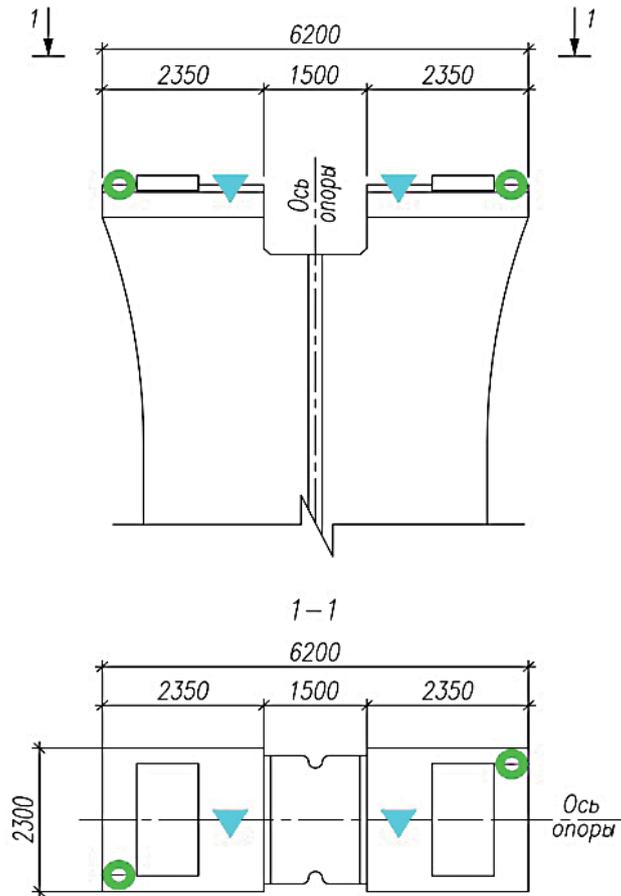


Рис. 1. Схема установки датчиков на опорах (зеленый круг – инклинометр, голубой треугольник – акселерометр)

мониторинга напряженно-деформированного состояния.

#### **Статическая диагностика пролетных строений**

В местах опирания пролетных строений на опоры устанавливаются двухосевые инклинометры. По изменению уклонов делается вывод об изгибной жесткости конструкции и величине нормируемых переломов профиля над опорами. Места опирания выбраны, как точки с максимальным углом отклонения по горизонтали.

Инклинометры размещаются на продольной оси пролетных строений. Две рабочие координаты дают возможность получить величину наклона в любом направлении.

#### **Динамическая диагностика пролетных строений**

Трехосевые акселерометры располагаются попарно в середине пролетов, обеспечивая определение реакции на воздействие движения высокоскоростных поездов по каждому из двух путей. Следует отметить, что установка акселерометров предусмотрена только для каждого второго пролетного строения, что достаточно в случае применения унифицированных конструкций.

#### **Диагностика напряженно-деформированного состояния металлических пролетных строений**

Для сталежелезобетонных пролетных строений контрольные точки определения напря-

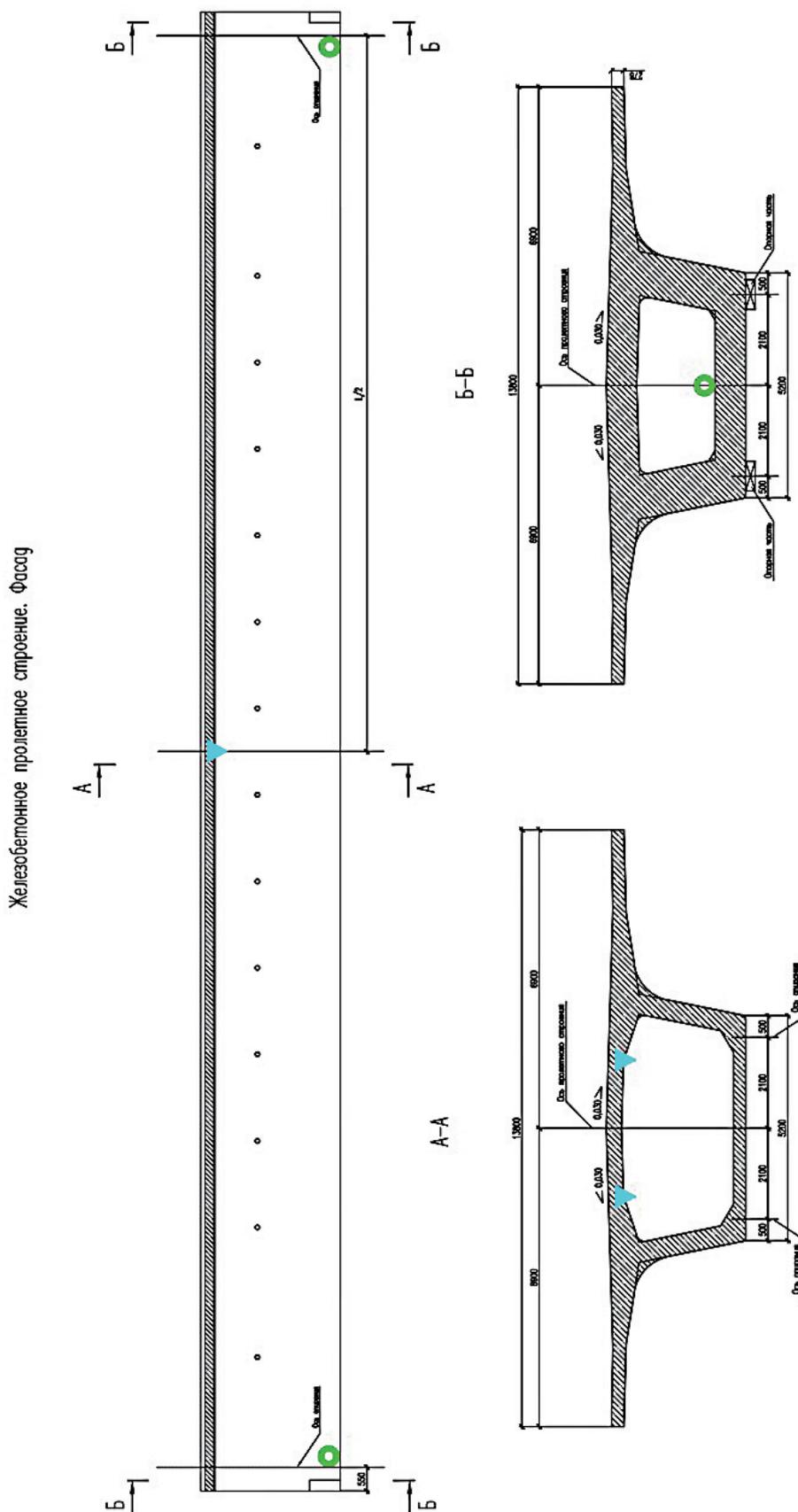


Рис. 2. Схема установки датчиков на железобетонном пролетном строении (зеленый круг – инклинометр, голубой треугольник – акселерометр)

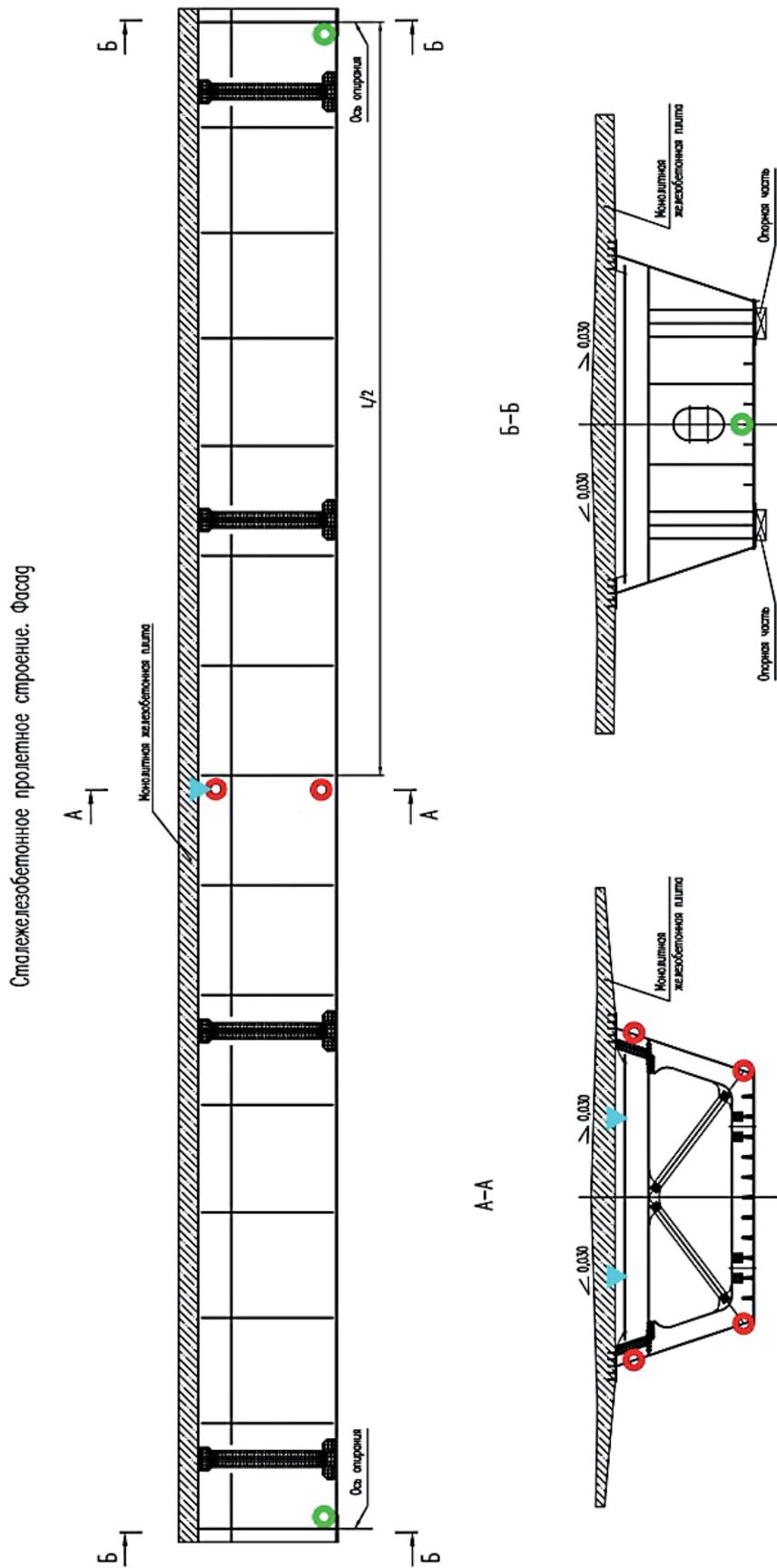


Рис. 3. Схема установки датчиков на сталежелезобетонном пролетном строении (красный круг – точка тензоизмерения, зеленый круг – инклинометр, голубой треугольник – акселерометр)

жений (деформаций) расположены в середине пролетов, которые являются наиболее нагруженными точками пролетных строений и соответственно максимально подверженными деформации.

Схема установки датчиков на пролетных строениях приведена на рис. 2 и 3.

## Заключение

Спроектированная авторами настоящей статьи система мониторинга ВСМ полностью отвечает требованиям, предъявляемым к современным системам мониторинга как в России, так и зарубежом. Вместе с тем следует отметить специфику высокоскоростного движения и последующую техническую сложность эксплуатации мостовых объектов магистрали. В этой связи мониторинг будет являться тем инструментом, который обеспечит поддержание нормативных (проектных) уровней надежности, безопасности и долговечности сооружений.

## Библиографический список

1. Andersen J.E. Structural health monitoring systems / J.E. Andersen, M. Fustinoni. – Italy : L&S S.r.l. Servizi Grafici, 2006. – 126 p.
2. Rucker W. Guideline for structural health monitoring. Final report / W. Rucker, F. Hille, R. Rohrmann. – Berlin : SAMCO, 2006. – 63 p.
3. Wenzel H. Health monitoring of bridges / H. Wenzel. – Chichester : John Wiley & Sons, 2009. – 621 p.
4. Yang Y. Specifications and applications of the technical code for monitoring of building and bridge structures in China // Y. Yang, Q.S. Li, B.W. Yan // *Advances in Mechanical Engineering*. – 2017. – Vol. 9 (1). – P. 1–10. DOI: 10.1177/1687814016684272.
5. Самитов Р. А. Системотехника инженерного мониторинга сложных строительных сооружений / Р. А. Самитов. – М. : Фонд «Новое тысячелетие», 2001. – 248 с.
6. Бокарев С. А. Содержание искусственных сооружений с использованием информационных технологий : учеб. пособие / С. А. Бокарев, С. С. Прибытков, А. Н. Яшнов – М. : ООО «ИД „Транспортная книга“», 2008. – 196 с.
7. Вдовенко А. В. Сервис и мониторинг дорожных сооружений / А. В. Вдовенко, С. Е. Бегун, В. И. Кулиш. – Хабаровск : Спецмост, 2004. – 689 с.
8. Васильев А. И. Мониторинг мостовых сооружений. Задачи, возможности, проблемы / А. И. Васильев // *Дорожная держава*. – СПб. : ООО «Информ. издат. центр „Держава“», 2008. – № 11. – С. 80–82.
9. Ефанов Д. В. Функциональный контроль и мониторинг устройств железнодорожной автоматики и телемеханики : монография / Д. В. Ефанов. – СПб. : ПГУПС, 2016. – 171 с.
10. Федеральный закон «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» от 30.12.2009 № 384-ФЗ. – М., 2009.
11. Градостроительный Кодекс Российской Федерации от 29.12.2004 № 190-ФЗ.
12. ГОСТ Р 22.1.12–2005 «Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Структурированная система мониторинга и управления инженерными системами зданий и сооружений. Общие требования». – М. : Стандартиформ, 2005.
13. Белый А. А. Система мониторинга инженерных конструкций при строительстве тоннеля под рекой Смоленка (г. Санкт-Петербург) / А. А. Белый, К. Ю. Долинский, Г. В. Осадчий // *Геотехника*. – 2016. – № 2. – С. 18–27.
14. Бенин А. В. Особенности проектирования и строительства мостов высокоскоростной железнодорожной магистрали «Москва–Казань» / А. В. Бенин, Л. К. Дьяченко, В. Н. Смирнов // *Изв. Петерб. ун-та путей сообщения*. – 2015. – Вып. 4 (45). – С. 15–20.
15. Бондарь Н. Г. Взаимодействие железнодорожных мостов с подвижным составом / Н. Г. Бондарь, Ю. Г. Козьмин, З. Г. Ройтбурд и др. ; под ред. Н. Г. Бондаря. – М. : Транспорт, 1984. – 272 с.
16. Смирнов В. Н. Мосты на высокоскоростных железнодорожных магистралях / В. Н. Смирнов, А. А. Барановский, Г. И. Богданов, Д. Е. Воробьев, Л. К. Дьяченко, В. В. Кондратов. – СПб. : ПГУПС, 2015. – 274 с.
17. Смирнов В. Н. Резонансные колебания пролетных строений мостов на высокоскоростных железнодорожных магистралях / В. Н. Смирнов, Л. К. Дьяченко, Е. А. Евстигнеев // *Новые техно-*

логии в мостостроении (от прошлого к будущему) : сб. трудов Междунар. науч.-технич. конференции. – СПб. : ПГУПС, 2015. – С. 67–74.

18. Чижов С. В. Оценка безопасности мостов с учетом динамического фактора надежности / С. В. Чижов, Э. Т. Яхшиев, Л. К. Дьяченко // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. – 2016. – Т. 13, вып. 2 (47). – С. 247–254.

19. Дьяченко Л. К. Динамические расчеты пролетных строений мостов ВСМ при движении пассажирских поездов со скоростью до 400 км/ч / Л. К. Дьяченко // Новые технологии в мостостроении (от прошлого к будущему) : сб. трудов Междунар. науч.-технич. конференции. – СПб. : ПГУПС, 2015. – С. 91–97.

20. Специальные технические условия «Сооружения искусственные участка Москва – Казань высокоскоростной железнодорожной магистрали „Москва–Казань–Екатеринбург“. Технические нормы и требования к проектированию и строительству». – СПб., 2014.

21. Смирнов В. Н. Факторы, влияющие на усилия в рельсах бесстыкового пути на мостах высокоскоростных железнодорожных магистралей / В. Н. Смирнов, В. А. Бешлиу // Промышленное и гражданское строительство. – 2001. – № 5. – С. 32–34.

22. Смирнов В. Н. Взаимодействие бесстыкового пути с мостовым сооружением на высокоскоростных магистралях / В. Н. Смирнов. – М. : ФГБОУ «Учеб.-метод. центр по образованию на ж.-д. транспорте», 2015. – 96 с.

23. Мурагина А. О. Безбалластное мостовое полотно на высокоскоростных железнодорожных магистралях / А. О. Мурагина, Ю. О. Мурагина // Новые технологии в мостостроении (от прошлого к будущему) : сб. трудов Междунар. науч.-технич. конференции. – СПб. : ПГУПС, 2015. – С. 91–93.

24. Васильев А. И. Потребительские свойства мостов / А. И. Васильев // Вопросы нормирования потребительских свойств мостов. – М. : ОАО «ЦНИИС», 2002. – С. 8–23.

## References

1. Andersen J. E. & Fustinoni M. *Structural health monitoring systems*. Italy, L&S S.r.l. Servizi Grafici Publ., 2006, 126 p.

2. Rucker W., Hille F. & Rohrmann R. *Guideline for structural health monitoring*. Final report. Berlin, SAMCO Publ., 2006, 63 p.

3. Wenzel H. *Health monitoring of bridges*. Chichester, John Wiley & Sons Publ., 2009, 621 p.

4. Yang Y., Li Q. S. & Yan B. W. Specifications and applications of the technical code for monitoring of building and bridge structures in China. *Advances in Mechanical Engineering*, 2017, vol. 9 (1), pp. 1–10.

5. Samytov R. A. *Systemotekhnika inzhenernogo monytoringa slozhnykh stroytelnykh sooruzheniy* [System integration of complex building constructions engineering monitoring]. Moscow, “New millennium” Foundation Publ., 2001, 248 p. (In Russian)

6. Bokarev S. A., Prybytkov S. S. & Yashnov A. N. *Soderzhaniye iskusstvennykh sooruzheniy s ispolzovaniyem informatsionnykh tekhnologiy* [Engineering structures maintenance with information technologies application]. Moscow, LC “ID “Transportnaya knyga” Publ., 2008, 196 p. (In Russian)

7. Vdovenko A. V., Begun S. Y. & Kulish V. I. *Servis i monitoring dorozhnykh sooruzheniy* [Maintenance and monitoring of highway structures]. Khabarovsk, Spetsmost Publ., 2004, 689 p. (In Russian)

8. Vasiliyev A. I. Monitoring mostovykh sooruzheniy. *Zadachy, vozmozhnosty, problemy* [Bridge-work monitoring. Tasks, facilities, problems]. *Dorozhnaya derzhava*. Saint Petersburg, LC “Derzhava” informational publishing centre” Publ., 2008, no. 11, pp. 80–82. (In Russian)

9. Efanov D. V. *Funktsionalnyy kontrol i monitoring ustroystv zheleznodorognoy avtomatiki i telemekhaniki* [Concurrent error detection and monitoring of railway automatics and telemechanics’ machinery]. Saint Petersburg, Petersburg State Transport University Publ., 2016, 171 p. (In Russian)

10. *Federal law “Technical regulations on buildings and constructions security”* of 30.12.2009, no. 384-FL. Moscow, Kremlin December, 30<sup>th</sup>, 2009 (In Russian)

11. *Gradostroitelnyy Kodeks Rossiyskoy Federatsii* [Town-planning code of the Russian Federation]. Moscow, Kremlin December, 29<sup>th</sup>, 2004, no. 190-FL. (In Russian)

12. *GOST R 22.1.12–2005 – ISO 22.1.12–2005. “Bezopasnost v chrezvychainykh situatsiyakh. Struk-*

*tureyrovannaya sistema monytorynга i upravleniya inzhenernyy systemamy zdaniy i sooruzheniy. Obshhiye trebovaniya* [Security in emergency situations. Structured monitoring system and management of buildings and constructions' engineering systems. General requirements]. Moscow, Standartinform Publ., 2005. (In Russian)

13. Bely A. A., Dolynskiy K. Y. & Osadchiy G. V. Systema monitoringa inzhenernykh konstruktсий pry stroitelstve tonnelya pod rekoy Smolenka (g. Sankt-Peterburg) [Engineering constructions' monitoring system during the construction of Smolenka subfluvial tunnel (St. Petersburg)]. *Geotekhnika*. Moscow, LC "Geomarketing" Publ., 2016, no. 2, pp. 18–27. (In Russian)

14. Benin A. V., Dyachenko L. K. & Smyrnov V. N. Osobennosty proyektirovaniya i stroytelstva vysokoskorostnoy zheleznodorozhnoy magystraly "Moskva–Kazan" [Design and construction specificities of "Moscow–Kazan" high-speed mainline road]. *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2015, issue 4 (45), pp. 15–20. (In Russian)

15. Bondar N. G., Kozmyn Y. G., Roitburd Z. G. et al. *Vzaimodeystviye zheleznodorozhnykh mostov s podvyzhnym sostavom* [The interaction of railway bridges with the rolling stock]. Moscow, Transport Publ., 1984, 272 p. (In Russian)

16. Smyrnov V. N., Baranovsky A. A., Bogdanov G. I., Vorobyev D. Y., Dyachenko L. K. & Kondratov V. V. *Mosty na vysokoskorostnykh zheleznodorozhnykh magystralyakh* [High-speed mainline railroad bridges]. Saint Petersburg, Petersburg State Transport University Publ., 2015, 274 p. (In Russian)

17. Smyrnov V. N., Dyachenko L. K. & Yevstygneyev Y. A. Rezonansniye kolebaniya proletnykh stroyenyi mostov na vysokoskorostnykh zheleznodorozhnykh magystralyakh [Resonance oscillations of bridge spans on high-speed mainline railroads]. *Noviye tekhnologii v mostostroyenii (ot proshlogo k budushemu)* [New technologies in bridge engineering (from past to future)]. *Coll. Papers of International scientific and technical conference*. Saint Petersburg, Petersburg State Transport University Publ., 2015, pp. 67–74. (In Russian)

18. Chyzhov S. V., Yakhshyjev E. T. & Dyachenko L. K. Otsenka bezopasnosti mostov s uchetom dy-

namycheskogo faktora nadezhnosti [Safety evaluation of bridges allowing for dynamical reliability factor]. *Proceedings of Petersburg Transport University*, Petersburg State Transport University Publ., 2016, issue 2 (47), pp. 247–254. (In Russian)

19. Dyachenko L. K. Dynamicheskiye raschety proletnykh stroyenyi mostov VSM pry dvyzhenii passazhyrskyykh poyezdov so skorostyu do 400 km/ch [Dynamic analysis of high-speed network bridge spans during passenger trains movement at a speed of 400 km per hour]. *Noviye tekhnologii v mostostroyenii (ot proshlogo k budushemu)* [New technologies in bridge engineering (from past to future)]. *Coll. Papers of International scientific and technical conference*. Saint Petersburg, Petersburg State Transport University Publ., 2015, pp. 91–97. (In Russian)

20. Spetsialniye tekhnicheskiye usloviya "Sooruzheniya iskusstvenniye uchastka Moskva–Kazan vysokoskorostnoy zheleznodorozhnoy magystraly "Moskva–Kazan–Yekaterinburg" [Special regulations "Engineering structures of Moscow–Kazan section of high-speed mainline railroad "Moscow–Kazan–Yekaterinburg"]. *Tekhnicheskiye normy i trebovaniya k proyektirovaniyu i stroitelstvu* [Technical norms and regulations on planning and building]. Saint Petersburg, 2014. (In Russian)

21. Smyrnov V. N. & Beshliu V. A. Faktory, vliyayushkiye na usyliya v relsakh besстыkovogo puty na mostakh vysokoskorostnykh zheleznodorozhnykh magystraley [Factors influencing the stress in railing of long-welded rails on bridges of high-speed main lines]. *Industrial and civil engineering*, 2011, no. 5, pp. 32–34. (In Russian)

22. Smyrnov V. N. *Vzaimodeystviye besстыkovogo puty s mostovymy sooruzheniyamy na vysokoskorostnykh magystralyakh* [Long-welded rails and bridge constructions interaction on high-speed main lines]. Moscow, Learning and teaching educational centre of railway transport Publ., 2015, 96 p. (In Russian)

23. Muragyna A. O. & Muragyna Y. O. Besballastnoye mostovoye polotno na vysokoskorostnykh magystralyakh [Ballastless deck on high-speed main lines]. *Noviye tekhnologii v mostostroyenii (ot proshlogo k budushemu)* [New technologies in bridge engineering (from past to future)]. *Coll. Papers of International scientific and technical conference*. Saint Pe-

- tersburg, Petersburg State Transport University Publ., 2015, pp. 91–93. (In Russian)
24. Vasiliyev A. I. *Potrebytelskiye svoystva mostov* [Consumer properties of bridges]. *Voprosy normirovaniya potrebytelskykh svoystv mostov* [Consumer properties of bridges' standardization issues]. Moscow, PC "TsNIIS" Publ., 2002, pp. 8–23. (In Russian)

\*БЕЛЫЙ Андрей Анатольевич – канд. техн. наук, доцент, [andbeliy@mail.ru](mailto:andbeliy@mail.ru); БАРАНОВСКИЙ Алексей Анатольевич – доцент, [balexspb@yandex.ru](mailto:balexspb@yandex.ru); ВОРОБЬЕВ Дмитрий Евгеньевич – заведующий мостовой лабораторией, [most-lab@yandex.ru](mailto:most-lab@yandex.ru) (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I); ДОЛИНСКИЙ Кирилл Юрьевич – заместитель генерального директора, [kdmonitoring@mail.ru](mailto:kdmonitoring@mail.ru) (ЗАО НТЦ «Мониторинг мостов»); ДЬЯЧЕНКО Леонид Константинович – ассистент, [leonid\\_dyachenko@mail.ru](mailto:leonid_dyachenko@mail.ru); ОСАДЧИЙ Герман Владимирович – ассистент, [osgerman@mail.ru](mailto:osgerman@mail.ru) (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 625.14

**В. В. Говоров, Н. Н. Султанов, М. С. Чусовитин****УНИВЕРСАЛЬНЫЙ МЕТОД ОЦЕНКИ ПРОЧНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ  
ВЕРХНЕГО СТРОЕНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ НА ОСНОВЕ  
РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ БАЛКИ НА УПРУГОМ ОСНОВАНИИ**

Дата поступления: 16.01.2017

Решение о публикации: 24.04.2017

**Аннотация**

**Цель:** Разработать универсальный метод расчета элементов верхнего строения железнодорожного пути на прочность, учитывающий переменное сечение элементов и форму основания. В основе метода предусмотреть графо-аналитическую модель расчета характеристик напряженно-деформированного состояния балки на упругом основании. **Методы:** Использован графо-аналитический метод для определения характеристик напряженно-деформированного состояния балки на упругом основании. Данный метод является альтернативным по отношению к наиболее распространенному теоретическому расчету, в котором за основу было принято основное уравнение изогнутой оси балки и далее из него методом последовательного интегрирования можно получить любую характеристику напряженно-деформированного состояния балки на упругом основании. **Результаты:** Разработан универсальный графо-аналитический метод, принимающий во внимание факторы, вызывающие отступление от идеальной схемы опирания балки на упругое основание, такие как возможность расчета на прочность различных элементов верхнего строения железнодорожного пути, учитывая их переменное сечение (рельсовых подкладок, железобетонных шпал, остряков, крестовин и др.), изменение формы основания, на которые рассчитываемые элементы опираются, а также неравноупругость основания. **Практическая значимость:** Применение такого универсального метода, отступающего от распространенной идеализированной схемы опирания балки на упругом основании, открывает широкие возможности в оценке напряженно-деформированного состояния не только новых путей, на этапе проектирования, но и в процессе их текущего содержания. Использование метода позволяет избежать аналитических громоздких математических исчислений при любой форме изменения поперечного сечения по длине балки, при любой форме основания и вложения значительных расходов денежных средств по сравнению с другими современными методами расчета на прочность, такими как метод конечных элементов, метод конечных разностей, метод конечных объемов.

**Ключевые слова:** Универсальный метод, эпюра, рельсовая подкладка, шпала, прочность, балка.

**Vadym V. Govorov**, D. Sci., professor, vv.govorov@yandex.ru; **Naryman N. Sultanov**, Cand. Sci., mavrikan@yandex.ru; **\*Maksim S. Chusovityn**, postgraduate student, chusmaksimus@mail.ru (Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University) UNIVERSAL METHOD OF TRACK STRUCTURE ELEMENTS' BEARING CAPACITY ASSESSMENT ON THE BASIS OF BEAM ON ELASTIC FOUNDATION SIMULATION MODEL

**Summary**

**Objective:** To develop a universal method of track structure elements' strength analysis, taking into account variable cross-section of elements and the form of foundation. To provide a graph-analytical model of analysis, as the basis of the method, for calculating stress-strain state characteristics of a beam on elastic foundation. **Methods:** Graph-analytical method was used to identify the characteristics of stress-

strain state of a beam on elastic foundation. The method in question is an alternative one, compared to a routine theoretical calculation, the basis of which is a fundamental equation of a bending line and further from this equation, by means of successive integration method, any characteristic of stress-strain state of a beam on elastic foundation can be obtained. **Results:** A universal graph-analytical method was developed, taking into account factors, which cause deviation from a theoretical scheme of a beam bearing on elastic foundation, such as the possibility of calculating different elements of track structure bearing capacity, considering its variable cross-section (sole chairs, ferroconcrete sleepers, tongues, frogs, etc.), foundation form alternation, on which the calculated elements bear, as well as unequal elasticity of foundation. **Practical importance:** Application of such a universal method, which differs from an accepted idealized scheme of a beam bearing on elastic foundation, offers wide perspectives in stress-strain state assessment of not only new tracks, being designed, but also in the process of their current state. Application of the method in question makes it possible to avoid analytical lengthy mathematical calculations with any form of cross-section alternation along the length of a beam, with any form of foundation, as well as heavy expenditures, compared to other modern bearing capacity calculating methods, such as finite element method, finite difference method, and finite volume method.

**Keywords:** Universal method, diagram, chair, sleeper, bearing capacity, beam.

Традиционные методы расчета элементов верхнего строения железнодорожного пути на прочность основываются на ряде предположений и допущений, в их основе закладывается идеальная балка на упругом основании постоянного поперечного сечения на всей длине, опирающаяся на плоское равноупругое основание [1–3].

На самом деле такая идеализированная модель на практике встречается очень редко. Элементы железнодорожного пути (накладки, подкладки, шпалы) имеют поперечное сечение, изменяющееся по длине изделия. Основание этих элементов зависит от физико-механических свойств материалов, и не всегда их упругие свойства остаются постоянными по всей площади опирания элемента железнодорожного пути. Например, форма поперечного сечения железобетонных или металлических шпал не одинакова по длине.

Упругость балластного основания шпал зависит от качества подбивки и степени уплотнения балласта.

В процессе работы рельсовых подкладок, деревянных шпал происходит их смятие, износ, влияющие на условия взаимодействия их с основанием [4].

Современные аналитические методы расчета на прочность, такие как метод конечных

элементов, метод конечных объемов, метод конечных разностей и др., позволяют рассчитать детали любой формы, при любых нагрузках и креплениях, в том числе и элементы верхнего строения железнодорожного пути [5–7].

Метод конечных разностей – это метод формирования алгебраических уравнений, осуществляется на шаблоне, когда топология узла и находящиеся рядом с ним ячейки (элементы) строго заданы. Метод основан на аппроксимации входящих в исходные дифференциальные уравнения производных их дискретными (разностными) аналогами. Несомненными его достоинствами являются большая эффективность и простота реализации, а также наглядность процедуры дискретизации, дающая возможность построения схем высокого порядка точности. Однако эти достоинства реализуются лишь при использовании достаточно «хорошей» регулярной (структурированной) сетки – почти ортогональной и с плавно меняющимися размерами ячеек. Как следствие, большинство приложений метода конечных разностей ограничено случаями сравнительно простых по геометрии расчетных областей [8].

Отправной точкой метода конечных объемов является интегральная формулировка

законов сохранения массы, импульса и т. д., вычисленных по каким-либо квадратурным формулам. Для ячеек с произвольным количеством граней (ребер) формулируются алгебраические соотношения, иногда существенно нелинейные и больше похожие на гидравлические формулы. Известные программные обеспечения, в основе которых лежит данный метод, – FLUENT, ANSYS CFX, NUMECA FINE TURBO, SINF и др. [9]. Применение неструктурированных сеток открывает большие возможности и удобно для пользователя, но требует значительных дополнительных затрат на разработку программного обеспечения, что доступно лишь достаточно крупным компаниям [8].

Метод конечных элементов – это метод формирования алгебраических уравнений на основе матриц элементов. При его использовании исследуемый объект условно разбивается на небольшие части – конечные элементы, вплотную прилегающие друг к другу и шарнирно скрепленные в вершинах между собой. Каждый элемент включает некоторое количество узловых точек [10]. Он лежит в основе таких мощных пакетов программ как ANSYS, NASTRAN и др. [11].

Недостатки метода конечных элементов:

- Расчет тем точнее, чем меньше размер конечных элементов. При слишком больших конечных элементах результат может быть в принципе неверный, несмотря на правильно введенные данные и правильную работу программы. К сожалению, не существует метода, позволяющего заранее предсказать размер конечных элементов, достаточный для получения требуемой точности расчета. Проверка точности осуществляется при помощи повторного расчета с элементами, уменьшенными на 20–30% относительно разбиения на конечные элементы в предыдущем расчете. Если результаты этих расчетов отличаются меньше, чем требуемая погрешность расчета, то можно считать, что расчет правилен в ее пределах; если они отличаются больше, необходимо уменьшать конечные элементы дальше, и трудно сказать до каких пор.

- Время расчета и необходимая память компьютера пропорциональны квадрату количества узлов, поэтому при уменьшении размера элементов может возникнуть ситуация, когда будет недостаточно ресурсов компьютера или ответ получится за чрезмерно долгое время.

- Результаты расчета данных трудно обобщимы. Не видно, от каких параметров зависит результат и насколько сильно. Неясно, что именно и насколько следует изменить для его улучшения. Ответить на все эти вопросы при помощи метода конечных элементов можно посредством нового расчета с иными данными. Изменение данных приходится осуществлять во многом в слепую, что неэффективно [11].

Проанализировав современные методы расчета на прочность, можно сказать, что они отличаются сложностью применения в отрыве от прикладной реализации на компьютере. Данные методы наиболее эффективны при решении сложных задач гидрогазодинамики и теплопередачи, а также задач в области железнодорожного пути, например расчет напряженно-деформированного состояния таких специфических объектов как армогрунтовые конструкции [10]. Тогда оправдываются расходы на разработку и приобретение программного обеспечения, производительных компьютеров, позволяющих вычислять подобные задачи, и подготовку специалистов для работы в данных программах. При расчете простейших конструкций никакие особые преимущества от применения указанных методов мы иметь не будем. Также с аналогичной точностью и эффективностью, что дает метод конечных элементов, для быстрого получения первого результата решения задачи расчета на прочность элементов верхнего строения пути можно применять и графо-аналитический метод расчета.

При разработке универсальной модели балки на упругом основании попытались учитывать факторы, вызывающие отступления от идеальной схемы опирания балки на упругое основание.

За основу метода было принято основное точное уравнение изогнутой оси балки [1, 12, 13]

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{M_z}{E \cdot I_z} \cdot \left[ 1 + \left( \frac{dy}{dx} \right)^2 \right]^{\frac{3}{2}}$$

Запишем его в упрощенной форме, пренебрегая величиной в скобках по сравнению с единицей:

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{M_z}{E \cdot I_z}$$

Из этого уравнения методом последовательного интегрирования можно получить любую характеристику напряженно-деформированного состояния балки на упругом основании [1]:

– поперечная сила:  $Q_i = \int_0^i q dx;$

– изгибающий момент:  $M_i = \int_0^i Q dx;$

– угол поворота:  $\Theta_i = \int_0^i \frac{M dx}{EI(x)};$

– прогиб:  $Y_i = \int_0^i \frac{\Theta dx}{EI(x)}.$

Решение этих уравнений в аналитическом виде приводит к сложным математическим выкладкам [2, 14]. Поэтому воспользуемся графо-аналитическим методом для получения вышеперечисленных зависимостей (рис. 1).

На каждом этапе расчета будем пользоваться графическим изображением не только самой расчетной функции, но и эпюры изменения момента инерции по длине. Это позволяет избежать (аналитических) даже самых громоздких математических исчислений [12] при любой форме изменения поперечного сечения по длине балки.

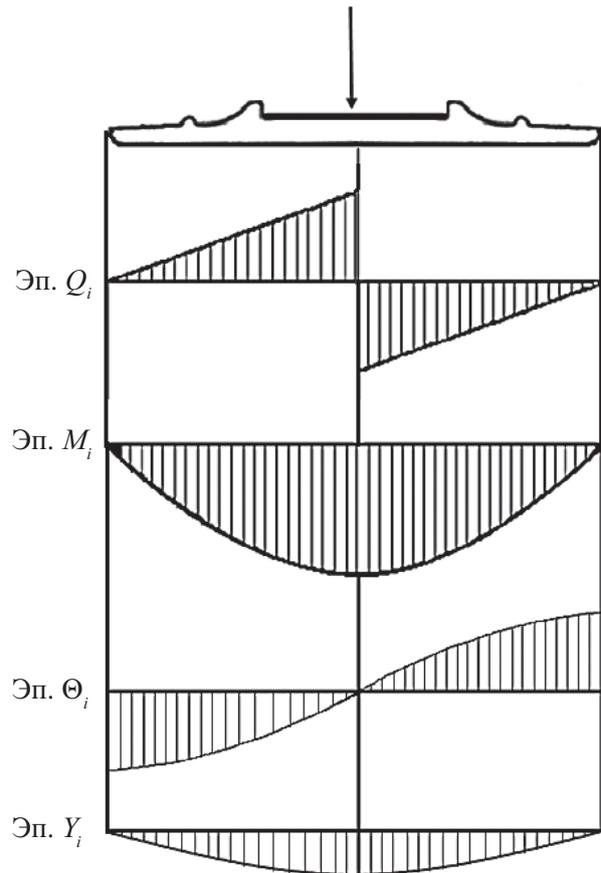


Рис. 1. Построение эпюр для костыльной рельсовой подкладки типа Р65 при допущении, что подкладка – прямоугольная пластина, лежащая на равноупругом основании

Аналогичные упрощения были получены и при расчете прогибов балки. В этом случае расчет балок переменного поперечного сечения практически не отличается по сложности от расчета балок постоянного сечения.

Коэффициент жесткости [15] принимаем в виде такой же эпюры, разбитой участками.

При графо-аналитическом методе расчета аналогичный прием можно использовать на этапе определения прогибов балки и уточнения распределения реактивной нагрузки неравноупругого основания.

Таким образом, преимуществами универсального метода оценки прочности балки на упругом основании являются:

1) расчет элементов верхнего строения железнодорожного пути переменного сечения,

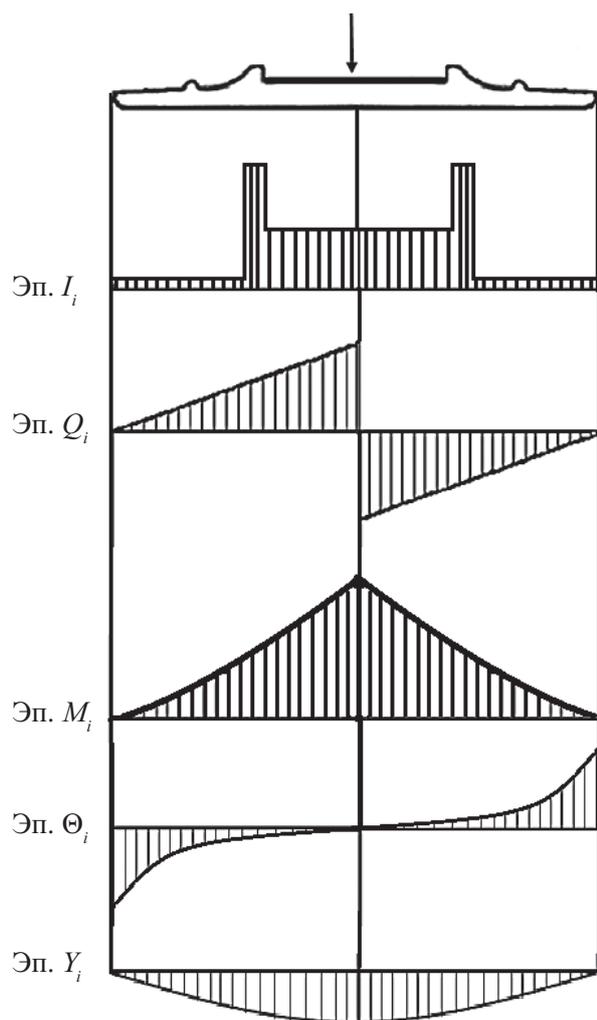


Рис. 2. Построение эпюр для костыльной рельсовой подкладки типа Р65 с учетом геометрических характеристик подкладки, лежащей на равноупругом основании

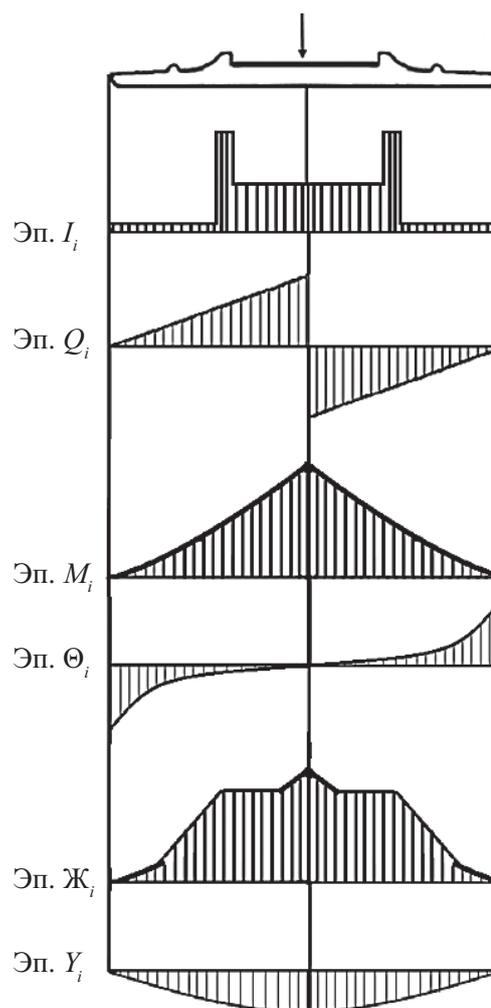


Рис. 3. Построение эпюр для костыльной рельсовой подкладки типа Р65 с учетом геометрических характеристик подкладки и неравноупругости основания

включая рельсовые подкладки, острия, крестовины стрелочных переводов и др. (рис. 2);

2) расчет этих элементов с учетом изменения формы основания, на которые они опираются, например форма износа деревянной шпалы под реальной подкладкой (рис. 3);

3) оценка прочности пути на неравноупругом основании, включая расчет шпал, рельсов, с учетом неравномерности их подбивки;

4) не нужно приобретать дорогостоящее программное обеспечение, компьютерную технику и специально обучать пользователей.

Данный универсальный метод, отступающий от общепринятой идеализированной схе-

мы опирания балки на упругом основании, открывает широкие возможности в оценке напряженно-деформированного состояния не только элементов верхнего строения новых путей, на этапе проектирования, но и в процессе их текущего содержания.

### Библиографический список

1. Шахуняц Г. М. Железнодорожный путь / Г. М. Шахуняц, Т. Г. Яковлева, С. В. Амелин, М. П. Смирнов, В. П. Титов, С. И. Клинов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Транспорт, 1987. – 479 с.

2. Яковлев В. Ф. Путь и путевое хозяйство промышленных железных дорог / В. Ф. Яковлев, Б. А. Евдокимов, В. Е. Парунакян, А. Н. Перцев. – М. : Транспорт, 1990. – 341 с.

3. Яковлева Т. Г. Железнодорожный путь / Т. Г. Яковлева, Н. И. Карпущенко, С. И. Клинов и др. ; под ред. Т. Г. Яковлевой. – М. : Транспорт, 1999. – 405 с.

4. Чусовитин М. С. Испытание рельсовой подкладки на деревянной шпале / М. С. Чусовитин, К. С. Малышев // Изв. Петерб. гос. ун-та путей сообщения. – 2016. – Т. 13, вып. 3 (48). – С. 388–395.

5. Герасимов В. А. Применение метода конечных элементов при анализе высокочастотных измерений на железнодорожных мостах / В. А. Герасимов, В. Я. Лобазов, Б. Е. Резник, А. Н. Саргсян // Геопрофи. – 2011. – Вып. 3. – С. 65–69.

6. Ковеня В. М. Методы конечных разностей и конечных объемов для решения задач математической физики : учеб. пособие / В. М. Ковеня, Д. В. Чирков. – Новосибирск : Новосиб. гос. ун-т, 2013. – 87 с.

7. Овчинников Д. В. Оценка устойчивости бесстыкового пути с помощью метода конечных элементов / Д. В. Овчинников, В. А. Покацкий // Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути : сб. статей IX науч.-технич. конференции с международным участием (г. Москва, 4–5 апреля 2012 г.). – М. : МГУПС, 2012. – С. 206–210.

8. Смиронов Е. М. Метод конечных объемов в приложении к задачам гидрогазодинамики и теплообмена в областях сложной геометрии / Е. М. Смиронов, Д. К. Зайцев // Науч.-технич. ведомости СПбГПУ. – 2004. – Вып. 2. – С. 1–4.

9. Чигарев А. В. ANSYS для инженеров : справ. пособие / А. В. Чигарев. – М. : Машиностроение-1, 2004. – 511 с.

10. Журавлев И. Н. Практическое приложение метода конечных элементов к расчетам напряженно-деформированного состояния армогрунтовых конструкций / И. Н. Журавлев // Бюл. науч. результатов. – 2012. – Вып. 5 (4). – С. 26–33.

11. Уланов А. М. Основы метода конечных элементов / А. М. Уланов. – Самара : СГАУ им. акад. С. П. Королева, 2011. – 19 с.

12. Титов В. П. Перемещения и деформации в конструкциях железнодорожного пути / В. П. Титов // Вестн. ВНИИЖТа. – 1994. – Вып. 6. – С. 8–16.

13. Тихонов А. Н. Дифференциальные уравнения : учебник для вузов. – 4-е изд. / А. Н. Тихонов, А. Б. Васильева, А. Г. Свешников. – М. : Физматлит, 2005. – 253 с.

14. Елизаров С. В. Сопротивление материалов : базовый курс лекций / С. В. Елизаров, Ю. П. Каптелин. – СПб. : ПГУПС, 2007. – 254 с.

15. Розанов А. В. О способе определения коэффициента устойчивости рельсошпальной решетки в горизонтальной плоскости / А. В. Розанов. – М. : Транспорт ; Труды ХИИТа, 1965. – Вып. 71. – С. 21–29.

## References

1. Shakhunyants G. M., Yakovleva T. G., Amelyn S. V., Smyrnov M. P., Tytov V. P. & Klynov S. I. *Zheleznodorozhnyy put [Railway track]*. 3rd ed. Moscow, Transport Publ., 1987, 479 p. (In Russian)

2. Yakovlev V. F., Evdokymov B. A., Parunakyan V. Y. & Pertsev A. N. *Put i putevoye khozyajstvo promyshlennykh zheleznikh dorog [Track and track facilities of industrial railroads]*. Moscow, Transport Publ., 1990, 341 p. (In Russian)

3. Yakovleva T. G., Karpushenko N. I., Klynov S. I. et al. *Zheleznodorozhnyy put [Railway track]*. Moscow, Transport Publ., 1999, 405 p. (In Russian)

4. Chusovytyyn M. S. & Malyshev K. S. *Ispytaniye relsovoy podkladky na derevyannoy shpale [Testing of a chair on a timber sleeper]*. *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2016, vol. 13, issue 3 (48), pp. 388–395. (In Russian)

5. Gerasimov V. A., Lobazov V. Y., Reznik B. Y. & Sargsyan A. N. *Prymeneniye metoda konechnykh elementov pry analyze vysokochastotnykh izmereniy na zheleznodorozhnykh mostakh [Application of finite elements method in the process of high-frequency measurement on railway bridges]*. *Geoprofy*, 2011, issue 3, pp. 65–69. (In Russian)

6. Kovenya V. M. & Chyrkov D. V. *Metody konechnykh raznostey i konechnykh objemov dlya resheniya zadach matematycheskoy fiziki [Finite difference and finite volume methods for the solution of mathematical*

*physics tasks*]. Novosibirsk, Novosibirsk State University Publ., 2013, pp. 70–74. (In Russian)

7. Ovchinnikov D. V. & Pokatskiy V. A. Otsenka ustoychivosty besstykovogo puty s pomoshju metoda konechnykh elementov. Sovremenniye problemy proyektirovaniya, stroitelstva i ekspluatatsii zheleznodorozhnogo puty [Continuous welded rail stability assessment by means of finite elements method application. Modern problems of projection, construction and maintenance of a railway track]. *Sbornik statey IX nauchno-tekhnicheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem [Coll. Papers of IXth scientific and technical conference with international participation (Moscow, April, 4–5<sup>th</sup> 2012)]*. Moscow, MGUPS Publ., 2012, pp. 206–210. (In Russian)

8. Smyronov Y. M. & Zaitsev D. K. Metod konechnykh objemov v prylozhenii k zadacham gidrogazodynamiky i teploobmena v oblastiakh slozhnoy geometrii [Finite volume method application in hydraulic gas dynamics and heat exchange tasks in the sphere of complex geometry]. *Scientific and technical bulletin of Saint Petersburg Polytechnic University*, 2004, issue 2, pp. 1–4. (In Russian)

9. Chygarev A. V. *ANSYS dlya inzhenerov [ANSYS for engineers]*. Moscow, Mashinostroyeniye-1 Publ., 2004, 511 p. (In Russian)

10. Zhuravlev I. N. Prakticheskoye prylozheniye metoda konechnykh elementov k raschetam napry-

azhenno-deformirovannogo sostoyaniya armogruntovykh konstruksiy [Finite element method's practical application in stress-strain state analysis of reinforced ground constructions]. *Research results bulletin*, 2012, issue 5 (4), pp. 26–33. (In Russian)

11. Ulanov A. M. *Osnovy metoda konechnykh elementov [Finite element method foundations]*. Samara, SGAU named after academician S. P. Korolev, 2011, pp. 16–19. (In Russian)

12. Tytov V. P. Peremesheniya i deformatsii v konstruksiyakh zheleznodorozhnogo puty [Shifting and deformations in track constructions]. *VNIIZhT Bulletin*, 1994, issue 6, pp. 8–16. (In Russian)

13. Tykhonov A. N., Vasilyeva A. B. & Sveshnikov A. G. *Differentsialniye uravneniya [Differential equations]*. 4<sup>th</sup> ed. Moscow, Physmatlit Publ., 2005, 253 p. (In Russian)

14. Yelisarov S. V. & Kaptelyn Y. P. *Soprotivleniye materialov: bazoviy kurs lektsiy [Strength of materials: basic course]*. Saint Petersburg, Petersburg State Transport University Publ., 2007, 254 p. (In Russian)

15. Rozanov A. V. *O sposobe opredeleniya koeffitsiyenta ustoychivosty relsoshpalnoy reshetky v goryzontalnoy ploskosti [On estimating the stability coefficient of a track panel in horizontal dimension]*. Moscow, Transport Publ., KhIIT Proceedings Publ., 1965, issue 71, pp. 21–29. (In Russian)

ГОВОРОВ Вадим Владимирович – доктор техн. наук, профессор, vv.govorov@yandex.ru; СУЛТАНОВ Нариман Надимбекович – канд. техн. наук, mavrikan@yandex.ru; \*ЧУСОВИТИН Максим Сергеевич – аспирант, chusmaksimus@mail.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 625.46

**Е. П. Дудкин, В. А. Черняева, С. А. Дороничева, К. А. Смирнов****ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ И КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ  
ТРАМВАЯ НА РЫНКЕ ПАССАЖИРСКИХ ПЕРЕВОЗОК**

Дата поступления: 20.01.2017

Решение о публикации: 24.04.2017

**Аннотация**

**Цель:** Обоснование перечня мероприятий, позволяющих повысить конкурентоспособность и эффективность трамвая на рынке транспортных услуг. Транспорт – один из важнейших компонентов общественного и экономического развития города, поглощающий значительное количество ресурсов. В настоящее время вопрос комплексного развития городского пассажирского транспорта актуален как в России, так и за рубежом. Для большинства городов основными видами городского транспорта являются: метрополитен, трамвай, троллейбус и автобус. В последние годы трамвай не только восстанавливает, но и завоевывает все большее значение в транспортных системах городов. Значительный опыт использования трамвая подтвердил его рентабельность, высокую провозную способность и возможность достижения больших скоростей, а применение современных конструкций пути с внедрением новейших технологий для снижения шума и вибрации увеличивает не только эстетическую привлекательность для жителей городов, но и снижает воздействие на экологические системы. **Методы:** Приняв за основу существующие методы обоснования эффективности капитальных вложений, предложена методика, позволяющая учесть различные факторы при обосновании эффективности инвестиций в строительство новых и развитие действующих объектов инфраструктуры городского рельсового транспорта, в частности трамвая. Основной концепцией, заложенной в методику, является определение эффективности капитальных вложений при проектировании развития существующих и строительства новых линий городского транспорта на основе их всесторонней технико-экономической оценки, проводимой с точки зрения капитальных, эксплуатационных затрат, значимых социально-экономических, экологических эффектов и потерь, возникающих в период строительства и эксплуатации объектов транспортной инфраструктуры. **Результаты:** Обоснованы основные направления повышения конкурентоспособности и эффективности модернизации существующих и строительства новых линий трамвая в городах. **Практическая значимость:** Определение реальных сфер использования трамвая повышает экономическую эффективность и социальную привлекательность городского транспорта.

**Ключевые слова:** Городской пассажирский транспорт, трамвай, эффективность капитальных вложений, специальные прирельсовые вкладыши, шум, вибрация.

**Yevgeniy P. Dudkyn**, D. Sci., professor; **Viktoriya A. Chernyayeva**, Cand. Sci., associate professor, chernyayeva@pgups.ru; **\*Svetlana A. Doronycheva**, postgraduate student, 92.lana@mail.ru; **Kirill A. Smyrnov**, master, gmiryk\_kirill@mail.ru (Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport university) TRAM'S EFFICIENCY AND COMPETITIVENESS INCREASE ON PASSENGER MARKET

**Summary**

**Objective:** To justify a list of measures, allowing for the increase of tram's competitiveness and efficiency on a transportation services' market. Transport is one of the key elements of city's social and economic development, consuming a considerable amount of resources. At present, the issue of municipal passenger

complex development is topical, both in Russia and abroad. For a majority of cities the main types of urban transport are: a subway, a tram, a trolleybus and a bus. In recent years, a tram does not only restore, but also wins one's way in urban transport systems. Vast experience of tram's application has justified its profitability, high carrying capacity and the ability and possibility to achieve higher speeds; moreover, modern track design application with adoption of most recent technologies of noise and jittering reduction increases residents' attraction from an aesthetic point of view and also decreases a detrimental impact on ecosystems. **Methods:** Having taken the present methods of capital efficiency as a basis for the research, a methodology has been suggested, taking into account different factors when justifying capital efficiency in the construction of new and the development of the existing municipal facilities of railroad transport, particularly, a tram. The key concept, built into the methodology in question, is the assessment of capital efficiency in the process of development of the existing and construction of the new lines of municipal transport, on the basis of their in-depth technical and economic assessment, carried from the viewpoint of capital and operational costs, significant social and economic, ecological effects and losses, occurring in the process of construction and maintenance of transportation facilities. **Results:** New methods of increasing the competitiveness and efficiency of modernization of the existing and constructing of the new tram lines in cities were justified. **Practical importance:** The determination of real spheres of trams' usage increases economic efficiency and social attraction of urban transport определение реальных сфер использования трамвая повышает экономическую эффективность и социальную привлекательность городского транспорта.

**Keywords:** Municipal passenger transport, tram, capital efficiency, specialized fillers adjacent to a railway line, noise, jittering.

## Введение

Мировые тенденции предполагают восстановление трамвая в различных его вариациях: наземный уличный, эстакадный, скоростной, междугородный, система трамвай–железная дорога и т. д. Развитие трамвая идет по пути создания линий, позволяющих полностью реализовать динамические качества нового подвижного состава и обеспечить следование подвижного состава с высокими скоростями [1–3]. Трамвай – единственный вид наземного пассажирского транспорта, который технологически в состоянии обеспечить в зонах плотной городской застройки значительные объемы перевозок при разумных затратах на инвестиции и эксплуатацию. Признав приоритетность развития трамвая в городах, необходимо разрабатывать и осуществлять меры, повышающие его конкурентоспособность по всем направлениям, в том числе и по снижению негативного влияния на окружающую среду. Создание современных конструкций трамвайных путей требует применения таких

конструктивных элементов, которые не только увеличивают экономическую эффективность конструкций, но и существенно понижают негативное воздействие на окружающую среду, в частности вибрацию и шум при взаимодействии пути и подвижного состава.

## Основные положения оценки эффективности инвестиций при модернизации существующих и строительстве новых линий трамвая

Европейский опыт обоснования эффективности строительства новых и развития существующих линий городского транспорта также направлен на разработку и внедрение комплексных стратегий с учетом экономических, социальных и экологических взаимосвязей, поощрение и обеспечение устойчивых, дружественных к экологии и энергоэффективных мероприятий для городского транспорта. В нашей стране в 1970–1980-е

годы эффективность использования различных видов транспорта определяли согласно типовой методике определения экономической эффективности капитальных вложений и новой технике, т. е. только по приведенным строительно-эксплуатационным затратам. Дополнительные факторы не учитывались, так как носили качественный характер.

Для решения многокритериальной задачи оценки эффективности инвестиций в различные мероприятия по повышению конкурентоспособности трамвая могут применяться разные методики. В частности, уже устоявшиеся подходы к проведению технико-экономического обоснования, основанные на расчете разных показателей эффективности инвестиционных проектов, позволяющие учитывать социально-экономические и экологические аспекты проведения разнообразных мероприятий при переводе возникающих эффектов или ущербов к денежному эквиваленту [4]. В настоящее время обоснование эффективности мероприятий по повышению конкурентоспособности трамвая можно осуществлять, руководствуясь «Методическими рекомендациями по оценке эффективности инвестиционных проектов» [5].

Учитывая зарубежный и отечественный опыт, а также приняв за основу существующие подходы к обоснованию эффективности капитальных вложений, авторами предложена методика, позволяющая принимать во внимание разные факторы (экономические, экологические и социальные) при обосновании эффективности капитальных вложений в строительство новых и развитие существующих объектов инфраструктуры городского рельсового транспорта, в частности трамвая.

Концепцией, заложенной в основу методики, является определение эффективности капитальных вложений при проектировании развития существующих и строительства новых линий городского транспорта на базе их всесторонней технико-экономической оценки, проводимой с точки зрения капитальных, эксплуатационных затрат, значимых социально-экономических, экологических эффектов и

потерь, возникающих в период строительства и эксплуатации объектов инфраструктуры. При этом должно обеспечиваться полное соответствие всем действующим техническим регламентам, национальным и межгосударственным стандартам, руководящим документам и рекомендациям.

Согласно «Методическим рекомендациям по оценке эффективности инвестиционных проектов» [5], для оценки эффективности мероприятий рекомендуется использовать показатели сравнительной эффективности, которые дают возможность выбрать наиболее рациональное решение из числа анализируемых вариантов при учете только изменяющихся по вариантам частей затрат и результатов, что снижает трудоемкость оптимизации решения.

Для решения рассматриваемой задачи в качестве критерия оценки сравнительной эффективности можно принять минимальное значение показателя интегральных дисконтированных затрат (ДЗ), которое определяют по следующей формуле:

$$\begin{aligned} \text{ДЗ}_v = & \sum_{t=1}^T \sum_{t=1}^{t_v} K(1+E)^{-(t-1)} + \\ & + \sum_{t=1}^T \text{ОП}_t(1+E)^{-(t-1)} + \sum_{t=t_v}^T C_t(1+E)^{-(t-1)} + \\ & + \sum_{t=t_v}^T K_{ii}(1+E)^{-(t-1)} - \sum_{t=t_v}^T \Theta_t(1+E)^{-(t-1)} - \\ & - \sum_{t=t_v}^T D_t(1+E)^{-(t-1)} + \sum_{t=1}^T Y_t(1+E)^{-(t-1)}, \end{aligned}$$

где  $v$  – порядковый номер рассматриваемого варианта;  $K$  – капитальные затраты, учитываемые при оценке сравнительной эффективности, млн руб.;  $\text{ОП}_t$  – операционные потери в период выполнения строительных, ремонтных работ, млн руб.;  $C_t$  – затраты на содержание, млн руб.;  $K_{ii}$  – затраты на осуществление  $i$ -го ремонта, млн руб.;  $\Theta_t$  – социально-экономический эффект, млн руб.;  $Y_t$  – экологический ущерб, млн руб.;  $D_t$  – доходы транспортных предприятий, млн руб.;  $T$  – расчет-

ный период, год;  $t$  – порядковый номер шага расчетного периода;  $t_v$  – срок строительства сравниваемых вариантов, год;  $i$  – порядковый номер ремонта ( $i = 1, \dots, k$ );  $E$  – безрисковая социальная норма дисконта в относительных единицах измерения.

### **Определение основных направлений повышения конкурентоспособности и эффективности трамвая на рынке пассажирских перевозок**

Проведя анализ математической модели оценки эффективности мероприятий по строительству новых и модернизации существующих линий трамвая, с целью повышения его конкурентоспособности на рынке транспортных услуг, можно выделить ряд направлений, позволяющих повысить его эффективность и конкурентоспособность: снижение капитальных и эксплуатационных затрат, понижение дополнительных капитальных вложений, направленных на уменьшение негативного влияния на экологические системы города, увеличение дохода транспортных предприятий и социально-экономического эффекта.

Длительное время трамвай считался одним из самых основных источников шума и вибрации, а с учетом значительной стоимости инфраструктуры трамвая и одним из самых дорогих. Однако современные конструктивные решения как ходовых частей трамвая, так и элементов конструкции трамвайных путей привели к значительному изменению ситуации в пользу трамвайного сообщения.

Шумность трамвая – следствие неудовлетворительного состояния путей и некачественного ремонта подвижного состава. Внешний шум трамвая при движении по путям на щебеночной засыпке со скоростью 40 км/ч на расстоянии 7,5 м от рельсов и высоте над рельсами 1,25 м составляет 81 дБА, а при скорости 60 км/ч – 86 дБА. Если между рельсами применено асфальтовое покрытие, то уровни шума трамвая при скорости 40 км/ч составляют 87 дБА, а при скорости 60 км/ч – 91 дБА.

Во время движения трамвая по бетонному мосту уровни шума в среднем возрастают на 4 дБА.

В Финляндии количество людей, на организм которых оказывает негативное воздействие шум, оценивается по следующей схеме:

- шумовое воздействие 55–65 дБА окажет воздействие на 33 % населения;
- шумовое воздействие 65–70 дБА окажет воздействие на 50 % населения;
- шумовое воздействие свыше 70 дБА окажет воздействие на 100 % населения.

При использовании финской модели (или аналогичной шведской) оценка шумового загрязнения выполняется таким образом: 1) определяется количество людей, проживающих в зоне шумового загрязнения; 2) рассчитываются затраты, являющиеся следствием снижения производительности и ухудшения здоровья из расчета 5000 финских марок на 1 человека в год. Учитывая этот фактор при планировании, можно оценить экономическое влияние шумового загрязнения от проекта, запланированного к осуществлению в густонаселенном районе.

Таким же образом можно вычислить экономическую прибыль от проведения мероприятий по снижению уровня шума.

Защита среды обитания от негативного воздействия трамвая может быть пассивной и активной. В первом случае это меры, осуществляемые для защиты объектов от неотвратимо возникающих (состоявшихся) факторов воздействия (шумозащитные экраны, защитные посадки деревьев и т. п.), во втором – меры, позволяющие уменьшить количественную характеристику воздействия или исключить ее вообще за счет существенных изменений, относящихся непосредственно к источнику (изменение в конструкциях подвижного состава, дорожных и путевых устройств), а также замена источника воздействия, реализация принципа приоритетности развития видов транспорта.

В качестве пассивных методов для уменьшения уровня шума можно применять шу-

мозаичные экраны. Стоимость конструкции из ПВХ зависит от высоты ограждения и сложности монтажных работ. В основном используются экраны высотой от 2 до 3,5 м. Для снижения уровня шума на 5–7 дБА необходимо устройство экранов, установка которых с одной стороны трамвайного пути обходится около 15 млн руб./км с учетом затрат на материалы (полотно и стойки), устройство фундаментов и цоколя.

В качестве активных методов уменьшения негативного воздействия трамвая на окружающую среду [6–8], в частности понижение шума и вибрации в источнике образования «трамвайный путь–колесо», возможно выделить следующие способы:

- шлифование поверхности рельсов. С его помощью устраняются неровности в виде волнообразного износа, влияющие на интенсивность шума качения;
- звукоизоляция, вибродемпфирование и виброизоляция рельса за счет применения подошвенных и боковых профилей;
- лубрикация стрелочных переводов и кривых малых радиусов с целью снижения интенсивности износа, уровня шума и вибраций [9].

Основным методом, влияющим непосредственно на источник шума, является использование вкладышей двух видов: подошвенные, предназначенные для установки под подошву рельса, и боковые (наружные и внутренние) для установки в пазухи рельсов при укладке нового пути или ремонте старого. Они служат для фиксации рельса, погашения шумов, вибрации рельса и для предотвращения разрушения примыкающего дорожного покрытия. Преимущества использования упругих элементов – значительное снижение шума и вибрации, что повышает комфортность поездов, а также проживание в близлежащих зданиях [10]. Применение длинномерных элементов увеличивает производительность труда, что влечет сокращение сроков и стоимости работ.

Вкладыши должны обладать следующими свойствами: водонепроницаемостью, демп-

фированием колебаний, эластичностью, жаропрочностью, устойчивостью к коррозии и противогололедным реагентам.

Специалистами ФГБОУ ВО ПГУПС разработана конструкция укладки трамвайных рельсов с упругими элементами на монолитном основании, представляющая собой весьма эффективное мероприятие по защите от шума и вибраций. Она позволяет существенно снизить вибрационные нагрузки за счет сплошной укладки упругих элементов, создает оптимальную линию прогиба рельса, тем самым повышая общий срок службы трамвайных путей. Упругие элементы должны изготавливаться не из резины [11,12], так как это устаревший материал, а из специальных полимеров. Благодаря этой конструкции, можно достичь снижения уровня шума на 5–7 дБА.

Помимо понижения уровня шума применение современных конструкций трамвайных путей на монолитном железобетонном и фибробетонном основаниях позволяют значительно уменьшить суммарные капитальные и эксплуатационные затраты за период жизненного цикла конструкций [8].

### **Оценка экономической эффективности применения современных конструкций трамвайных путей на монолитном основании с использованием специальных прирельсовых вкладышей**

Для оценки экономической эффективности применения современных конструкций трамвайных путей на монолитном основании с использованием специальных прирельсовых вкладышей предлагается сравнить два варианта мероприятий по повышению эффективности и конкурентоспособности трамвая:

первый – конструкция на монолитном основании из фибробетона, рельсы РТ62, изолированы специальными вкладышами;

второй – конструкция на деревянном шпальном основании, рельсы РТ62, с покры-

тием железобетонными плитами с устройством шумозащитных экранов [13].

Сравнение производится с базовым вариантом, в качестве которого принята конструкция трамвайного пути на деревянном шпальном основании, изолированными специальными вкладышами, рельсами типа РТ62 с покрытием из железобетонных плит [14, 15].

Полученные результаты позволили сделать следующие выводы:

1) величина интегральных дисконтированных затрат по базовому варианту составила 48,8 млн руб., по первому – 46,2 млн руб., по второму – 78,8 млн руб.;

2) при реализации мероприятий по повышению конкурентоспособности трамвая, в частности понижения шума на 5–7 дБА, снижения эксплуатационных затрат за период жизненного цикла, с помощью применения современных конструкций трамвайных путей на монолитном основании из фибробетона эффективность трамвая по сравнению с базовым вариантом повышается (интегральные дисконтированные затраты уменьшаются на 2,6 млн руб.);

3) при реализации мероприятий по повышению конкурентоспособности трамвая, в частности снижения шума на 5–7 дБА с помощью применения шумозащитных экранов, эффективность использования трамвая по сравнению с базовым вариантом уменьшается (интегральные дисконтированные затраты увеличиваются на 30 млн руб.).

Современные конструкции трамвайных путей на монолитном основании из фибробетона наиболее эффективны для повышения конкурентоспособности трамвая на рынке пассажирских перевозок (разница в величине интегральных дисконтированных затрат по первому и второму вариантам составила 32,6 млн руб.).

## Библиографический список

1. Дудкин Е. П. Проблемы охраны труда и геоэкологической опасности городского транспорта / Е. П. Дудкин, В. А. Черняева // Технологии техносферной безопасности. Науч. интернет-журн. – 2014. – № 1 (53). – С. 29.
2. Дудкин Е. П. Основные аспекты проектирования систем рельсового транспорта в городах / Е. П. Дудкин, В. А. Черняева, С. А. Доронищева // Современные проблемы транспортного комплекса России. – 2016. – Т. 6, № 1 (7). – С. 38–43.
3. Черняева В. А. Роль рельсового транспорта в обеспечении городских пассажирских перевозок / В. А. Черняева // Проблемы инфраструктуры транспортного комплекса : материалы Междунар. науч.-технич. конференции. – СПб., 2015. – С. 218–222.
4. Колос А. Ф. Технико-экономическое обоснование выбора рациональных конструкций земляного полотна автомобильных дорог на слабых основаниях / А. Ф. Колос, В. А. Черняева // Проблемы инфраструктуры транспортного комплекса : материалы Междунар. науч.-технич. конф. – СПб., 2015. – С. 102–108.
5. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов (вторая редакция). – М. : Экономика, 2000. – 20 с.
6. Титова Т. С. Использование в строительстве автоклавного шумозащитного пенобетона / Т. С. Титова, Е. И. Макарова, Е. П. Дудкин // Технологии техносферной безопасности. Науч. интернет-журн. – 2014. – № 2 (54). – С. 35.
7. Султанов Н. Н. Технико-экономическое обоснование перспективных конструкций трамвайных путей : канд. дис. / Н. Н. Султанов. – СПб., 2015. – 17 с.
8. Дудкин Е. П. Использование фибробетона в конструкции трамвайных путей / Е. П. Дудкин, Ю. Г. Параскевопуло Н. Н. Султанов // Транспорт Российской Федерации. – 2012. – № 3–4 (40–41). – С. 77–79.
9. Левадная Н. В. Рациональные меры и средства снижения городского шума / Н. В. Левадная, В. А. Черняева // Транспорт Российской Федерации. – 2013. – № 4 (53). – С. 76–78.
10. Обервайгер Г. Опыт разработки и эксплуатации безбалластного пути / Г. Обервайгер // Железные дороги мира. – 2005. – № 1. – С. 47–49.
11. ТУ 253900203222089–2011. «Профили резиновые боковые для рельсов трамвайных путей». – СПб. : ПГУПС, 2011.

12. ТУ 253900103222089–2011. «Профили резиновые подошвенные для рельсов трамвайных путей. – СПб. : ПГУПС, 2011.

13. Дудкин Е. П. Городской рельсовый транспорт: инновационные конструкции трамвайного пути на выделенном полотне / Е. П. Дудкин, Ю. Г. Параскевопуло, Н. Н. Султанов, Г. Ю. Параскевопуло // Транспорт Российской Федерации. – 2013. – № 4 (47). – С. 51–54.

14. СН 2.2.4/2.1.8.566–96. «Производственная вибрация, вибрация в помещениях жилых и общественных зданий». – М., 1996.

15. СН 2.2.4/2.1.8.562–96. «Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки». – М., 1996.

## References

1. Dudkyn Y. P. & Chernyayeva V. A. Problemy okhrany truda i geokologicheskoy opasnosti gorodskogo transporta [Issues of labour protection and geoeological danger of urban transport]. *Technologies of technosphere safety*, 2014, no. 1 (53), p. 29. (In Russian)

2. Dudkyn Y. P., Chernyayeva V. A. & Doronycheva S. A. Osnovniye aspekty proyektirovaniya system relsovogo transporta v gorodakh [Key aspects of rail transport system designing in cities]. *Modern issues of transport system of the Russian Federation*. Saint Petersburg, 2016, vol. 6, no. 1 (7), pp. 38–43. (In Russian)

3. Chernyayeva V. A. Rol relsovogo transporta v obespechenii gorodskikh passazhyrskikh perevozk. Problemy infrastruktury transportnogo kompleksa [The role of railway transport in city passenger traffic. Problems of transport system's infrastructure]. *Materialy mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii [Materials of international scientific and technical conference]*. Saint Petersburg, 2015, pp. 218–222. (In Russian)

4. Kolos A. F. & Chernyayeva V. A. Tekhniko-ekonomicheskoye obosnovaniye vybora ratsionalnykh konstruksiy zemlyanogo polotna avtomobylnykh dorog na slabykh osnovaniyakh. *Problemy infrastruktury transportnogo kompleksa [Technical and economic justification of choosing earth roadbed rational design*

*of highways on a weak base. Problems of transport system's infrastructure]*. *Materials of international scientific and technical conference*. Saint Petersburg, 2015, pp. 102–108. (In Russian)

5. *Metodycheskiye rekomendatsii po otsenke effektivnosti investitsionnykh proyektov. Vtoraya redaktsiya [Guidelines on assessing the efficiency of investment projects]*. Moscow, Ekonomika Publ., 2000, 20 p. (In Russian)

6. Tytova T. S., Makarova Y. I. & Dudkyn Y. P. Ispolzovaniye v stroitelstve avtoklavnogo shumozashytnogo penobetona [Application of autoclave antinoise foam concrete in construction]. *Tekhnologii tekhnosfernoy bezopasnosti [Technologies of technosphere safety]*, 2014, no. 2 (54), p. 35 (In Russian)

7. Sultanov N. N. *Tekhniko-ekonomicheskoye obosnovaniye perspektivnykh konstruksiy tramvaynykh putey [Technical and economic justification of future-proof design of car track lines]*. Cand. Diss. Saint Petersburg, 2015, 17 p. (In Russian)

8. Dudkyn Y. P., Paraskovopulo Y. G. & Sultanov N. N. Ispolzovaniye fyfrobetona v konstruksii tramvaynykh putey [Fibrous concrete application in a car track line construction]. *Transport of the Russian Federation*, 2012, no. 3–4 (40–41), pp. 77–79. (In Russian)

9. Levadnaya N. V. & Chernyayeva V. A. Ratsionalniye mery i sredstva snyzheniya gorodskogo shuma [Rational measures and means for urban noise reduction]. *Transport of the Russian Federation*, 2013, no. 4 (53), pp. 76–78. (In Russian)

10. Oberveiger G. Opyt razrabotky i ekspluatatsii bezballastnogo puty [The experience of development and maintenance of a ballastless track]. *The World railroads*, 2005, no. 1, pp. 47–49. (In Russian)

11. ТУ 2539-00203222089–2011. «Профили резиновые боковые для рельсов трамвайных путей» [Technical specifications 2539-00203222089–2011. “Rubber side profiles for car track lines' rails”]. Saint Petersburg, Saint Petersburg State Transport University Publ., 2011. (In Russian)

12. ТУ 2539-001-03222089–2011. «Профили резиновые подошвенные для рельсов трамвайных путей» [Technical specifications 2539-001-03222089–2011. “Rubber sole profiles for car track lines' rails”]. Saint Petersburg, Saint Petersburg State Transport University Publ., 2011. (In Russian)

13. Dudkyn Y. P., Paraskevopulo Y. G. & Sultanov N. N. Gorodskoy relsoviy transport: innovatsionniye konstruksii tramvainogo puty na vydelennom polotne [City rail transport: innovative constructions of a car track on a selected railway bed]. *Transport of the Russian Federation*, 2013, no. 4 (47), pp. 51–54. (In Russian)

14. SN 2.2.4/2.1.8.566–96. “Proizvodstvennaya vybratsiya, vybratsiya v pomesheniakh zhylykh i obshest-

vennykh zdaniy” [Sanitary regulations 2.2.4/2.1.8.566–96. “Jittering, jittering in living spaces and public buildings”]. Moscow, 1996. (In Russian)

15. SN 2.2.4/2.1.8.562–96. “Shum na rabochnykh mestakh, v pomesheniakh zhylykh, obshestvennykh zdaniy i na terrytorii zhyloy zastroiky” [Sanitary regulations 2.2.4/2.1.8.562–96. “Noise at workplaces, in living spaces, public buildings and on the territory of apartment blocks”]. Moscow, 1996. (In Russian)

ДУДКИН Евгений Павлович – доктор техн. наук, профессор; ЧЕРНЯЕВА Виктория Андреевна – канд. техн. наук, доцент, chernyaeva@pgups.ru; \*ДОРОНИЧЕВА Светлана Андреевна – аспирант, 92.lana@mail.ru; СМIRНОВ Кирилл Александрович – магистрант, gmiryk\_kirill@mail.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 528.489

**Н. В. Канашин, А. А. Никитчин, Д. А. Афонин****ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ТРЕХМЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ  
ПРИ РЕКОНСТРУКЦИИ МОСТОВ**

Дата поступления: 10.02.2017

Решение о публикации: 10.05.2017

**Аннотация**

**Цель:** Изложение опыта применения трехмерного моделирования мостовых сооружений при их реконструкции на примере Дворцового моста в Санкт-Петербурге. **Методы:** Показано, что одной из возможных областей использования трехмерных моделей мостов являются получение пространственных данных для размещения мостовых конструкций и оборудования, а также анализ положения их основных осей относительно друг друга. Приведена технология приобретения исходных данных для моделирования, суть которой заключалась в комплексном применении наземной сканерной съемки, линейно-угловых измерений электронным тахеометром и измерении превышений цифровым нивелиром. Изложены порядок обработки результатов полевых работ и основные используемые программные продукты – CREDO\_DAT, X-TOOLS, Autodesk AutoCAD. **Результаты:** Созданы трехмерные модели оборудования. **Практическая значимость:** Возможность и удобство применения трехмерных моделей при реконструкции мостовых сооружений. Статья может быть интересна инженерам-проектировщикам мостовых сооружений, а также студентам и аспирантам, изучающим технологию постройки и эксплуатации мостов.

**Ключевые слова:** Мостовое сооружение, съемочная сеть, наземная сканерная съемка, облако точек, трехмерное моделирование.

\***Nikolay V. Kanashyn**, Cand. Sci., associate professor, nikolay\_kanashin@mail.ru; **Andrey A. Nikitchyn**, Cand. Sci., associate professor, anikitchin@gmail.com; **Dmytriy A. Afonyn**, Cand. Sci., associate professor, afonin83@yandex.ru (Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University) THREE-DIMENSIONAL SIMULATION APPLICATION EXPERIENCE IN RECONSTRUCTION OF BRIDGES

**Summary**

**Objective:** To state 3D modeling application experience in bridgeworks reconstruction by the example of Palace Bridge in Saint Petersburg. **Methods:** It was shown that one of the possible spheres of bridge 3D models application was the acquisition of spatial data of bridge constructions and components' arrangement, as well as the analysis of main axis position with respect to each other. The technology of acquiring the initial data for modeling was given, the essence of which is in composite application of surface laser scanning, electronic tacheometer line and angle measurements, and measurement of difference in elevation by digital levelling instrument. Order of processing field evidence was stated, as well as the main used software products – CREDO\_DAT, X-TOOLS, Autodesk AutoCAD. **Results:** Fragments of 3D facility models. **Practical importance:** Opportunity and operability of 3D models application in the process of bridgework reconstruction. The article might be of interest for bridgework design engineers, as well as students and postgraduates, studying the construction and maintenance of bridgeworks.

**Keywords:** Bridgework, survey network, surface scanner mapping, point cloud, three-dimensional simulation.

## Введение

Дворцовый мост в Санкт-Петербурге представляет собой крупное инженерное сооружение, состоящее из пяти пролетов, центральный из которых разводной, быстро раскрывающийся, перекрытый трехшарнирной аркой (рис. 1).

Остальные пролеты перекрывают клепанные неразрезные пролетные строения со сквозными фермами, имеющими нижние криволинейные пояса. Крылья разводного пролета уравновешены за счет противовесов, подвешенных на шарнирах по системе Штрауса к его нижней части. При разводке моста противовесы опускаются в специальные колодцы, предусмотренные в опорах. Масса крыла пролета достигает 700 т, а масса противовесов – 1400 т. Общая длина моста составляет 250 м, а его полезная ширина – 27,7 м. Опоры моста сооружены на кессонных основаниях, опущенных на глубину порядка 25 м. Мост был открыт 23 декабря 1916 г. Учитывая

неудовлетворительное состояние уникальных для своего времени конструкций и механизмов разводных пролетов моста, а также котлованов разводных опор, в 2012 г. была проведена реконструкция сооружения.

Инженерно-геодезические работы при реконструкции моста заключались в съемке опор разводного пролета, включая его внешние элементы и внутреннее пространство со всем оборудованием и механизмами, а также в определении координат контрольных точек оборудования, примыкающего к фермам, относительно осей вращения крыльев. Основной задачей съемки являлось получение геопространственных данных для построения трехмерной модели разводного пролета моста с целью проектирования размещения заменяемого оборудования и механизмов в теле опор.

Учитывая сжатые сроки работ, а также сложность геометрии оборудования и механизмов, подлежащих моделированию, съемку конструкций пролета произвели методом



Рис. 1. Вид на Дворцовый мост со стороны Зимнего дворца

наземного лазерного сканирования. Наземная сканерная съемка в целом в настоящее время достаточно широко применяется при решении прикладных задач (см., например, [1–15]), однако в данном случае учитывался ряд особенностей, которые заключались в необходимости:

- съемки как внешних элементов, так и внутренних конструкций пролета, что вынудило выполнять ее как с обоих берегов р. Невы, так и внутри опор и, как следствие, применять для съемки сканеры разной дальности действия;
- представлении цифровых трехмерных моделей конструкций пролета в местной системе координат Санкт-Петербурга МСК-64 и в Балтийской системе высот 1977 г.;
- выполнения съемки конструкций пролета без закрытия движения по самому мосту.

### **Создание съемочной сети и выполнение съемки на объекте**

Съемочная сеть на объекте была создана в два этапа. На первом этапе с помощью линейно-угловых измерений построили ее каркас в виде геодезического четырехугольника, пункты которого закрепили знаками временного закрепления – дюбелями, забитыми в опоры разводного пролета. Для построения сети на всех ее пунктах установили штативы с закрепленными отражателями, на которые выполняли измерения электронным тахеометром Sokkia Set 530 RK3 способом круговых приемов двумя приемами. Отметки пунктов сети получили геометрическим нивелированием, измерив превышения между всеми ее пунктами по программе геометрического нивелирования IV класса цифровым нивелиром Leica Sprinter.

Уравнивание каркаса сети выполнили в программе CREDO\_DAT 3.12. Для исключения влияния погрешностей исходных данных сеть уравнена в локальной системе координат, где ось абсцисс для удобства направлена вдоль оси моста. Средние квадратические погрешности определения как плановых координат

пунктов каркаса сети, так и их отметок не превысили 1 мм.

Для выполнения съемки произвели ступенчатое сети, для чего с пунктов ее каркаса полярными засечками передали координаты внутрь каждой опоры через их технологические окна и проходы. Засечки выполнены двумя приемами со всех пунктов каркаса. Пункты съемочной сети внутри опор закрепили сканерными марками. Приняв пункты каркаса сети в качестве исходных, уравнили всю съемочную сеть в программе CREDO\_DAT 3.12. Средние квадратические погрешности положения пунктов сети по результатам уравнивания не превысили 5 мм.

После этого обратной линейно-угловой засечкой определили координаты пунктов каркаса сети в местной системе координат. Засечки выполнили полным приемом с каждого пункта каркаса. В качестве исходных пунктов для этого были приняты пункты городской полигонометрии на противоположных берегах Невы, а также выдающие части сооружений города (большой шпиль Петропавловского собора, шпиль телецентра, шпиль здания Адмиралтейства). Уравнивание засечек и пересчет координат всех пунктов сети осуществили в программе CREDO\_DAT 3.12, получив таким образом координаты всех пунктов сети в местной системе координат МСК-64 с погрешностями, не превышающими 6 мм.

Съемку внешних конструктивных элементов опор выполнили наземным лазерным сканером Riegl VZ-400, который устанавливали на пунктах каркаса съемочной сети и на противоположных берегах реки, чтобы обеспечить оптическую видимость с каждой станции наибольшей части снимаемых опор (рис. 2).

Для съемки сканер центрировали с помощью встроенного лазерного центрира и горизонтировали благодаря датчикам наклона оси его вращения. Ориентирование горизонтально круга прибора выполняли обратной линейно-угловой засечкой на сканерные марки, закрепленные на штативах и размещенные на пунктах каркаса съемочной сети.



Рис. 2. Сканерная съемка внешних элементов опор

Съемку внутреннего оборудования и механизмов произвели сканером Z+F IMAGER 5006, устанавливая его в произвольном месте и обеспечивая при этом видимость не менее чем на три пункта съемочной сети, закрепленных внутри опор.

Координаты контрольных точек внутреннего оборудования определили электронным тахеометром относительно пунктов съемочной сети. Наблюдения каждого узла выполнили полярной засечкой одним полным приемом (рис. 3).

### Камеральные работы

На первом этапе камеральной обработки полученные в ходе съемки облака точек импортировали в стандартное программное обеспечение, где провели их взаимное ориентирование. Таким образом построили единую точечную модель опор Дворцового моста. Из этой модели последовательно выбрали ее фрагменты, содержащие элементы механизмов разводной части, внутреннего и внешнего оборудования, которые экспортировали в виде текстовых

файлов с расширением .txt. На втором этапе обработки полученные файлы импортировали в программу Autodesk AutoCAD. Импорт файлов, а также работу с точечными моделями осуществляли с помощью программ Leica Cloud Worx и XTools. Далее стандартным набором функций трехмерного моделирования программы AutoCAD вписали векторные модели в облако точек.

Внутреннее пространство опор моста включает в себя множество повторяющихся элементов: металлические балки различного сортамента, оборудование и механизмы различного назначения и т. д. Их моделировали на основе точечной модели вписыванием в облако точек твердотельных примитивов, созданных по образцу одного из элементов. В пределах конкретного элемента точность построения его твердотельной модели составляет порядка 1–2 см. Для однотипных элементов осуществляли копирование модели в пределах всего набора конструкций и ее вписывание в точечную модель с точностью порядка 3–5 см. Данная величина названа ориентировочно, оценить ее строго невозможно, она обусловлена отклонением размеров, по-



Рис. 3. Определение координат контрольных точек внутреннего оборудования

ложения и формы конкретного элемента конструкции от образца.

Объединив векторные модели элементов, построили трехмерную модель всех опор, их оборудования и механизмов в формате .dwg, фрагменты которой представлены на рис. 4.

### Заключение

Характеризуя опыт выполнения указанной работы в целом, можно отметить, что трехмерное моделирование при проектировании мостов, продолжая оставаться нетривиальной

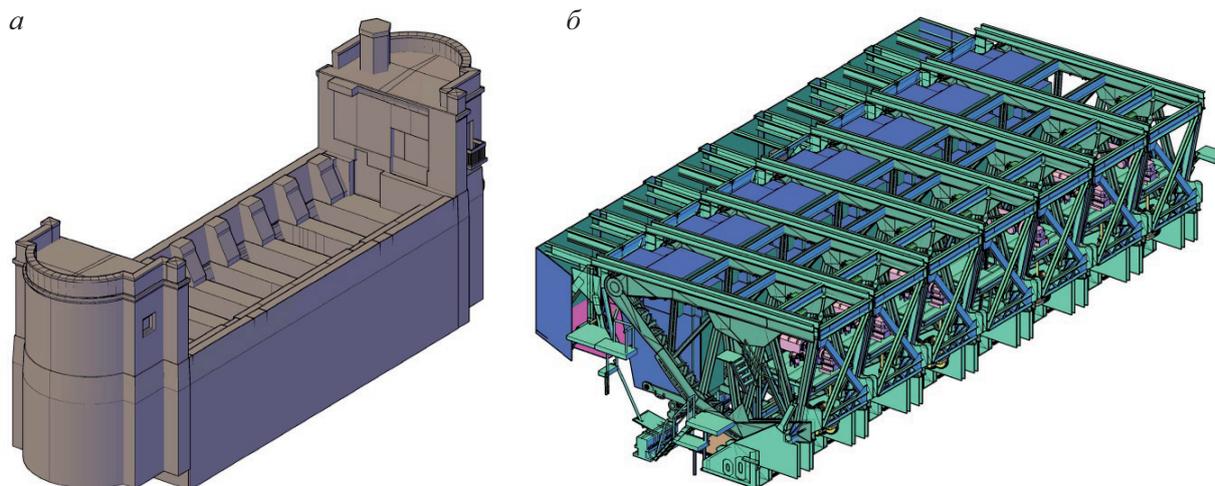


Рис. 4. Трехмерная векторная модель разводного пролета Дворцового моста:  
*а* – модель опоры; *б* – модель внутреннего оборудования

задачей, находит все большее практическое применение, а современные геодезические приборы, технологии и программное обеспечение позволяют успешно и в короткие сроки получать качественную и полную исходную геоинформацию для построения трехмерных моделей сооружений.

### Библиографический список

1. Канашин Н. В. Применение технологии наземного лазерного сканирования для наблюдений за деформациями зданий и сооружений в условиях плотной застройки / Н. В. Канашин // *Современные проблемы инженерной геодезии* : сб. тр. Междунар. науч.-практич. конференции. – 2009. – № 7. – С. 150–156.
2. Середович А. В. Методика топографической съемки застроенных территорий с применением наземного лазерного сканирования / А. В. Середович // *Изв. вузов. Горн. журн.* – 2006. – № 6. – С. 3–8.
3. Канашин Н. В. Опыт применения наземного лазерного сканирования для топографических съемок линейных сооружений / Н. В. Канашин, К. П. Виноградов, Д. И. Степанов // *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва* : зб. наук. пр. – Львів, 2011. – Вып. 2 (22). – С. 147–149.
4. Виноградов К. П. «3D портрет» Шуховской башни / К. П. Виноградов, Д. И. Степанов // *АР-ДИС : Архитектура. Реставрация. Дизайн. Инвестиции. Строительство.* – 2011. – № 3. – С. 74–75.
5. Вальков В. А. Геодезический мониторинг высотных сооружений с применением технологии наземного лазерного сканирования / В. А. Вальков, А. А. Яковлев // *Естественные и технические науки.* – 2015. – № 2. – С. 95–99.
6. Мустафин М. Г. Применение наземного лазерного сканирования для создания трехмерных цифровых моделей Шуховской башни / М. Г. Мустафин, Г. В. Макаров, В. А. Вальков // *Зап. Горн. ин-та.* – 2013. – Т. 204. – С. 58–61.
7. Середович А. В. Выполнение обмеров строительных конструкций средствами наземного лазерного сканирования при обследовании зданий и сооружений / А. В. Середович, А. В. Иванов, А. В. Уси-ков, О. Р. Мифтахудинова // *ГЕО-Сибирь-2011. VII Междунар. науч. конгресс* : сб. материалов : в 6 т. (Новосибирск, 19–29 апреля 2011 г.). – Новосибирск : СГГА, 2011. – Т. 1, ч. 2. – С. 220–221.
8. Середович В. А. Геодезический мониторинг деформаций Усть-Каменогорского судоходного шлюза / В. А. Середович, Г. Н. Ткачева, А. В. Середович // *ИНТЕРЭКСПО ГЕО-Сибирь-2012. VIII Междунар. науч. конгресс, Междунар. науч. конференция «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия»* : сб. материалов : в 3 т. (Новосибирск, 10–20 апреля 2012 г.). – Новосибирск : СГГА, 2012. – Т. 3. – С. 133–139.
9. Горохова Е. И. Проверка внутреннего очертания тоннеля при помощи наземного лазерного сканера / Е. И. Горохова, И. В. Алешина, Е. В. Романович, А. В. Иванов, А. Р. Мифтахудинов // *ИНТЕРЭКСПО ГЕО-Сибирь-2012. VIII Междунар. науч. конгресс, Междунар. науч. конференция «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия»* : сб. материалов : в 3 т. (Новосибирск, 10–20 апреля 2012 г.). – Новосибирск : СГГА, 2012. – Т. 3. – С. 107–114.
10. Иванов А. В. Возможности применения наземного лазерного сканирования для контроля ремонта и строительства дорог / А. В. Иванов, А. В. Середович, Е. В. Романович, О. Р. Мифтахудинова // *ИНТЕРЭКСПО ГЕО-Сибирь-2011. VII Междунар. науч. конгресс* : сб. материалов : в 6 т. (Новосибирск, 19–29 апреля 2011 г.). – Новосибирск : СГГА, 2011. – Т. 1, ч. 2. – С. 210–213.
11. Радзюкевич А. В. Методика лазерного сканирования и пропорционального анализа форм памятника архитектуры (на примере храма Александра Невского в Новосибирске) / А. В. Радзюкевич, М. А. Чернова, В. А. Середович, А. В. Иванов, О. Р. Мифтахудинова // *ИНТЕРЭКСПО ГЕО-Сибирь-2012. VIII Междунар. науч. конгресс, Междунар. науч. конференция «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия»* : сб. материалов : в 3 т. (Новосибирск, 10–20 апреля 2012 г.). – Новосибирск : СГГА, 2012. – Т. 3. – С. 121–133.
12. Антоненко М. В. Перспективы использования данных наземного лазерного сканирования при проведении инженерных изысканий на площадных объектах / М. В. Антоненко, Д. Н. Зименко,

А. В. Погорелов // Нефтяное хозяйство. – 2013. – № 10. – С. 18–20.

13. Ситуха О. А. Определение геометрических параметров элементов опор ЛЭП с использованием наземного лазерного сканирования / О. А. Ситуха, Е. И. Горохова, А. В. Погорелов // ИНТЕРЭКСПО ГЕО-Сибирь-2013. VIII Междунар. науч. конгресс, Междунар. науч. конференция «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия»: сб. материалов : в 3 т. (Новосибирск, 21–23 апреля 2013 г.). – Новосибирск : СГГА, 2013. – Т. 1. – С. 128–133.

14. Кугаевский В. И. Применение наземных лазерных сканеров при фасадных съемках / В. И. Кугаевский // ИНТЕРЭКСПО ГЕО-Сибирь-2013 VIII Междунар. науч. конгресс, Междунар. науч. конференция «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия»: сб. материалов : в 3 т. (Новосибирск, 21–23 апреля 2013 г.). – Новосибирск : СГГА, 2013. – Т. 1. – С. 82–85.

15. Афонин Д. А. Проектирование геометрических параметров наземного лазерного сканирования при контроле деформаций зданий и сооружений в условиях плотной застройки / Д. А. Афонин // Геодезия и картография. – 2013. – № 2. – С. 2–7.

## References

1. Kanashyn N. V. Prymeneniye tekhnologii nazemnogo lazernogo skanyrovaniya dlya nablyudeniya za deformatsiyamy zdaniy i sooruzheniy v usloviyakh plotnoy zastroyky [Application of surface laser scanning technology for monitoring of strains of buildings and constructions in restrained urban conditions]. *Sovremenniyе problemy inzhenernoy geodezii [Modern problems of engineering surveying]. Sbornyk trudov Mezhdunarodnoy nauchno-praktycheskoy konferentsii [Coll. Papers of International theoretical and practical conference]*, 2009, no. 7, pp. 150–156. (In Russian)

2. Seredovich A. V. Metodyka topograficheskoy slyemky zastroyennykh territoriy s prymeneniyem nazemnogo lazernogo skanyrovaniya [The method of topographic surveying of built-over land by means of surface laser scanning]. *News of higher educational institutions, Mines Journal*, 2006, no. 6, pp. 3–8. (In Russian)

3. Kanashyn N. V., Vynogradov K. P. & Stepanov D. I. Opyt prymeneniya nazemnogo lazernogo

skanyrovaniya dlya topograficheskikh slyemok lyneynykh sooruzheniy [Surface laser scanning application experience for topographic surveying of linear structures]. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва: Зб. наук. пр.* Львів, 2011, issue 2 (22), pp. 147–149. (In Russian)

4. Vynogradov K. P. & Stepanov D. I. «3D portret» Shukhovskoy bashny [Shukhov tower “3D portrait”]. *ARDIS. Arkhitektura. Restavratsiya. Dizain. Investitsii. Stroitelstvo [Architecture. Restoration. Design. Investments. Building]*, 2011, no. 3, pp. 74–75. (In Russian)

5. Valkov V. A. & Yakovlev A. A. Geodezycheskiy monitoring vysotnykh sooruzheniy s prymeneniyem nazemnogo lazernogo skanyrovaniya [Geodesic monitoring of high rise structures with surface laser scanning application]. *Natural and technical sciences*, 2015, no. 2, pp. 95–99. (In Russian)

6. Mustafyn M. G., Makarov G. V. & Valkov V. A. Prymeneniye nazemnogo lazernogo skanyrovaniya dlya sozdaniya tryekhmernykh tsyfrovyykh modeley Shukhovskoy bashny [Surface laser scanning application for the creation of Shukhov tower 3D digital model]. *Proceedings of the Academy of Mines*, 2013, vol. 204, pp. 58–61. (In Russian)

7. Seredovich A. V., Ivanov A. V., Usykov A. V. & Myftakhutdinova O. R. Vypolneniye obmerov stroitelnykh konstruktsiy sredstvamy nazemnogo lazernogo skanyrovaniya pry obsledovanii zdaniy i sooruzheniy. GEO-Sybyr-2011 [Measuring of building structures by means of surface laser scanning]. *GEO-Siberia-2011. VII Mezhdunarodniy nauchniy kongress [The 7<sup>th</sup> International scientific congress]. Sbornyk materialov v 6 t.* Novosibirsk, 19–29 aprelya 2011 g. [Coll. Papers in 6 vol. Novosibirsk, 19–29 April 2011]. Novosibirsk, Siberian State University of geosystems and technologies Publ., 2011, vol. 1, issue 2, pp. 220–221. (In Russian)

8. Seredovich V. A., Tkacheva G. N. & Seredovich A. V. Geodezycheskiy monitoring deformatsiy Ust-Kamenogorskogo sudokhodnogo shlyuza [Geodesic monitoring of Ust-Kamenogorsky shipping lock strains]. *INTEREXPO GEO-Siberia-2012. VIII Mezhdunarodniy nauchniy kongress, Mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya “Geodeziya, geoinformatyka, kartografiya, marksheyderiya” [The 8<sup>th</sup> International scientific congress, International scientific conference*

“Geodesy, geoinformatics, mapping, mining geodesy”). *Sbornyk materialov: v 3 t.* Novosibirsk, 10–20 aprelya 2012 g. [Coll. Papers in 3 vol. Novosibirsk, 10–20 April 2012]. Novosibirsk, Siberian State University of geosystems and technologies Publ., 2012, vol. 3, pp. 133–139. (In Russian)

9. Gorokhova Y. I., Alyeshyna I. V., Romanovich Y. V., Ivanov A. V. & Myftafudinov A. R. Proverka vnutrennego ochertaniya tonnelya pry pomoshy nazemnogo lazernogo skanera [Inner lineament of a tunnel check by means of a surface laser scanner]. *INTEREXPO GEO-Siberia-2012. VIII Mezhdunarodniy nauchniy congress, Mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya “Geodeziya, geoinformatyka, kartografiya, marksheyderiya”* [The 8<sup>th</sup> International scientific congress, International scientific conference “Geodesy, geoinformatics, mapping, mining geodesy”]. *Sbornyk materialov: v 3 t.* Novosibirsk, 10–20 aprelya 2012 g. [Coll. Papers in 3 vol. Novosibirsk, 10–20 April 2012]. Novosibirsk, Siberian State University of geosystems and technologies Publ., 2012, vol. 3, pp. 107–114. (In Russian)

10. Ivanov A. V., Sereдович A. V., Romanovich Y. V. & Myftakhudinova O. R. Vozmozhnosti pryimeneniya nazemnogo lazernogo skanyrovaniya dlya kontrolya remonta i stroitelstva dorog [Means for surface laser scanning application for reconditioning and construction of roads’ monitoring]. *GEO-Siberia-2011. VII Mezhdunarodniy nauchniy congress [The 7<sup>th</sup> International scientific congress]. Sbornyk materialov v 6 t.* Novosibirsk, 19–29 aprelya 2011 g. [Coll. Papers in 6 vol. Novosibirsk, 19–29 April 2011]. Novosibirsk, Siberian State University of geosystems and technologies Publ., 2011, vol. 1, issue 2, pp. 210–213. (In Russian)

11. Radzyukevich A. V., Chernova M. A., Sereдович V. A., Ivanov A. V. & Myftakhudinova O. R. Metodyka lasernogo skanyrovaniya i proporsionalnogo analiza form pamyatnyka arkhitektury (na primere Aleksandra Nevskogo v Novosybyrske) [Laser scanning method and proportional shape analysis of a monument of architecture (by the example of the cathedral of St. Alexander Nevski in Novosibirsk)]. *INTEREXPO GEO-Siberia-2012. VIII Mezhdunarodniy nauchniy congress, Mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya “Geodeziya, geoinformatyka, kartografiya, marksheyderiya”* [The 8<sup>th</sup> International scientific congress, Inter-

national scientific conference “Geodesy, geoinformatics, mapping, mining geodesy”]. *Sbornyk materialov v 3 t.* Novosibirsk, 10–20 aprelya 2012 g. [Coll. Papers in 3 vol. Novosibirsk, 10–20 April 2012]. Novosibirsk, Siberian State University of geosystems and technologies Publ., 2012, vol. 3, pp. 121–133. (In Russian)

12. Antonenko M. V., Zymenko D. N. & Pogorelov A. V. Perspektivy ispolzovaniya dannykh nazemnogo lazernogo skanyrovaniya pry provedenii inzhenernykh izyskaniy na ploshadnykh objektakh [Opportunities of surface laser scanning data application in the process of conducting engineering survey at the facilities]. *Neftyanoye khozyaistvo [Oil facility]*, 2013, no. 10, pp. 18–20. (In Russian)

13. Situkha O. A., Gorokhova Y. I. & Pogorelov A. V. Opredeleeniye geometrycheskykh parametrov elementov opor LEP s ispolzovaniyem nazemnogo lazernogo skanyrovaniya [Determination of geometric parameters of transmission towers’ elements using surface laser scanning]. *INTEREXPO GEO-Siberia-2013. VIII Mezhdunarodniy nauchniy congress, Mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya “Geodeziya, geoinformatyka, kartografiya, marksheyderiya”* [The 8<sup>th</sup> International scientific congress, International scientific conference “Geodesy, geoinformatics, mapping, mining geodesy”]. *Sbornyk materialov v 3 t.* Novosibirsk, 21–23 aprelya 2013 g. [Coll. Papers in 3 vol. Novosibirsk, 21–23 April 2013]. Novosibirsk, Siberian State University of geosystems and technologies Publ., 2013, vol. 1, pp. 128–133. (In Russian)

14. Kugayaevskiy V. I. Prymeneniye nazemnykh lazernykh skanerov pry fasadnykh slyemkakh [Application of surface laser scanners in facade survey]. *INTEREXPO GEO-Siberia-2013. VIII Mezhdunarodniy nauchniy congress, Mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya “Geodeziya, geoinformatyka, kartografiya, marksheyderiya”* [The 8<sup>th</sup> International scientific congress, International scientific conference “Geodesy, geoinformatics, mapping, mining geodesy”]. *Sbornyk materialov v 3 t.* Novosibirsk, 21–23 aprelya 2013 g. [Coll. Papers in 3 vol. Novosibirsk, 21–23 April 2013]. Novosibirsk, Siberian State University of geosystems and technologies Publ., 2013, vol. 1, pp. 82–85. (In Russian)

15. Afonyn D. A. Proyektirovaniye geometrycheskykh parametrov nazemnogo lazernogo skanyrovaniya pry kontrole deformatsiy zdaniy i sooruzheniy v

usloviyakh plotnoy zastroyky [Projection of geometrical parameters of surface laser scanning in the process of strain control of buildings and constructions in re- strained urban conditions]. *Geodeziya i kartografiya* [*Land surveying and mapping*], 2013, no. 2, pp. 2–7. (In Russian)

\* КАНАШИН Николай Владимирович – канд. техн. наук, доцент, [nikolay\\_kanashin@mail.ru](mailto:nikolay_kanashin@mail.ru); НИКИТЧИН Андрей Андреевич – канд. техн. наук, доцент, [anikitchin@gmail.com](mailto:anikitchin@gmail.com); АФОНИН Дмитрий Андреевич – канд. техн. наук, доцент, [afonin83@yandex.ru](mailto:afonin83@yandex.ru) (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 625.35

**А. А. Киселев, Л. С. Блажко, А. В. Романов****ЭКВИВАЛЕНТНАЯ КОНУСНОСТЬ И ЕЕ ВЛИЯНИЕ  
НА ДВИЖЕНИЕ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА**

Дата поступления: 06.03.2017

Решение о публикации: 24.04.2017

**Аннотация**

**Цель:** Определение устойчивости подвижного состава, снижение сил, возникающих при взаимодействии колеса с рельсом, уменьшение износа гребней и поверхности катания колес, бокового износа рельсов при высокоскоростном движении. Рассмотрены вопросы взаимодействия колеса и рельса, а именно влияния эквивалентной конусности колесной пары на движение подвижного состава. При взаимодействии колеса со стандартным коническим профилем с рельсом происходит смещение колесной пары в поперечном направлении относительно оси пути в соответствии с параметрами конусности. **Методы:** Представлены методы расчета эквивалентной конусности и основные допущения в расчетной схеме. Определены основные функциональные зависимости эквивалентной конусности. Для моделирования движения колесной пары по железнодорожному пути использован программный комплекс «Универсальный механизм», разработанный на основе алгоритма FastSim, предложенного Дж. Калкером. **Результаты:** Исследовано взаимодействие колеса ВНИИЖТ-РМ-70 для высокоскоростных поездов «Сапсан» с рельсами типа R65 и используемыми на европейских железных дорогах рельсами типа UIC60. Выявлено, что при смещении колесной пары в бок возникает качение колес по различным окружностям. Описаны колебательное движение, а также параметры, на основе которых формируется эквивалентная конусность. **Практическая значимость:** По результатам моделирования выявлена необходимость приведения эквивалентной конусности к параметрам эффективности для реализации высокоскоростного движения на железных дорогах России.

**Ключевые слова:** Профиль рельсов, профиль колес, эквивалентная конусность, эффективная конусность, радиус качения, колебательное движение, моделирование.

\***Artem A. Kyselev**, postgraduate student, zhdp10@gmail.com; **Lyudmila S. Blazhko**, D. Sci., professor; **Andrey V. Romanov**, Cand. Sci., associate professor, andrey.romanov@gmail.com (Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University) EQUIVALENT CONICITY AND ITS INFLUENCE ON ROLLING-STOCK OPERATION

**Summary**

**Objective:** To identify the rolling-stock stability, force reduction, emerging in the process of wheel-rail interaction, the reduction of wheel thread and wheel flange wear, horizontal wear during high-speed running. To consider issues of wheel-rail interaction, that is the influence of a wheel pair equivalent conicity on rolling stock operation. Lateral motion of a wheel pair about an axis of a track in accordance with conicity parameters occurs in the process of standard tapered wheel-rail interaction. **Methods:** Calculation methods of equivalent conicity and basic assumptions in design diagram were presented. The main functional dependencies of equivalent conicity were determined. “All-purpose mechanism” bundled software, developed on the basis of FastSim algorithm introduced by J. Kalker, was applied for modeling of wheel pair operation on a railway track. **Results:** Interaction of VNIIZhT-RM-70 wheel for “Sapsan” high-speed trains with R65 rail type was studied, as well as UIC60 rail type used on European

railroads. Wheel rolling occurs in different circumferential directions in case of lateral movement of a wheel pair. Oscillating motion was described, as well as the parameters on the basis of which equivalent conicity is formed. **Practical importance:** The necessity in reduction of equivalent conicity to efficiency parameters of high-speed running realization on Russian railroads was revealed by means of modeling.

**Keywords:** Rail profile, wheel contour, equivalent conicity, effective conicity, rolling radius, oscillating motion, modeling.

В настоящее время основные работы направлены на продление жизненного цикла элементов взаимодействия, снижение затрат на строительство и эксплуатацию железнодорожного пути и подвижного состава. Конструкции колесной пары и железнодорожного пути сформированы так, что между гребнем колеса и рабочей гранью головки рельса существует зазор, в пределах которого колесная пара может смещаться в поперечном направлении относительно рельсовой колеи. Если величина зазора мала, происходит заклинивание колесной пары.

Все это влияет на колебания кузова, рамные силы в тележках подвижного состава, боковой износ рельсов, износ гребней и поверхности катания колес.

Колесо с коническим профилем может смещаться в поперечном направлении относительно оси рельса в пределах зазора между гребнем колеса и боковой гранью рельсов в соответствии с параметрами конусности (рис. 1). Конусность – параметр фигуры вращения, который характеризуется разницей в радиусах дисков вращения (качения) колес, образованных нормальными реакциями колес с рельсами на одной колесной паре и расстоянием между дисками вращения.

Эквивалентная конусность – тангенс угла конусности колесной пары с колесами конического профиля, чье поперечное движение имеет такую же длину волны, как и у данной колесной пары (в прямом участке пути или в кривых большого радиуса) [1, с. 31].

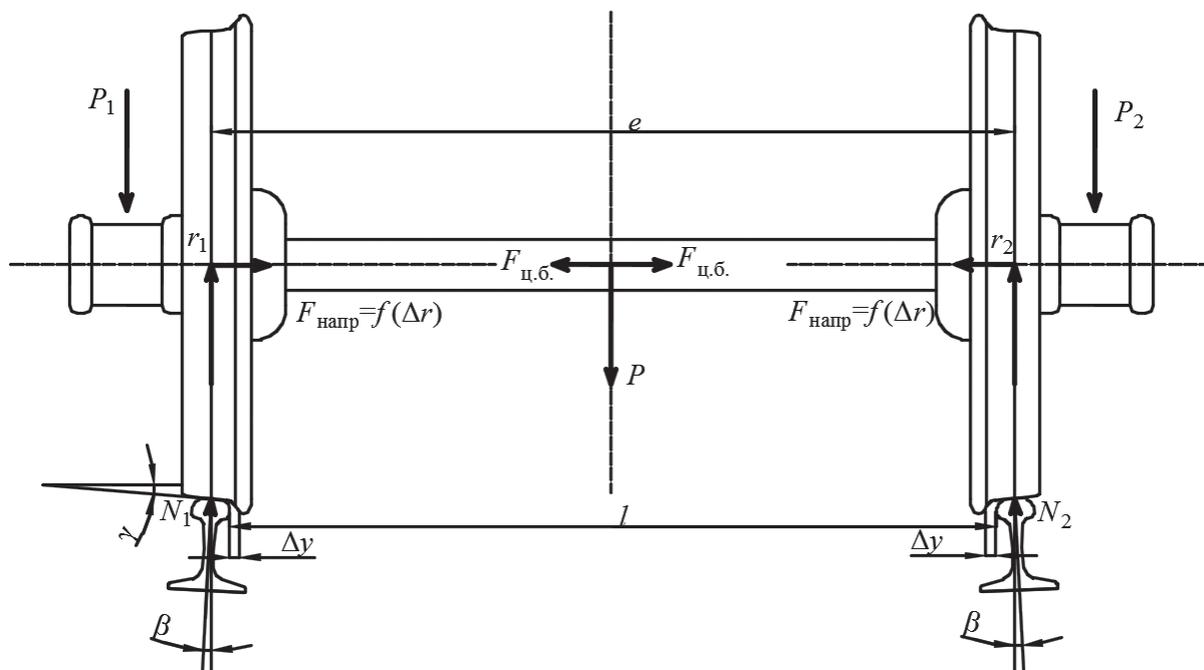


Рис. 1. Геометрические характеристики взаимодействия колесной пары с рельсовой колеей

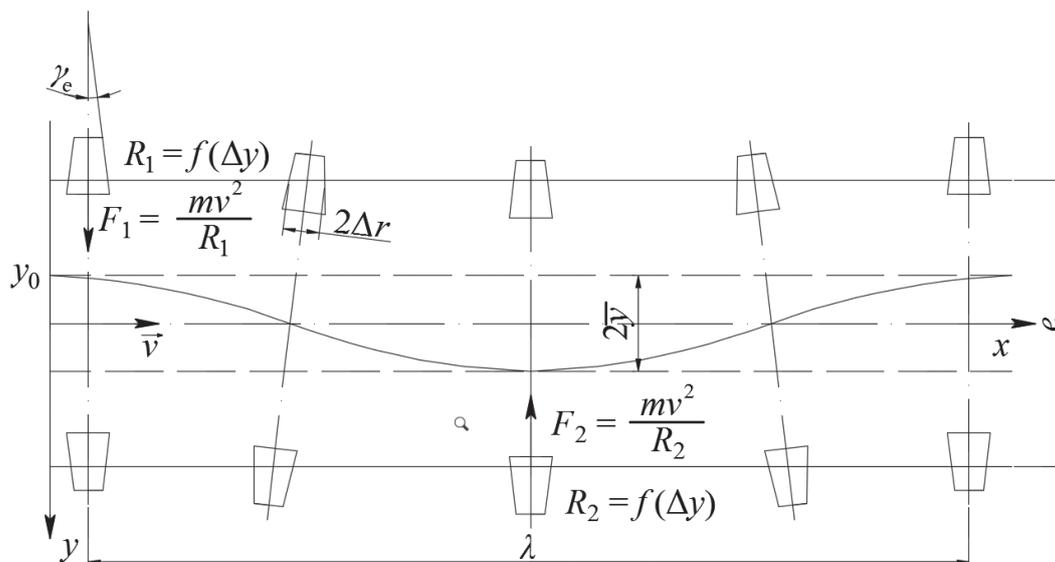


Рис. 2. Траектория движения центра осей колесной пары

Смещение колесной пары в поперечном направлении на величину  $y$  меняет положение точек контакта на профилях колес, что приводит к изменению радиуса вращения колеса в точке контакта. Радиус вращения и угол наклона колесной пары относительно оси пути изменяются по мере того, как колесная пара смещается в бок. Функция разницы радиусов качения колес  $\Delta r$  на колесной паре от поперечного смещения  $y$  ( $\Delta r = f(y)$ ) – одна из основных характеристик эквивалентной конусности. Она определяется формой поперечного сечения колеса и рельса. Изучив функцию  $\Delta r = f(y)$ , можно рассчитывать устойчивость подвижного состава.

Колеса локомотивов и вагонов имеют различный профиль. Это приводит к неодинаковой форме износа поверхности катания и боковой грани рельсов, вследствие чего ухудшается плавность хода. Возникает колебательное движение, которое приводит к качению колес по разным радиусам.

Таким образом, конусность формируется на основе следующих параметров колесной пары и железнодорожного пути:

- ширина рельсовой колеи  $l$ , расстояние между дисками вращения колесной пары  $e$ , величина зазора между гребнем колеса и боковой гранью рельсов  $\Delta y$ ;
- профили поверхностей колес и рельсов;

- радиусы качения колес  $r_1$  и  $r_2$ ;
- подуклонка рельсов;
- вертикальные неровности пути.

Формируемое колебательное движение колесной пары описывается дифференциальным уравнением (рис. 2) [2, с. 3–5]

$$\ddot{y} + \frac{v^2}{er_0} \Delta r = 0,$$

где  $\ddot{y}$  – вторая производная перемещения  $y$  по времени;  $v$  – поступательная скорость вагона;  $r_0$  – радиус качения колес в момент, когда колесная пара центрирована относительно рельсового пути.

Это уравнение второго порядка с постоянными коэффициентами имеет решение в виде гармонической волны с длиной  $\lambda$ , определяемой по формуле Клингеля

$$\lambda = 2\pi \sqrt{\frac{er_0}{\Delta r}}.$$

Эквивалентная конусность конического колеса рассчитывается следующим образом:

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

Для этого необходимо:

- 1) определить форму профиля колеса и рельса;

- 2) вычислить функцию  $\Delta r = f(y)$ ;
- 3) рассчитать эквивалентную конусность колесной пары для ее поперечного смещения  $y$  относительно оси пути.

Международным союзом железных дорог (МСЖД) рекомендованы такие допущения в расчетной схеме:

- 1) колеса и рельсы считаются недеформируемыми;
- 2) форма профиля колеса принимается аксиально-симметрическая;
- 3) рельсы считаются прямолинейными с единым поперечным профилем;
- 4) при контакте колеса с рельсом не происходит упругой деформации (точечные контакты);
- 5) не учитывается вращение оси колесной пары при ее поперечном движении (вращение вокруг оси, параллельной рельсовому пути);
- 6) в точке контакта касательные плоскости параллельны к поверхностям рельса.

Для моделирования процесса взаимодействия колесной пары с рельсовой колеей был принят программный комплекс «Универсальный механизм», разработанный в Брянском государственном техническом университете [3]. В нем используется алгоритм FastSim, предложенный Дж. Калкером [4] для решения касательной контактной задачи и применяю-

щийся в программах компьютерного моделирования динамики подвижного состава [5].

Моделируется движение колесной пары по прямому участку пути с шириной колеи 1520 мм. Для этого был выбран профиль колеса типа ВНИИЖТ-РМ-70 для высокоскоростных поездов «Сапсан», разработанный И. Н. Максимовым [6], профиль рельса Р65 по ГОСТ Р 51685–2013 [7]. Расстояние между дисками вращения колесной пары – 1580 мм, колеса имеют радиусы по кругу катания 460 мм, подклонка рельсов – 1:20.

При поперечном смещении колеса относительно рельса изменяются точки контакта, как показано на рис. 3. Строится функция  $\Delta r = f(y)$  для поперечного смещения  $y$  от 1 до 8 мм (рис. 4). Рассчитывается эквивалентная конусность в зависимости от среднего квадратического отклонения координаты поперечного смещения  $y = 1$  мм и интервала усреднения, равного 3 мм. При расчете с вышеуказанными параметрами значение эквивалентной конусности составило 0,19 (рис. 5). Для скоростей движения до 250 км/ч, по нормам МСЖД, эквивалентная конусность не должна превышать 0,3 [8].

Отсюда следует, что при взаимодействии колеса ВНИИЖТ-РМ-70 с рельсами типа Р65 наблюдается устойчивое движение со скоростью до 250 км/ч.

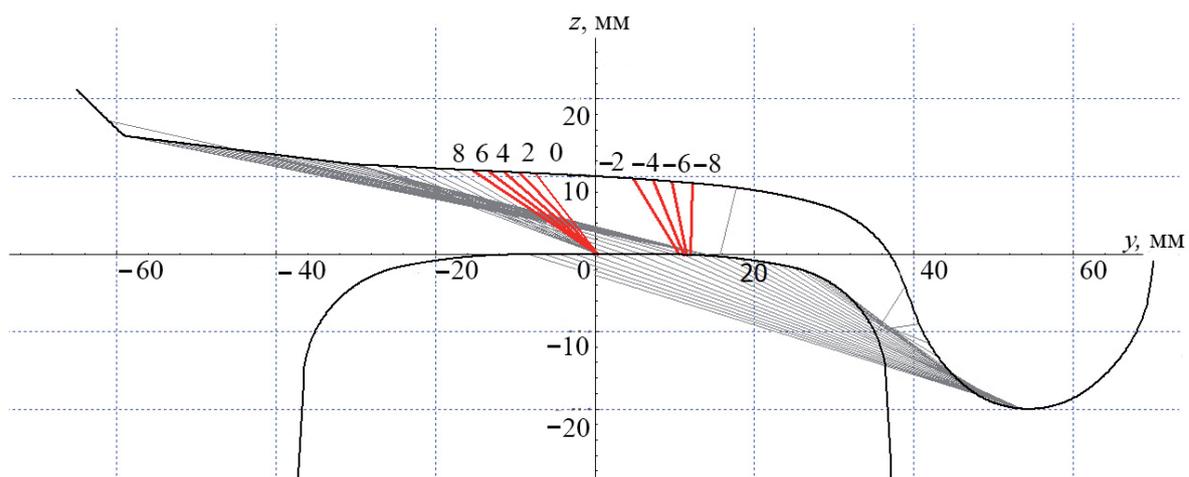


Рис. 3. Точки контакта колеса ВНИИЖТ-РМ-70 с рельсом Р65 при поперечном смещении от 1 до 8 мм

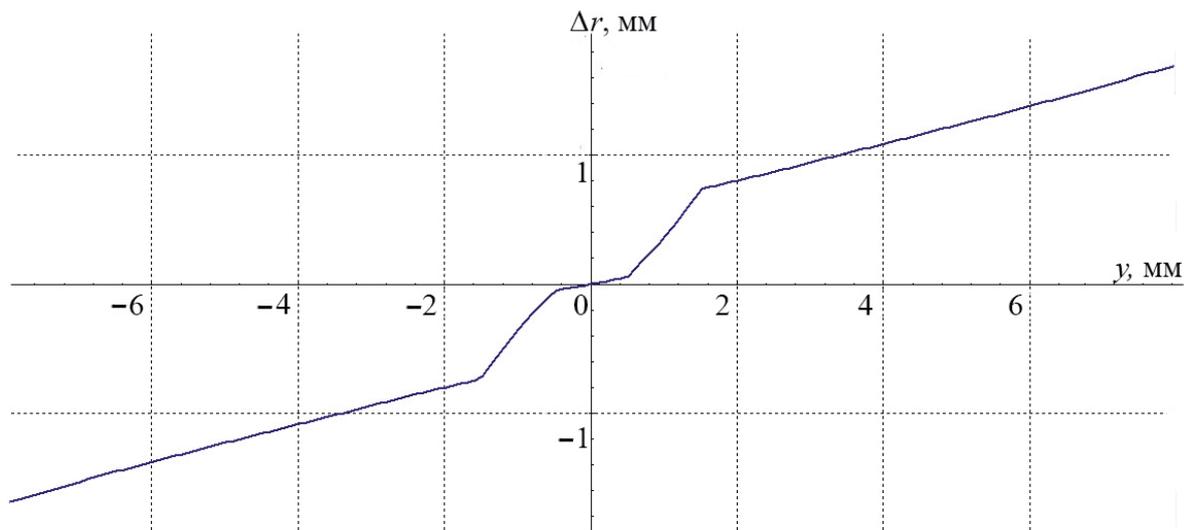


Рис. 4. Функция  $\Delta r = f(y)$  для поперечного смещения колесной пары ВНИИЖТ-РМ-70 относительно оси железнодорожного пути с рельсами Р65 от 1 до 8 мм

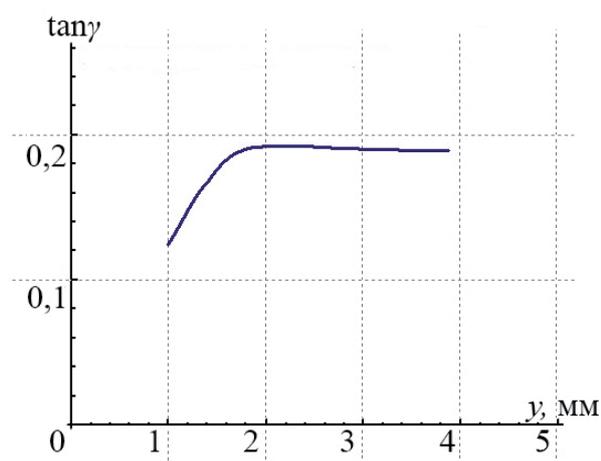


Рис. 5. Эквивалентная конусность колесной пары на интервале усреднения 3 мм (взаимодействие колеса ВНИИЖТ-РМ-70 с рельсом типа Р65)

Безусловно, при реальных условиях взаимодействия колеса с рельсом на высокоскоростных линиях возникают более сложные процессы взаимодействия. Необходимо обеспечивать одноточечный контакт колеса и рельса в зоне, близкой к оси симметрии рельса, так как профиль рельса должен иметь параметры, позволяющие производить неоднократную мобильную обработку рельса в процессе эксплуатации. Так, рельс типа UIC 60 [9] (утвержденный МСЖД) имеет увеличенную

высоту головки рельса 51 мм, против Р65 при высоте 45 мм [10, с. 6–8; 11] (рис. 6).

Расчет эквивалентной конусности при движении колесной пары с профилем колеса ВНИИЖТ-РМ-70 по железнодорожному пути с рельсами типа UIC60 (рис. 7–9) показал, что на интервале усреднения, равным 3 мм, значение эквивалентной конусности составило 0,050. Для скоростей движения до 350 км/ч, по нормам МСЖД, эквивалентная конусность не должна превышать 0,15 [8].

Отсюда следует, что при взаимодействии колеса ВНИИЖТ-РМ-70 с рельсами типа UIC60 наблюдается устойчивое движение со скоростью свыше 350 км/ч.

Для реализации высокоскоростного движения на железных дорогах России со скоростями до 400 км/ч необходима реализация хотя бы одного из следующих мероприятий:

- корректировка профиля колеса по параметрам эквивалентной конусности;
- корректировка профиля рельса (прокат нового рельса нового профиля либо корректировка существующего профиля Р65 с помощью мобильной обработки рельсов пути).

При движении колесной пары по рельсу возникает дополнительная сила, направленная на преодоление горизонтальных неровностей.

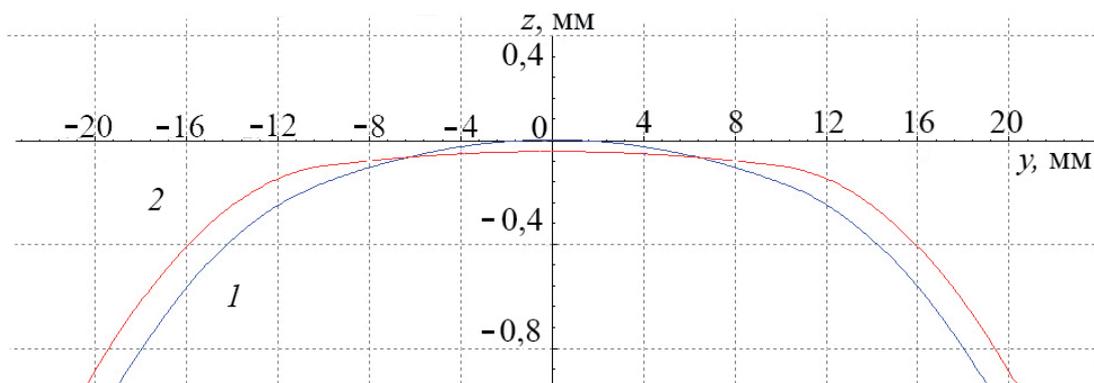


Рис. 6. Поперечные профили рельсов (масштаб по оси  $z$  увеличен):  
1 – рельс UIC60; 2 – рельс P65

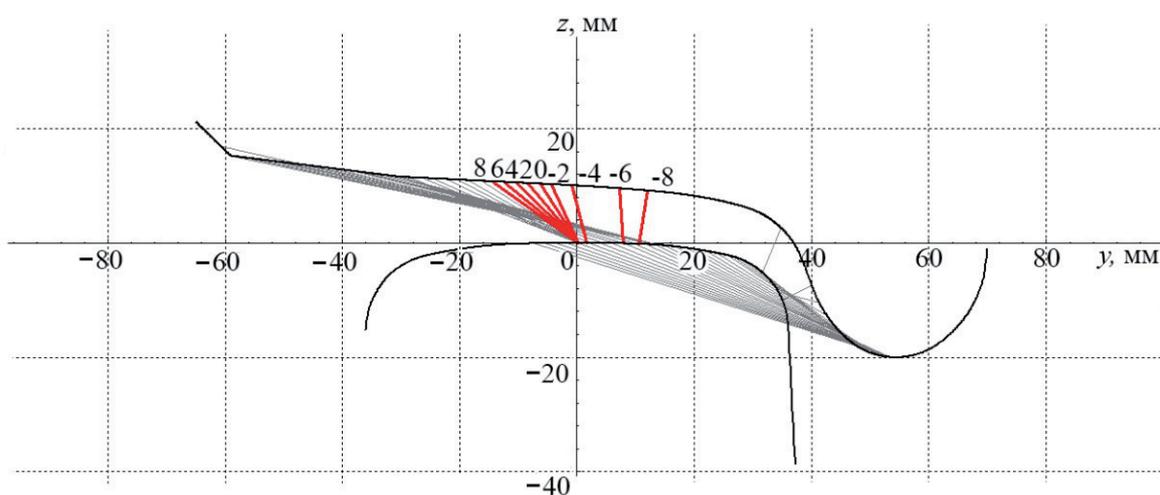


Рис. 7. Точки контакта колеса ВНИИЖТ-РМ-70 с рельсом UIC60  
при поперечном смещении от 1 до 8 мм

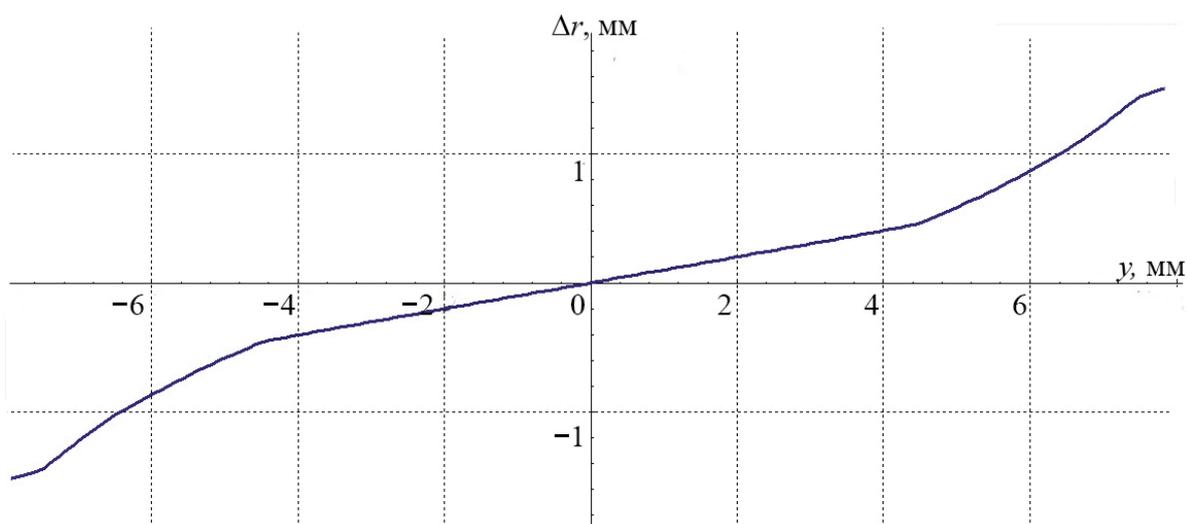


Рис. 8. Функция  $\Delta r = f(y)$  для поперечного смещения колесной пары ВНИИЖТ-РМ-70  
относительно оси железнодорожного пути с рельсами UIC60 от 1 до 8 мм

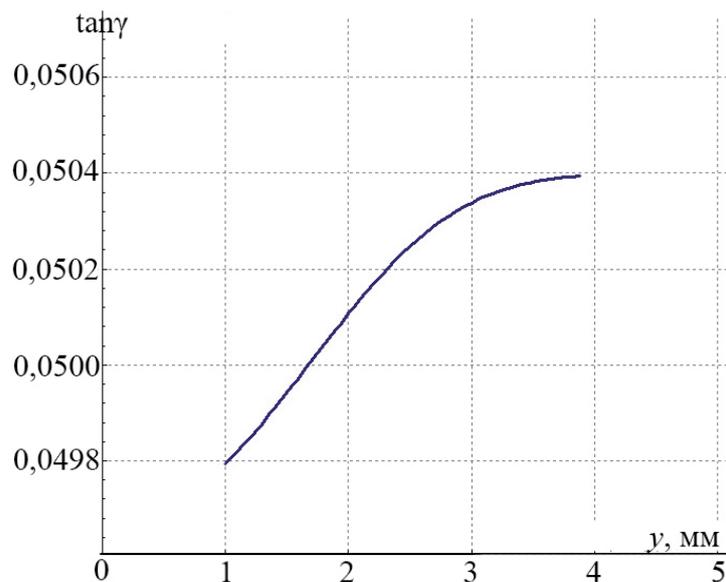


Рис. 9. Эквивалентная конусность колесной пары на интервале усреднения 3 мм (взаимодействие колеса ВНИИЖТ-РМ-70 с рельсом типа UIC60)

Именно она является источником критических рамных сил в тележках и распирающих усилий в рельсовой колее, износа гребней колес и боковой грани рельсов. Профиль рельса следует приводить к проектному по сети дорог путем мобильной обработки рельсов в пути (шлифовка, фрезеровка и строгание), позволяющей устранять периодические дефекты продольного профиля (рифли), дефекты поперечного профиля и другие дефекты поверхности катания рельса [12].

В работах [13, 14] приведены доводы о целесообразности использования на высокоскоростных магистралях типов рельсов легче Р65. Так как на таких линиях ресурс рельсов в межремонтном цикле полностью не используется, эффективно применять рельсы более легких типов для экономии затрат на материал, например Р58. В них возникают существенно меньшие температурные продольные силы, влияющие на устойчивость бесстыкового пути. Тем не менее возможность применения рельсов типа Р58, по нашему мнению, в настоящее время является преждевременной по причине отсутствия технико-экономического обоснования необходимости введения нового профиля рельсов в РФ.

В работе В. Т. Никронэна [15] сделан вывод, поддерживаемый и нами, о необходимости учета параметров эквивалентной конусности при организации высокоскоростного движения на железных дорогах России. Превышение параметров конусности является условием, которое ограничивает установление максимальных скоростей движения, даже при «нулевых» допусках на содержание железнодорожного пути.

Приведение эквивалентной конусности к параметрам эффективности позволит в значительной мере уменьшить интенсивность бокового износа рельсов и гребней колесных пар, что, в свою очередь, приведет к уменьшению затрат на мобильную обработку рельсов в пути и обточку колес, снизит рамные усилия в тележках подвижного состава и, тем самым, повысит надежность работы железнодорожного транспорта.

### Библиографический список

1. Анализ параметров, являющихся определяющими для сохранения технической и эксплуатационной совместимости железнодорожной системы колеи 1520 мм и 1435 мм на границе СНГ–

ЕС. Подсистема: инфраструктура. Путь и путевое хозяйство // Контактная группа ОСЖД-ЕЖД, 2009. – Январь. – 145 с.

2. International Union of Railways (UIC). UIC CODE 519 : Method for determining the equivalent conicity. 1st ed. – Paris, 2004. – December. – 94 p.

3. Программный комплекс «Универсальный механизм». Пакет UM Loko. – URL: <http://www.umlub.ru/plugins/catalogue/index.php?id=4> (дата обращения: 15.01.2017).

4. Kalker J. J. Some new results in rolling contact / J. J. Kalker, J. Piotrowski // *Vehicle System Dynamics*. – 1898. – Vol. 18. – P. 223–242.

5. Погорелов Д. Ю. Модификация алгоритма FastSim решения задачи контакта колеса и рельса / Д. Ю. Погорелов, В. Н. Языков // *Вестн. Брянск. гос. техн. ун-та*. – 2004. – Вып. 2. – С. 103–109.

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

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

8. International Union of Railways (UIC). UIC CODE 518 : Testing and approval of railway vehicles from the point of view of their dynamic behavior – Safety – Track fatigue – Ride quality. 2<sup>st</sup> ed. Paris, 2003. – April. – 146 p.

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

10. Специальные технические условия. Верхнее строение пути участка Москва–Казань высокоскоростной железнодорожной линии «Москва–Казань–Екатеринбург». Технические нормы и требования к проектированию и строительству : пояснит. зап. – СПб. : ПГУПС, 2014. – 33 с.

11. Технические требования (нормативы) для проектирования высокоскоростной пассажирской железнодорожной магистрали (ВСМ) «Москва–Санкт-Петербург». – М. : ОАО «РЖД», 2008. – 39 с.

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

13. Рейхарт В. А. О профиле рельсов / В. А. Рейхарт, Г. А. Галицин, А. Б. Добужская // *Путь и путевое хозяйство*. – 2007. – № 1. – С. 30–31.

14. Новакович М. В. Нужен рельс типа P58 / М. В. Новакович, Л. А. Кармазина, Г. В. Карпачевский, Н. И. Залавский, С. В. Сологуб, Х. Х. Дугаев // *Путь и путевое хозяйство*. – 2006. – № 9. – С. 13–14.

15. Никронэн В. Т. О влиянии конусности колесных пар на динамику движения подвижного состава / В. Т. Никронэн. – М. : ОАО «РЖД», 2015. – 6 с.

## References

1. *Analyz parametrov, yavlyayushikhsya opredelyayushymy dlya sokhraneniya tekhnicheskoy i ekspluatatsionnoy sovmestimosti zheleznodorozhnoy systemy koley 1520 mm i 1435 mm na granitse SNG-YS. Podsystema: infrastruktura* [Analysis of parameters, being crucial for maintaining engineering consistency and interoperability of railway system 1520 mm and 1435 mm gauge at the border of CIS-EU. Subsystem: infrastructure]. Track and track facilities. OSJD-ERA contact group, January 2009, 31 p. (In Russian)

2. *International Union of Railways (UIC). UIC CODE 519: Method for determining the equivalent conicity*. 1<sup>st</sup> ed. Paris, December 2004, pp. 3–5.

3. *Programmniy kompleks “Universalniy mekhanizm”* [Bundled software “All-purpose mechanism”]. *Paket UM Loko. – UM Loko package.* – URL: <http://www.umlub.ru/plugins/catalogue/index.php?id=4> (accessed: 15.01.2017). (In Russian)

4. Kalker J. J. & Piotrowski J. Some new results in rolling contact. *Vehicle System Dynamics*, 1898, vol. 18, pp. 223–242.

5. Pogorelov D. Y. & Yasykov V. N. Modifikatsiya algoritma FastSim resheniya zadachy kontakta koleasa i relsa [FastSim algorithm modification of a wheel and a rail contact solution]. *Bulletin of Bryansk State Technical University*, 2004, issue 2, pp. 103–109. (In Russian)

6. Maksimov I. N. *Razrabotka profilya koleas dlya skorostnykh poyezdov i prognozyrovaniye yego evolyutsii v protsesse vzaimodeystviya podvizhnogo sostava i puty* [Wheel contour development for high-speed

*trains and prediction of its evolution in the process of train-track interaction*]. Diss. Cand. Sci. Moscow, VNIIZhT Publ., 2014, 119 p. (In Russian)

7. GOST R 51685–2013. “*Relsy zheleznodorozhniye. Obshniye tekhnicheskiye usloviya*” [Russian National Standard 51685–2013. “*Railway rails. General technical conditions*”]. Moscow, VNIIZhT Publ., 2014. (In Russian)

8. *International Union of Railways (UIC). UIC CODE 518: Testing and approval of railway vehicles from the point of view of their dynamic behavior – Safety – Track fatigue – Ride quality*. 2<sup>nd</sup> ed. Paris, April 2003, 146 p.

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

10. *Spetsialniye tekhnicheskiye usloviya. Verkhneye stroyeniye puty uchastka Moskva–Kazan vysokoskorostnoy zheleznodorozhnoy lynii “Moskva–Kazan–Yekaterinburg”* [Special regulations. Superstructure of Moscow–Kazan section of Moscow–Kazan–Yekaterinburg high-speed mainline railroad]. *Tekhnicheskiye normy i trebovaniya k proyektirovaniyu i stroitelstvu* [Technical norms and regulations on planning and building]. Executive summary. Saint Petersburg, Saint

Petersburg State Transport University Publ., 2014, pp. 6–8. (In Russian)

11. *Tekhnicheskiye trebovaniya (normatyvy) dlya proyektirovaniya vysokoskorostnoy passazhyrskoy zheleznodorozhnoy magystraly (VSM) “Moskva–Sankt-Peterburg”* [Technical regulations (norms) for “Moscow–Saint Petersburg” high-speed mainline railroad (HSMR) construction]. Moscow, OJSC “RR” Publ., 2008. (In Russian)

12. Khartleben D. *Obrabotka relsov v puty po novoy tekhnologii* [The new technology of rails’ treatment]. *Track and track facilities*, 2016, no. 6, pp. 37–40. (In Russian)

13. Reikhart V. A., Galytsyn G. A. & Dobuzhskaya A. B. *O profile relsov* [On rails’ profile]. *Put i putevoye khozyaistvo* [Track and track facilities], 2007, no. 1, pp. 30–31. (In Russian)

14. Novakovich M. V., Karmazyna L. A., Karpachevsky G. V., Zalavskiy N. I., Sologub S. V. & Dugayev K. K. *Nuzhen rels tyra R58* [R58 type rail is needed]. *Put i putevoye khozyaistvo* [Track and track facilities], 2006, no. 9, pp. 13–14. (In Russian)

15. Nykronen V. T. *O vliyani konusnosti kolesnykh par na dinamiku dvizheniya podvyzhnogo sostava* [On the influence of wheel pair on rolling stock dynamics]. Moscow, OJSC “RR” Publ., 2015, 6 p. (In Russian)

\* КИСЕЛЕВ Артем Александрович – аспирант, zhdpr10@gmail.com; БЛАЖКО Людмила Сергеевна – доктор техн. наук, профессор; РОМАНОВ Андрей Валерьевич – канд. техн. наук, доцент, andrey.romanov@gmail.com (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 629.424.3:629.4.027

**В. А. Кручек, А. М. Евстафьев****ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПОГРЕШНОСТЕЙ  
НА КИНЕМАТИКУ ВРАЩАТЕЛЬНОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ  
ОСЕВОГО РЕДУКТОРА С ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ РЕАКТИВНОЙ  
ТЯГОЙ В ГРУППОВОМ ТЯГОВОМ ПРИВОДЕ ЛОКОМОТИВА**

Дата поступления: 05.04.2017

Решение о публикации: 24.04.2017

**Аннотация**

**Цель:** Получение аналитических зависимостей линейных и угловых перемещений горизонтальной реактивной тяги и осевого редуктора с технологическими погрешностями, возникающими при их изготовлении и сборке группового тягового привода, от вертикальных перемещений колесной пары и рамы тележки во время движения локомотива. Эти зависимости служат основой для определения скоростей, ускорений и динамических нагрузок на детали группового привода, а также поиска методов и способов повышения надежности элементов привода, учитывая его конструктивные особенности и условия эксплуатации. **Методы:** Аналитические зависимости установлены на основании знаний высшей математики, законов теоретической механики и знаний правил тригонометрии. **Результаты:** Представлены характеристики аналитических зависимостей кинематических пространственных перемещений горизонтальной реактивной тяги и осевого редуктора с технологическими погрешностями группового тягового привода от вертикальных перемещений рамы ходовой тележки и колесной пары локомотивов. Для упрощения зависимостей углов наклона реактивных тяг и линии центров осевых редукторов установлены граничные условия. Проведен анализ полученных зависимостей. Рассмотрены возможные варианты схем пространственного перемещения горизонтальных реактивных тяг и осевого редуктора в раме ходовой тележки локомотива с возможными отклонениями линейных размеров от технологических допусков. Построены графические зависимости вертикальных перемещений элементов реальных конструкций тягового привода от вертикальных перемещений рамы тележки при движении локомотива. **Практическая значимость:** Аналитические зависимости позволяют определить линейные перемещения, угловые скорости и ускорения реактивных тяг и осевых редукторов колесных пар, а также создавать рациональные и надежные конструкции карданного тягового привода колесных пар локомотивов с минимальными динамическими нагрузками на его элементы. Результаты аналитических исследований применимы при проектировании новых локомотивов с высокими динамическими показателями.

**Ключевые слова:** Тепловоз, групповой тяговый привод, горизонтальная реактивная тяга, осевой редуктор, технологические погрешности, линия центров, угол поворота, вертикальные перемещения, колесная пара, рама тележки.

\* **Victor A. Kruchek**, D. Sci., professor; **Andrey M. Yevstafiyev**, Cand. Sci., associate professor, head of a chair [evstam@mail.ru](mailto:evstam@mail.ru) (Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University) INSTRUMENT ACCURACY INFLUENCE ON KINEMATICS OF ROTARY TRAVERSE OF AXIAL GEAR SET WITH HORIZONTAL JET THRUST IN A GROUP TRACTIVE DRIVE OF A LOKOMOTIVE

## Summary

**Objective:** To obtain analytical responses of linear and angular movements of horizontal jet thrust and axial reduction unit, appearing in the process of their production and group tractive drive assembly, occurring as a result of vertical wheelset and engine's undercarriage frame shifts during engine movement. The given responses are the basis for identifying its velocity, acceleration, and dynamic loads on drive components, as well as searching for methods to boost drive components reliability, taking into account its constructive specificities and running conditions. **Methods:** Analytical responses were identified on the basis of higher mathematics, the laws of theoretical mechanics as well as trigonometry knowledge application. **Results:** Analytical responses of kinematic spatial movements of horizontal jet thrust and an axial reduction unit with instrument accuracy of a group tractive drive were obtained from vertical engine's undercarriage frame shifts and locomotives wheelset. Boundary conditions of jet thrust slopes were detected, as well as center lines of axial reduction units. The analysis of established relations was performed. Possible scheme variants of spatial movements of horizontal jet thrust and a wheel set axial reduction unit in engine's undercarriage frame were presented with possible discrepancies of linear dimensions from production tolerance. Characteristic curves of vertical shifts of actual towline constructions from vertical shifts of undercarriage frame during locomotive's movement were graphed. **Practical importance:** On the basis of obtained relations the analysis of linear displacement, angular velocities and accelerations of jet thrusts and wheel set axial reduction units is possible, as well as the generation of rational and robust wheel set cardan tractive gear constructions for locomotives with minimal dynamic load on its elements. The results of analytical research might be applied in the designing of new engines with high dynamic parameters.

**Keywords:** Diesel locomotive, group tractive drive, horizontal jet thrust, axial reduction unit, instrument accuracy, center line, angle of roll, vertical shifts, wheelset, track frame.

## Введение

За рубежом в качестве тягового привода колесных пар на локомотивах различного назначения, включая пассажирские, грузовые, маневровые и строительно-дорожную технику, достаточно широко применяется групповой тяговый привод, который предусматривает механическую связь колесных пар. Тяговый подвижной состав с групповым тяговым приводом колесных пар имеет недостатки, однако обладает и рядом преимуществ перед индивидуальным приводом. В частности, коэффициент использования сцепной массы локомотива с групповым тяговым приводом выше, чем у локомотива с индивидуальным приводом. В нашей стране групповой тяговый привод применяется в основном на локомотивах маневрового движения, а также на автомотрисах и дорожной технике типа АДМ, АГВ, ДГК<sup>У</sup>, МПТ4 и др. [1]. Маневровые тепловозы типа ТГМ4 и ТГМ6 имеют гидrome-

ханическую передачу и две ходовые тележки, колесные пары которых механически связаны между собой карданными валами в единую силовую цепь – силовую трансмиссию (рис. 1) [2–4]. В отечественном локомотивостроении есть опыт создания группового тягового привода с зубчатыми осевыми редукторами на электровозе ВЛ83, который не получил последующего развития [5].

Во время движения локомотива вращающий момент входного вала осевого редуктора колесной пары создает опрокидывающий момент его корпуса, который компенсируется моментом усилия реакции горизонтально установленной реактивной тягой [6]. Конструкция рам тележек тепловозов типа ТГМ3, ТГМ4 и ТГМ6 предусматривает установку реактивной тяги в горизонтальной продольной плоскости к верхней поверхности осевого редуктора колесной пары, как показано на рис. 2. Буксы колесных пар помещены в челюстные направляющие и могут совершать

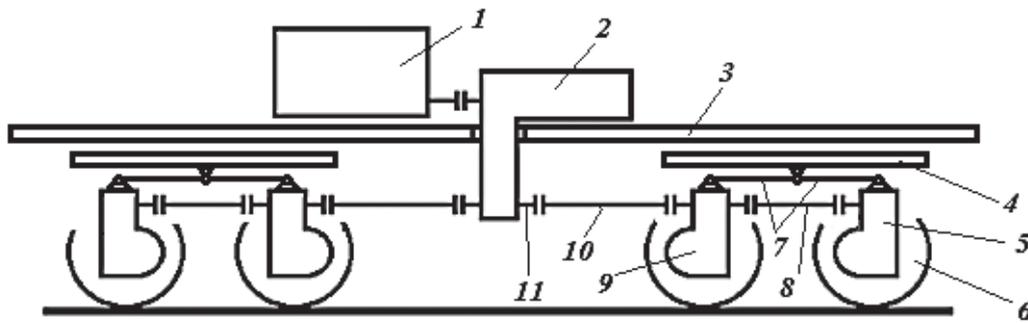


Рис. 1. Схема трансмиссии маневрового тепловоза типа ТГМ4 и ТГМ6:  
 1 – дизель; 2 – гидропередача; 3 – главная рама тепловоза; 4 – рама ходовой тележки; 5 – крайний осевой редуктор; 6 – колесная пара; 7 – реактивные тяги; 8 – тележечный карданный вал; 9 – проходной осевой редуктор; 10 – раздаточный карданный вал; 11 – ведущий вал гидропередачи

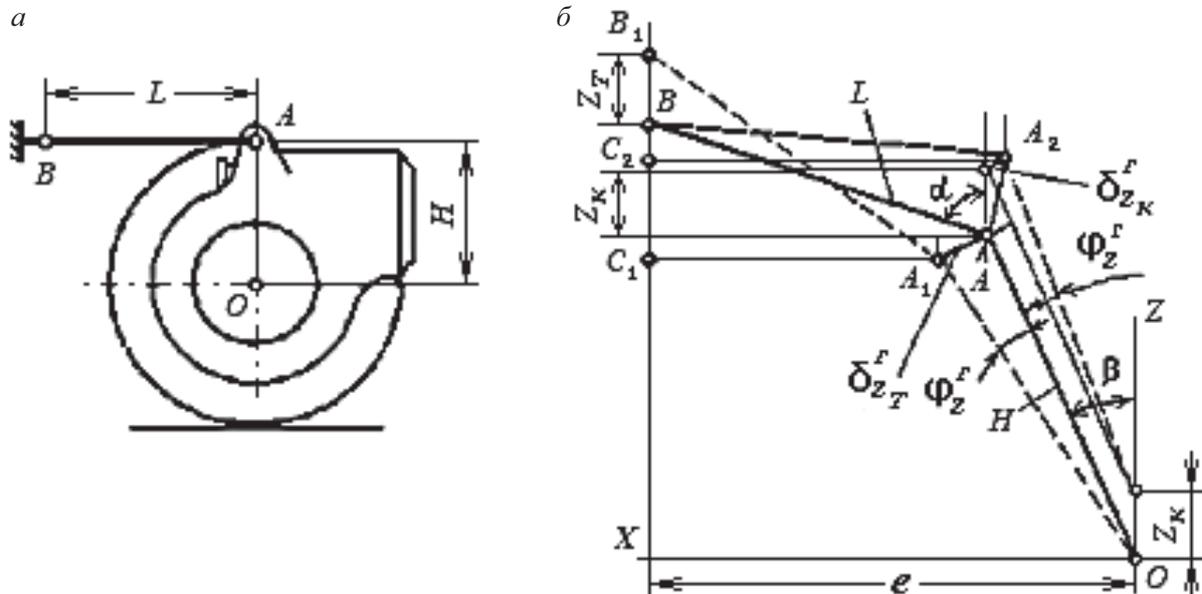


Рис. 2. Осевой редуктор колесной пары с горизонтальной реактивной тягой:  
 а – крепление осевого редуктора к раме тележки горизонтальной реактивной тягой; б – схема линейных перемещений горизонтальной реактивной тяги и вращательного перемещения корпуса осевого редуктора при вертикальных перемещениях рамы тележки и колесной пары

только вертикальные перемещения относительно рам ходовых тележек. Отклонения, вызванные как технологическими причинами при изготовлении узлов и сборке привода, так и эксплуатационными воздействиями на экипаж рессорного подвешивания и износа, от правильного размещения оборудования и компоновки силовой трансмиссии на локомотиве, оказывают существенное влияние на дополнительные динамические нагрузки на

отдельные детали привода. Например, надежность и долговечность работы подшипников крестовин карданных валов трансмиссии во многом определяются соосностью выходного вала гидропередачи и входного вала осевого редуктора [7–9].

Рельсовые стыки, стрелочные переводы и другие неровности железнодорожного пути, а также динамическая работа рессорной системы во время движения локомотива вызывают

линейные перемещения в вертикальной плоскости рамы тележки и колесных пар локомотива, которые являются причиной появления угловых перемещений осевых редукторов. Угловые перемещения нарушают равенство углов входного и выходного фланцев ведомого карданного вала, соединяющего выходной вал гидропередачи с осевым редуктором. Эти же причины определяют изменение горизонтального положения промежуточного (тележечного) карданного вала, соединяющего осевые редуктора одной тележки, в случае их работы в противофазном режиме. Появляется разность углов между ведущим валом гидропередачи и ведомым карданным валом осевого редуктора, которая становится причиной колебания угловой скорости ведомого вала и неравномерности передачи вращающего момента к колесной паре. Колебания угловой скорости ведомого вала увеличивают деформацию и крутильные колебания карданного вала. Угол скручивания при колебаниях (девиация карданного вала), который пропорционален степени неравномерности вращения вала, приводит к добавочным напряжениям кручения, а также к дополнительным нагрузкам на игольчатые подшипники вильчатых рычагов крестовин карданных валов. Для нормальной работы карданов трансмиссии локомотива угол перекоса по условию долговечности подшипников не должен превышать  $1,5^\circ$  [7, 10].

### Кинематика линейных и угловых перемещений реактивной тяги осевого редуктора колесной пары карданного тягового привода при движении локомотива

Рассмотрим схему колесо-моторного блока привода с осевым редуктором, опирающимся на колесную пару, и горизонтальной реактивной тягой, соединенной с поперечной шкворневой балкой тележки. При вертикальных перемещениях рамы тележки и колесной пары во время движения локомотива осевой

редуктор и реактивная тяга меняют свое пространственное положение. На рис. 2, а показаны эти угловые перемещения осевого редуктора колесной пары и линейные перемещения реактивной тяги.

Вертикальные перемещения рамы тележки и колесной пары принимаются независимыми друг от друга, а тяга, корпус редуктора и их крепления – абсолютно твердыми телами. Зависимости линейных перемещений точки крепления реактивной тяги к корпусу осевого редуктора и угла его поворота относительно оси колесной пары от указанных вертикальных перемещений определяются полученными в [9–11] формулами

$$\delta_{Z_T}^\Gamma = \frac{\cos \alpha}{\sin(\alpha \mp \beta)} Z_T + \left( \frac{1}{2L \sin(\alpha \mp \beta)} + \frac{\sin \beta \cdot \cos \alpha}{L \sin^2(\alpha \mp \beta)} + \frac{\cos^2 \alpha}{2L \sin^3(\alpha \mp \beta)} \right) Z_T^2, \quad (1)$$

$$\delta_{Z_K}^\Gamma = \frac{\cos \alpha}{\sin(\alpha \mp \beta)} Z_K + \left( \frac{1}{2L \sin(\alpha \mp \beta)} + \frac{\sin \beta \cdot \cos \alpha}{L \sin^2(\alpha \mp \beta)} + \frac{\cos^2 \alpha}{2L \sin^3(\alpha \mp \beta)} \right) Z_K^2, \quad (2)$$

$$\varphi_{Z_T}^\Gamma = \frac{\delta_{Z_T}^\Gamma}{OA}, \quad (3)$$

$$\varphi_{Z_K}^\Gamma = \frac{\delta_{Z_K}^\Gamma}{OA}. \quad (4)$$

В (1)–(4)  $\delta_{Z_T}^\Gamma$ ,  $\delta_{Z_K}^\Gamma$  – линейные перемещения точки соединения корпуса редуктора с реактивной тягой при вертикальных перемещениях рамы тележки и колесной пары соответственно;  $\varphi_{Z_T}^\Gamma$ ,  $\varphi_{Z_K}^\Gamma$  – углы поворота редуктора (линии центров –  $OA$ ) относительно оси вращения колесной пары, вызванные переме-

щениями рамой тележки и колесной парой соответственно;  $\pm Z_T$  и  $\pm Z_K$  – вертикальные перемещения точек крепления реактивной тяги на раме тележки ( $B$ ) и центра оси колесной пары ( $O$ ) (за положительное перемещение принято перемещение вверх);  $\alpha$  – угол отклонения реактивной тяги относительно горизонтали;  $\beta$  – угол отклонения линии центров осевого редуктора ( $OA$ ) от вертикали;  $H$  – расстояние от оси вращения осевого редуктора до точки крепления реактивной тяги к его корпусу;  $L$  – длина реактивной тяги.

Известно, что вертикальные перемещения рамы тележки и колесной пары не приводят к повороту редуктора с горизонтальной тягой при  $\beta = 0^\circ$  [6, 8]. В действительности угол поворота редуктора с идеальной горизонтальной тягой ( $\alpha = 90^\circ$  и  $\beta = 0^\circ$ ), вызванный вертикальными перемещениями  $Z_T$  и  $Z_K$ , зависит от длины реактивной тяги, расстояния и определяется выражениями [10]

$$\varphi_{Z_T}^\Gamma = \frac{1}{2HL} Z_T^2,$$

$$\varphi_{Z_K}^\Gamma = \frac{1}{2HL} Z_K^2.$$

При этом зависимости (1) и (2) также можно записать в более простом виде

$$\delta_{Z_T}^\Gamma = \frac{1}{2L} Z_T^2,$$

$$\delta_{Z_K}^\Gamma = \frac{1}{2L} Z_K^2.$$

Когда угол наклона реактивной тяги осевого редуктора имеет отклонение от идеального положения ( $\alpha \neq 90^\circ$ ), то функциональные зависимости  $\delta_{Z_T}^\Gamma (Z_T)$  и  $\delta_{Z_K}^\Gamma (Z_K)$  можно представить как суммы линейного и нелинейного членов квадратичных функций. Однако для практических расчетов они достаточно сложны. Определим условие для их упрощения и приведения к одному члену. Уравнения (1) и (2) запишем так:

$$\delta_{Z_T}^\Gamma = a_{h_z} \cdot z_T + b_{h_z} \cdot z_T^2,$$

$$\delta_{Z_K}^\Gamma = a_{h_z} \cdot z_K + b_{h_z} \cdot z_K^2,$$

здесь  $a_{h_z}$ ,  $b_{h_z}$  – коэффициенты линейного и квадратичного членов функции:

$$a_{h_z} = \frac{\cos \alpha}{\sin(\alpha \mp \beta)},$$

$$b_{h_z} = \frac{1}{2L \sin(\alpha \mp \beta)} \mp \frac{\sin \beta \cos \alpha}{L \sin^2(\alpha \mp \beta)} + \frac{\cos^2 \alpha}{2L \sin^3(\alpha \mp \beta)}.$$

Варьирование знаков (+) или (–) зависит от положения осевого редуктора и реактивной тяги в пространстве и определено в [12], при этом коэффициенты линейного (6) и квадратичного (7) членов функций (5) равны

$$1) a_{h_z} = 0 \text{ и } b_{h_z} = \frac{1}{2L} \text{ при } \alpha = 90^\circ \text{ и } \beta = 0^\circ;$$

$$2) a_{h_z} = 0 \text{ и } b_{h_z} = \frac{1}{2L \cos \beta} \text{ при } \alpha = 90^\circ \text{ и } \beta \neq 0^\circ;$$

$$3) a_{h_z} = \operatorname{ctg} \alpha \text{ и } b_{h_z} = \frac{1}{2L \sin^3 \alpha} \text{ при } \alpha \neq 90^\circ \text{ и } \beta = 0^\circ.$$

### Исследование и анализ зависимости кинематических перемещений горизонтальной реактивной тяги осевого редуктора с технологическими погрешностями от вертикальных перемещений колесной пары и рамы тележки локомотива

При движении локомотива возможно сочетание значений углов  $\alpha$  и  $\beta$ . Рассмотрим частные случаи, когда  $\alpha = \text{var}$  при  $\beta = \text{idem}$  и  $\beta = \text{var}$  при  $\alpha = \text{idem}$ . Схемы для анализа положения горизонтальной реактивной тяги

и осевого редуктора для этих случаев представлены на рис. 3.

Анализ коэффициентов линейного  $a_{h_z}$  и квадратичного  $b_{h_z}$  членов функций (5) показывает, что при увеличении угла  $\alpha$  при  $\beta = idem$  числитель этих выражений уменьшается, что вызывает увеличение коэффициентов  $a_{h_z}$  и  $b_{h_z}$ , а следовательно, и функций  $\delta_{Z_T}^\Gamma$  и  $\delta_{Z_K}^\Gamma$ .

Уменьшение угла  $\beta$  при  $\alpha = idem$  сопровождается незначительным повышением знаменателя выражений (6) и (7), что в меньшей мере влияет на увеличение этих функций. Такое положение подтверждается графическими зависимостями  $\delta_{Z_T}^\Gamma(\alpha)$  и  $\delta_{Z_T}^\Gamma(\beta)$ , представленными на рис. 4 и 5, для случаев 1 и 2 при перемещениях рамы ходовой тележки локомотива  $Z_T = \pm 25$  мм, построенных для по-

Рис. 3. Положения горизонтальной реактивной тяги и осевого редуктора колесной пары:

*a* – случай 1,  $\beta = 5^\circ$ ,  $\alpha = var$ ;  
*б* – случай 2,  $\alpha = 85^\circ$ ,  $\beta = var$

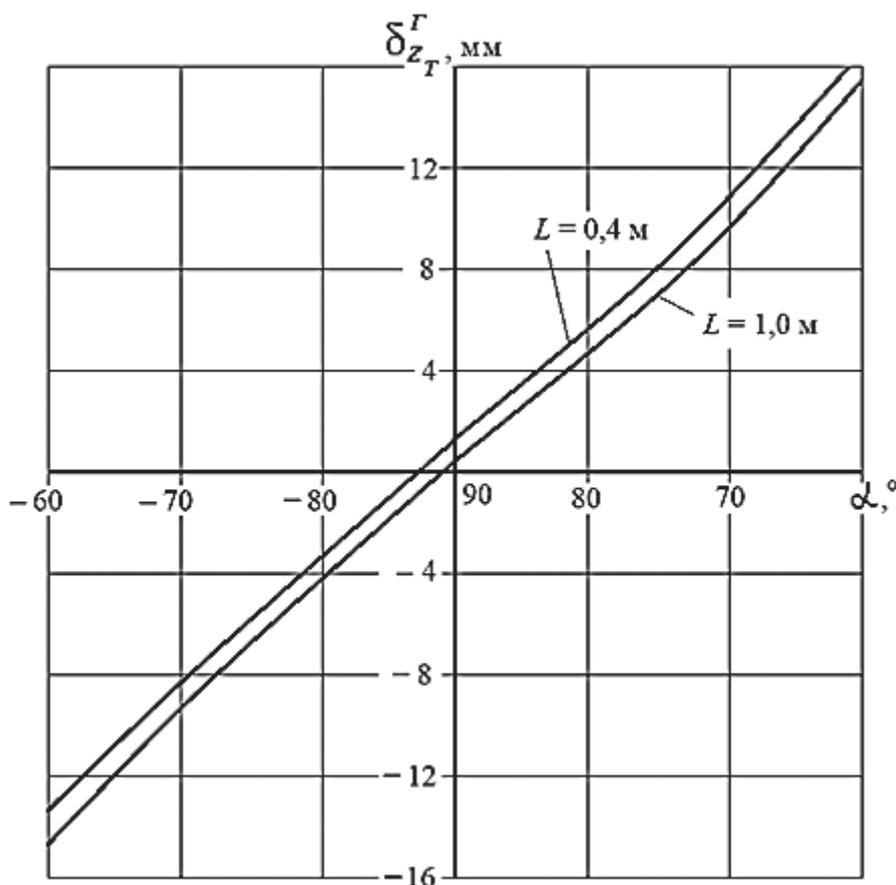
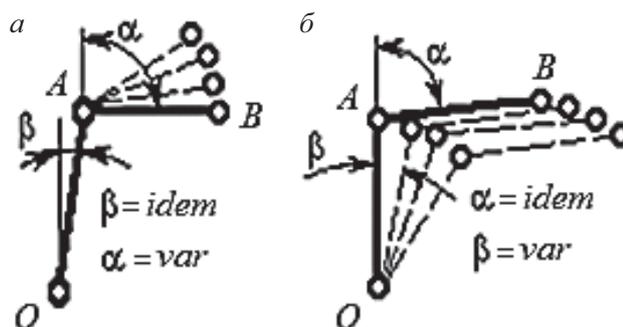


Рис. 4. Зависимость линейного перемещения точки крепления горизонтальной реактивной тяги с корпусом осевого редуктора  $\delta_{Z_T}^\Gamma(\alpha)$  при перемещении рамы тележки  $Z_T = \pm 25$  мм и  $\beta = 5^\circ$

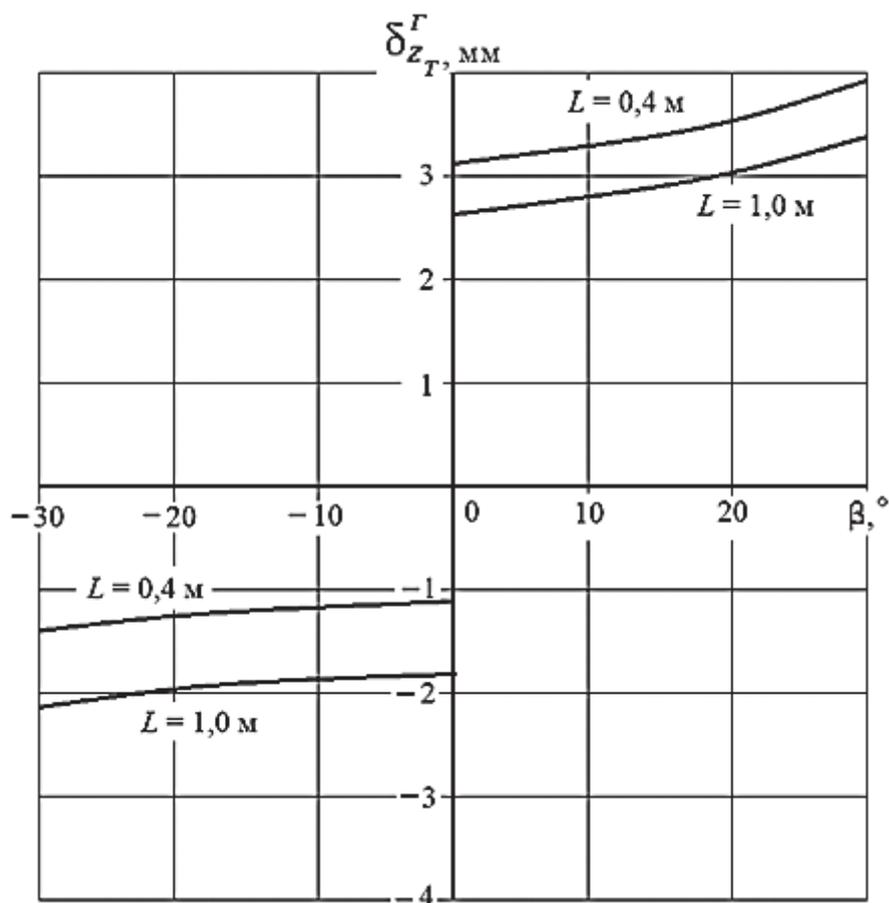


Рис. 5. Зависимость линейного перемещения точки крепления горизонтальной реактивной тяги с корпусом осевого редуктора  $\delta_{Z_T}^{\Gamma}(\beta)$  при перемещении рамы тележки  $Z_T = \pm 25$  мм и  $\alpha = 85^\circ$

стоянных  $\beta = 5^\circ$  и  $\alpha = 85^\circ$  при различных длинах реактивной тяги.

Анализ рис. 4 и 5 позволяет сделать вывод, что при уменьшении отклонения реактивной тяги редуктора от горизонтального положения  $\alpha$  при заданном значении поворота редуктора  $\beta = idem$  (случай 1) величины  $\delta_{Z_T}^{\Gamma}$  возрастают более интенсивно, чем при увеличении отклонения линии центров осевого редуктора от вертикального положения угла  $\beta$ , когда  $\alpha = idem$  (случай 2), т. е. отклонение реактивной тяги от горизонтали ( $\alpha \neq 90^\circ$ ) оказывает большее влияние на увеличение  $\delta_{Z_T}^{\Gamma}$ , чем отклонение линии центров редуктора  $OA$  от вертикального положения  $\beta \neq 0^\circ$ .

Из [13] следует, что графические зависимости (5) представляют параболы с осью, смещенные относительно оси ординат на величину  $m$ :

$$m = -\frac{a_{h_z}}{2b_{h_z}}. \quad (8)$$

Подставив коэффициенты (6) и (7) в (8) и учитывая, что знаки при  $m$  для зависимостей (1) и (2) противоположны, а их значения по абсолютной величине равные, то для общего случая имеем

$$m = \left| \frac{L \cdot \cos \alpha}{1 \pm \frac{\cos \alpha}{\sin(\alpha \mp \beta)} \left( 2 \sin \beta \pm \frac{\cos \alpha}{\sin(\alpha \mp \beta)} \right)} \right|. \quad (9)$$

Варьирование знаков (+) и (-) зависит от положения осевого редуктора и реактивной тяги в пространстве и определено в работе [9].

Для частного случая, когда линия центров осевого редуктора совпадает с вертикальной осью ( $\beta = 0^\circ$ ), можно записать

$$m = |L \cdot \sin^2 \alpha \cdot \cos \alpha|.$$

Для зависимостей  $\delta_{Z_T}^\Gamma(Z_T)$  и  $\delta_{Z_K}^\Gamma(Z_K)$  знаки при  $m$  противоположны, а их значения по абсолютной величине одинаковы. Например, когда линия центров  $OA$  осевого редуктора и реактивная тяга имеют отклонения, как показано на рис. 6, тогда величина  $m$  отрицательна для  $\delta_{Z_T}^\Gamma(Z_T)$  и положительна для  $\delta_{Z_K}^\Gamma(Z_K)$ , т. е. для первой зависимости ось симметрии параболы находится в области отрицательных значений аргумента  $Z_T$ , а для второй – в области положительных  $Z_K$ .

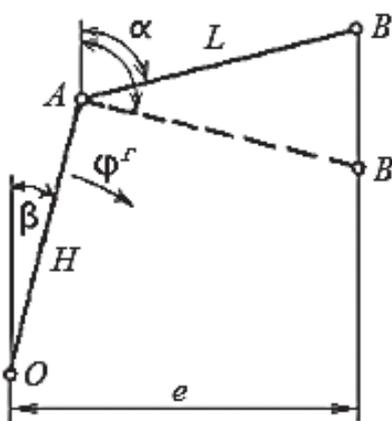


Рис. 6. Схема кинематики осевого редуктора колесной пары с горизонтальной реактивной тягой

Положения осей симметрии парабол зависят не только от  $L$ ,  $\beta$  и  $\alpha$ , но и от параметров рессорного подвешивания локомотива, которые определяют граничные значения амплитуд вертикальных перемещений рамы тележки  $Z_T^0$  и колесной пары  $Z_K^0$  [14, 15]. Таким образом, ось симметрии параболы при  $\alpha \neq 90^\circ$  находится вне интервала изменения аргументов  $Z_T$  и  $Z_K$  ( $m > |Z_{T,K}^0|$ ) или внутри интервала изменения аргументов  $Z_T$  и  $Z_K$  ( $m < |Z_{T,K}^0|$ ).

Для анализа полученных условий построим зависимости  $\delta_{Z_T}^\Gamma(Z_T)$  и  $\delta_{Z_K}^\Gamma(Z_K)$  со значениями, близкими к реальным конструкциям

экипажа и эксплуатационным условиям работы локомотива, т. е.  $Z_{T,K} = \pm 25$  мм,  $\alpha = 88^\circ$ ,  $\beta = 5^\circ$ , и представим их на рис. 7.

Анализ графических зависимостей, построенных по полученным уравнениям и представленных на рис. 7, позволяет сделать следующие выводы:

1. Если при  $\alpha \neq 90^\circ$  выполняется условие  $m > |Z_{T,K}^0|$ , то значения функций  $\delta_{Z_T}^\Gamma(Z_T)$  и  $\delta_{Z_K}^\Gamma(Z_K)$  располагаются на одной из ветвей квадратичной параболы (рис. 7, кривые 1, 2) и знак первых производных этих функций не меняется в интервале изменения аргументов  $Z_T$  и  $Z_K$ . Из структуры формул (5) и (6) видно, что двойная амплитуда функций  $\delta_{Z_T}^\Gamma(Z_T)$  и  $\delta_{Z_K}^\Gamma(Z_K)$ , определяемая как сумма линейного и квадратичного членов, равна двойной амплитуде линейного члена. Потому для инженерных расчетов перемещения точки соединения осевого редуктора с горизонтальной реактивной тягой при вертикальных перемещениях рамы тележки и колесной пары можно определять по формулам

$$\delta_{Z_T}^\Gamma = a_{hz} \cdot Z_T, \quad \delta_{Z_K}^\Gamma = -a_{hz} \cdot Z_K.$$

2. Если при  $\alpha \neq 90^\circ$  выполняется условие  $m < |Z_{T,K}^0|$ , то значения функций  $\delta_{Z_T}^\Gamma(Z_T)$  и  $\delta_{Z_K}^\Gamma(Z_K)$  располагаются на обеих ветвях квадратичной параболы внутри интервала изменения аргументов  $Z_T$  и  $Z_K$  этих функций. В таком случае знак первых производных меняется (рис. 7, кривая 3), а величину перемещения точки крепления реактивной тяги к осевому редуктору при вертикальных перемещениях рамы тележки и колесной пары следует определять по формулам (5) и (6) без упрощений.

## Заключение

Получены аналитические зависимости кинематических пространственных перемещений горизонтальной реактивной тяги и осевого редуктора с технологическими по-

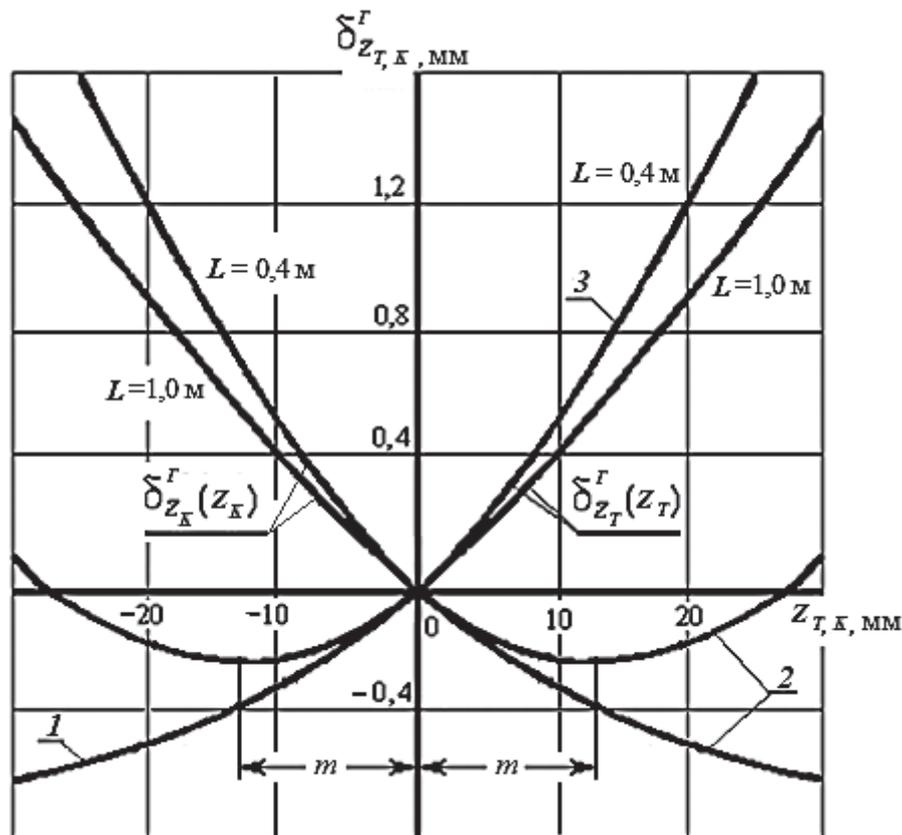


Рис. 7. Зависимости пространственных перемещений точки крепления реактивной тяги к корпусу осевого редуктора  $\delta_{z_T}^r(Z_T)$  и  $\delta_{z_K}^r(Z_K)$  при вертикальных перемещениях рамы тележки и колесной пары до  $Z_{T,K} = \pm 25$  мм и  $\alpha = 88^\circ$ ,  $\beta = 5^\circ$

грешностями группового тягового привода от вертикальных перемещений рамы ходовой тележки и колесной пары во время движения локомотива.

Установлены граничные условия для упрощения полученных зависимостей углов наклона реактивных тяг и линий центров осевых редукторов колесных пар группового тягового привода с технологическими погрешностями их деталей и элементов от вертикальных перемещений рамы ходовой тележки и колесной пары локомотива.

На основании анализа полученных зависимостей рассмотрены возможные варианты схем пространственного перемещения горизонтальных реактивных тяг и осевого редуктора в раме ходовой тележки локомотива с возможными отклонениями линейных размеров от технологических допусков.

Построены графики зависимостей вертикальных перемещений элементов конструкции тягового привода от вертикальных перемещений рамы тележки при движении локомотива.

### Библиографический список

1. Воробьев В. В. Автоматрисы и автодрезины: Управление и обслуживание / В. В. Воробьев, М. А. Самсонов, В. Е. Чекулаев. – М.: Транспорт, 1987. – 215 с.
2. Собенин Л. А. Исследование вариантов карданного привода к осям колесных пар тепловоза / Л. А. Собенин, Ф. Ф. Сабуров // Тр. ЛИИЖТа. – 1970. – Вып. 309. – С. 84–91.
3. Тепловозы ТГМ4 Б, ТГМ4 БЛ: Руководство по эксплуатации и обслуживанию. – М.: Транспорт, 1990. – 208 с.

4. Логунов В.Н. Устройство тепловоза ТГМ6А / В.Н. Логунов, Л.Н. Кузнецов, Е.Н. Чебанова и др. – М. : Транспорт, 1981. – 287 с.

5. Развитие локомотивной тяги / под ред. Н.А. Фуфрянского, А.Н. Бевзенко. – М. : Транспорт, 1988. – 344 с.

6. Бирюков И.В. Тяговые передачи электроподвижного состава железных дорог / И.В. Бирюков, А.И. Беляев, Е.К. Рыбников. – М. : Транспорт, 1986. – 256 с.

7. Бахолдин В.И. Исследование взаимодействия элементов группового привода колесных пар локомотивов : дис. ... канд. техн. наук : 05.22.07 / В.И. Бахолдин. – Л. : ЛИИЖТ, 1979. – 142 с.

8. Бирюков И.В. Об одной особенности группового привода с опорно-осевыми редукторами / И.В. Бирюков // Сб. науч. тр. МИИТа. – 1973. – Вып. 445. – С. 25–36.

9. Кручек В.А. Групповой карданный тяговый привод колесных пар железнодорожного подвижного состава / В.А. Кручек. – СПб. : МПС РФ ; ПГУПС (ЛИИЖТ), 2002. – 139 с.

10. Шаройко П.М. Гидравлические передачи тепловозов / П.М. Шаройко, В.Т. Середка. – М. : Транспорт, 1969. – 160 с.

11. Кручек В.А. Кинематика тягового привода локомотивов / В.А. Кручек, А.В. Овчинников // Межвуз. сб. науч. тр. Актуальные вопросы обеспечения войск (сил) в транспортном отношении. – СПб. : ВАТТ (ВТУ ЖДВ РФ), 2002. – Вып. 2. – С. 17–25.

12. Кручек В.А. Параметры кинематических перемещений осевого редуктора с горизонтальной реактивной тягой группового тягового привода с технологическими погрешностями установки при работе первой ступени рессорного подвешивания / В.А. Кручек, А.М. Евстафьев // Науч.-техн. журн. «Электроника и электрооборудование транспорта». – 2016. – № 2. – С. 39–43.

13. Фильчиков П.Ф. Справочник по высшей математике / П.Ф. Фильчиков. – Киев : Наукова думка, 1974. – 743 с.

14. Евстратов А.С. Вертикальная динамика локомотивов / А.С. Евстратов // Сб. науч. тр. ВНИТИ. – 1966. – Вып. 22. – С. 35–45.

15. Крепгорский С.С. Вертикальные колебания наддресорного строения поддресоренно-

го строения подвижного состава и влияние их на путь / С.С. Крепгорский // Сб. науч. тр. ЦНИИ МПС. – 1956. – Вып. 152. – С. 25–31.

## References

1. Vorobiyev V.V., Samsonov M. A. & Chekulayev V.Y. *Avtomotrysy i avtodrezyiny: Upravleniye i obsluzhyvaniye* [Motorailers and railway motor cars: control and maintenance]. Moscow, Transport Publ., 1987, 215 p. (In Russian)

2. Sobenyn L.A. & Saburov F.F. *Issledovaniye variantov kardannogo pryvoda k osyam kolesnykh par teplovoza* [Study of cardan drive variants to wheelset axles of a diesel-electric locomotive]. *Proceedings of LIIZhT*, 1970, issue 309, pp. 84–91. (In Russian)

3. *Teplovozy TGM4B, TGM4BL: Rukovodstvo po ekspluatatsii i obsluzhyvaniyu* [TGM4B, TGM4BL diesel locomotives: Operating and maintenance manual]. Moscow, Transport Publ., 1990, 208 p. (In Russian)

4. Logunov V.N., Kuznetsov L.N., Chebanova Y.N. et al. *Ustroystvo teplovoza TGM6A* [TGM6A diesel locomotive configuration]. Moscow, Transport Publ., 1981, 287 p. (In Russian)

5. *Razvitiye lokomotyvnoy tyagy* [Locomotive traction development]. Eds N.A. Fufyanskiy, A.N. Bevzenko. Moscow, Transport Publ., 1988, 344 p. (In Russian)

6. Byryukov I.V., Belyayev A.I. & Rybnykov Y.K. *Tyagoviye peredachy elektropodvyzhnogo sostava zheleznikh dorog* [Tractive gears of electrically propelled railroad vehicle]. Moscow, Transport Publ., 1986, 256 p. (In Russian)

7. Bakholdyn V.I. *Issledovaniye vzaimodeystviya elementov gruppovogo pryvoda kolesnykh par lokomotyvov* [Study of component interaction of locomotives wheelset group operation]. Diss. Cand. Sci: 05.22.07. Leningrad, LIIZhT Publ., 1979, 142 p. (In Russian)

8. Byryukov I.V. *Ob odnoy osobennosti gruppovogo pryvoda soporno-osevymy reduktoramy* [On a specificity of group operation with backing axial gears]. *Collected Papers of MIIT*, 1973, issue 445, pp. 25–36. (In Russian)

9. Kruchek V.A. *Gruppovoy kardanniy tyagoviy pryvod kolesnykh par zheleznodorozhnogo podvyzhnogo sostava* [Group cardan tractive drive of a railroad wheel set rolling stock]. Saint Petersburg, MPS

RF Publ., PGUPS (LIIZhT) Publ., 2002, 139 p. (In Russian)

10. Sharoyko P. M. & Sereda V. T. *Gydravlycheskiye peredachy teplovozov [Hydraulic speed gears of diesel-electric locomotives]*. Moscow, Transport Publ., 1969, 160 p. (In Russian)

11. Kruchek V. A. & Ovchynnykov A. V. Кинематика тягового привода локомотивов [Locomotive's traction gear kinematics]. *Mezhvuzovskiy sbornik nauchnykh trudov. Aktualniye voprosy obespecheniya voisk (syl) v transportnom otnoshenii [Interuniversity Coll. Papers Topical issues on the provision of troops (forces) with transport]*. Saint Petersburg, VATT (VTU ZhDV RF) Publ., 2002, issue 2, pp. 17–25. (In Russian)

12. Kruchek V. A. & Yevstafijev A. M. Parametry kinematicheskikh peremesheniy oseвого редуктора s goryzontalnoy reaktyvnoy tyagoy gruppovogo tyagovogo privoda s tekhnologicheskimi pogreshnostyami ustanovki pry rabote pervoy stupeny resornogo podveshyvaniya [Parameters of kinematical movements

of axial gear set with horizontal jet thrust of group tractive drive with instrument accuracies of installation during the first stage of springing]. *Electronics and electronic equipment of transport*, 2016, no. 2, pp. 39–43. (In Russian)

13. Fylchykov P. F. *Spravochnyyk po vysshey matematyke [Higher mathematics reference book]*. Kiev, Naukova dumka Publ., 1974, 743 p. (In Russian)

14. Yevstratov A. S. Vertikalnaya dinamika lokomotyvov [Vertical dynamics of locomotives]. *Sbornik nauchnykh trudov VNITI [Coll. Sci. Papers of VNITI]*, 1966, issue 22, pp. 35–45. (In Russian)

15. Krepgorsky S. S. Vertykalniye kolebaniya nadressornogo stroyeniya podressornogo stroyeniya podvizhnogo sostava i vliyanye ikh na put [Vertical oscillations of overspring structure and underspring structure of railway vehicles and their influence on the way]. *Sbornik nauchnykh trudov TsNII MPS [Coll. Sci. Papers of TsNII MPS]*, 1956, issue 152, pp. 25–31. (In Russian)

\* КРУЧЕК Виктор Александрович – доктор техн. наук, профессор; ЕВСТАФЬЕВ Андрей Михайлович – канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой, evstam@mail.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 629.424.3:629.4.027

**В. А. Кручек, А. В. Грищенко, Т. С. Титова****КОЭФФИЦИЕНТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СЦЕПНОЙ МАССЫ ЛОКОМОТИВА  
С ГРУППОВЫМ ТЯГОВЫМ ПРИВОДОМ КОЛЕСНЫХ ПАР**

Дата поступления: 11.01.2017

Решение о публикации: 24.04.2017

**Аннотация**

**Цель:** Повысить точность аналитического расчета сцепной массы построенных и вновь проектируемых локомотивов с групповым тяговым приводом колесных пар. Вывести аналитическую зависимость коэффициента использования сцепной массы локомотива от числа колесных пар в групповом тяговом приводе с учетом конструктивных особенностей экипажа, условий эксплуатации и режимов работы силовых установок. **Методы:** Аналитические зависимости и математическая модель получены на основании знаний высшей математики, законов теоретической механики, теории надежности, теории вероятности, теории сцепления колеса с рельсом и законах фрикционных автоколебаний при боксовании. **Результаты:** Разработана математическая модель для определения наибольшего значения вращающего момента, при котором наступает разное боксование группового тягового привода колесных пар локомотива с учетом стохастической природы сцепления колес с рельсами, колебания кузова в момент трогания с места и во время движения. Построена графическая зависимость поправочного коэффициента от обобщенного параметра тягового привода локомотива. **Практическая значимость:** Аналитические зависимости позволяют правильно найти сцепную массу локомотива с групповым тяговым приводом колесных пар для проведения тяговых расчетов и оценки тяговых возможностей локомотива в эксплуатации на различных режимах работы силовых установок и скорости движения. Установлен уровень динамических нагрузок на элементы группового тягового привода с учетом конструктивных особенностей ходовых тележек и силовой трансмиссии, таких как положение реактивных тяг осевых редукторов колесных пар, а также условий эксплуатации – скорости движения и неровности железнодорожного пути. Результаты исследования применимы при проектировании новых и построенных локомотивов.

**Ключевые слова:** Тепловоз, групповой тяговый привод, колесная пара, коэффициент сцепления, сцепная масса, реактивная тяга, ходовая тележка, карданный вал, динамическая нагрузка, вращающий момент, осевая нагрузка, эксплуатационные факторы, тяговые свойства.

\***Victor A. Kruchek**, D. Sci., professor; **Aleksander V. Grishenko**, D. Sci., professor; **Tamila S. Tytova**, D. Sci., professor, head of a chair (Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University)  
UTILIZATION FACTOR OF ADHESIVE WEIGHT OF A LOCOMOTIVE WITH GROUP TRACTIVE ENGINE DRIVE OF WHEELSETS

**Summary**

**Objective:** To improve accuracy of analytical calculation of adhesive weight of constructed and newly projected locomotives with wheelset group tractive drive. To bring out analytical dependence of a locomotive's adhesive weight usage coefficient from a number of wheelsets in a group tractive engine considering constructive features of a vehicle, operating conditions and power equipment cycle of operation. **Methods:** Analytical dependences and a mathematical model were obtained on the basis of higher mathematics, laws of theoretical mechanics, reliability theory, probability theory, wheel-rail adhesion theory and the laws of self-excited frictional oscillations during slippage. **Results:** Mathematical

model was developed to determine the highest value of a twisting moment, in the process of which occurs different slippage of a wheelset group tractive drive of a locomotive, taking into account the stochastic character of wheel-rail adhesion, shaking at the moment of starting and in the process of running. Characteristic curve of equalizing factor was plotted from a generalized parameter of a locomotive tractive drive. **Practical importance:** Analytical dependences make it possible to identify the right adhesive weight of a locomotive with wheelset group tractive drive for conducting traction calculations and the assessment of locomotive's tractive capacity in the process of operation on different cycles of power equipment and movement speed. The level of dynamic load on group tractive drive components was determined, taking into account constructive features of trucks and power transmission, such as the jet thrust location of wheelset axial gear units, as well as maintenance conditions – movement speed and irregularities of a railway track. The results of the study may be applied in projecting the new and constructed locomotives.

**Keywords:** Diesel locomotive, group tractive drive, wheelset, adhesion coefficient, adhesive weight, jet thrust, carriage, drive shaft, dynamic load, driving torque, axial load, operational factors, tractive characteristics.

## Введение

Тяговые возможности группового привода колесных пар локомотива при известных серьезных отрицательных свойствах по многим показателям превосходят таковые у индивидуального тягового привода. Так, коэффициент использования сцепной массы при прочих равных внешних условиях работы у локомотива с групповым тяговым приводом выше, чем с индивидуальным приводом. Количественная оценка этого показателя зависит в первую очередь от числа механически связанных в нем осей. Поэтому в свете проблемы повышения и достижения максимального использования мощности силовой установки локомотива задача сравнения тяговых свойств локомотивов с различным числом механически связанных осей в тяговом приводе и результаты указанного сравнения актуальны и имеют важное научно-практическое значение.

### Коэффициент использования сцепной массы локомотива с групповым тяговым приводом колесных пар

В общем виде коэффициент использования сцепной массы ( $\eta_{\text{сц}}$ ) рассчитывается по формуле [1]

$$\eta_{\text{сц}} = \frac{\psi}{\psi_0} \text{ или } \eta_{\text{сц}} = \frac{m_{\text{кп}} - \Delta m_{\text{кп}}}{m_{\text{кп}}},$$

где  $\psi$  – коэффициент сцепления оси, вступившей в режим боксов;  $\psi_0$  – коэффициент сцепления локомотива, определяемый отношением общей силы тяги на ободу колес к силе тяжести от общей сцепной массы локомотива;  $m_{\text{кп}}$  – сцепная масса, приходящаяся на колесную пару:  $m_{\text{кп}} = G_{\text{кп}} / g$ ;  $g$  – ускорение свободного падения ( $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ );  $\Delta m_{\text{кп}}$  – неиспользуемая величина сцепной массы, приходящаяся на колесную пару:  $\Delta m_{\text{кп}} = \Delta G_{\text{кп}} / g$ .

Многочисленные исследования показали, что величина  $\eta_{\text{сц}}$  в эксплуатации для разных тележечных электровозов и тепловозов в среднем составляет 0,86–0,94. Снижение тяговых возможностей локомотива связано с различными ситуациями в эксплуатации и конструктивными особенностями экипажной части. Если некоторые конструкционные особенности и факторы можно рассчитать или предусмотреть заранее на стадии проектирования нового локомотива, например распределение веса по колесным парам во время трогания локомотива с места при реализации максимальной мощности силовой установкой, различие электромеханических характеристик тяговых электродвигателей и др., то в условиях эксплуатации определить влияние

внешних факторов: нестабильность сцепления колес с рельсами, ветер, наличие и количество стыков, профиль железнодорожного пути и др., практически невозможно. Анализ известных способов повышения коэффициента  $\eta_{\text{сц}}$  показывает, что довести его значение до максимального, близкого к единице, возможно только конструкционными решениями экипажной части локомотива.

Общеизвестно, что групповой тяговый привод по сравнению с индивидуальным способен практически полностью использовать сцепную массу локомотива на любых режимах работы локомотива, хотя это требует некоторых дополнительных энергетических затрат силовой установки по причине появления так называемой «циркуляции» энергии в замкнутом контуре привода. Однако эксплуатационные условия работы локомотива и действия внешних факторов все же сказываются на величине  $\eta_{\text{сц}}$  и значение его может быть меньше ожидаемого.

Установим зависимость между  $\eta_{\text{сц}}$  и числом колесных пар в групповом тяговом приводе локомотива, учитывая наиболее существенные эксплуатационные факторы. Определим наиболее целесообразные режимы работы и

оценим надежность привода при действии на него динамических факторов во время движения локомотива.

Для получения ответа на поставленную задачу была исследована трансмиссия четырехосного тягового привода секции тепловоза серии ТГ16 (рис. 1) [2].

Особенностью представленной трансмиссионной схемы группового тягового привода является то, что число спаренных колесных пар 3 с осевыми редукторами 9 в приводе можно менять от двух до четырех. Это возможно осуществить с помощью соединительного вала 5, который монтируется в приводе и объединяет две двухосные ходовые тележки 4 в единую кинематическую схему привода, каждая из которых приводится в действие от дизеля 1 и гидропередачи 2. В данном случае групповой тяговый привод преобразуется из двух последовательных двухосных в один симметричный четырехосный привод.

К статическим факторам, влияющим на использование сцепной массы локомотива с соединительным валом двух гидропередач и без него, относятся переразгрузка тележек локомотива в момент трогания с места и разброс характеристик энергетических установок.

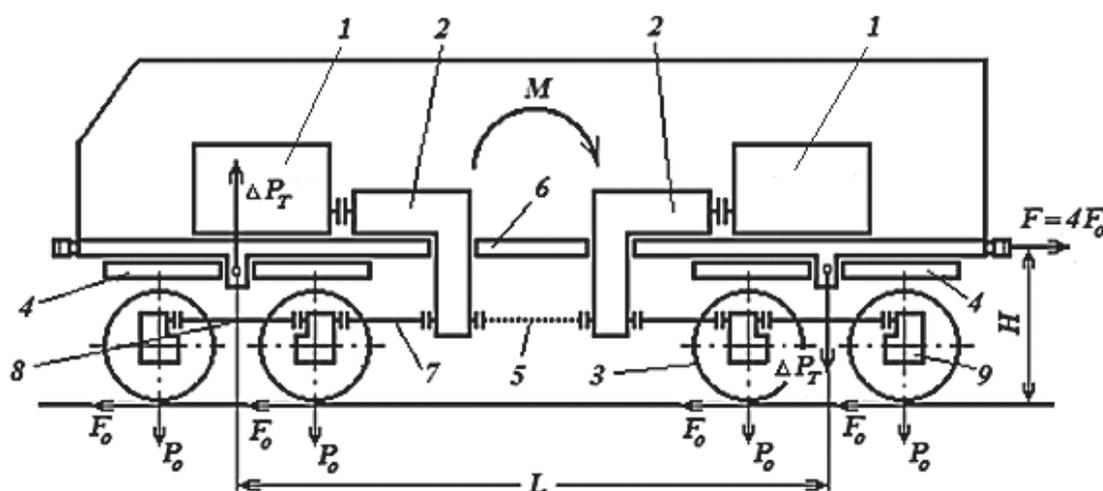


Рис. 1. Схема тяговой трансмиссии группового четырехосного привода секции тепловоза с двумя силовыми установками:

1 – дизель; 2 – гидропередача; 3 – колесная пара; 4 – ходовая тележка; 5 – соединительный карданный вал; 6 – главная рама тепловоза; 7 – раздаточный карданный вал; 8 – тележечный карданный вал; 9 – осевой редуктор

Переразгрузка колесных пар не сказывается на использовании сцепной массы рассматриваемого локомотива как с промежуточным валом, так и без него, так как осевые редуктора каждой тележки разведены в разные стороны, а сцепная масса тележек остается неизменной. Переразгрузка же ходовых тележек приводит к потере сцепной массы локомотива без соединительного вала, так как сила тяги  $F$  не может быть выше удвоенного сцепного веса передней разгруженной тележки. Тогда

$$F = 2\psi_{CP}(2P_o - \Delta P_T), \quad (1)$$

где  $\psi_{CP}$  – расчетный коэффициент сцепления;  $P_o$  – осевая нагрузка;  $\Delta P_T$  – величина разгрузки передней и догрузки задней тележек.

В соответствии с законами статики имеем (рис. 1)

$$\Delta P_T = \frac{H - R}{L} \cdot F, \quad (2)$$

здесь  $R$  – радиус круга катания колеса;  $H$  – расстояние от автосцепки до головки рельса;  $L$  – база тепловоза.

После преобразований (1) и (2) получим

$$F = \frac{4\psi_{CP}P_o}{1 + 2\psi_{CP} \frac{H - R}{L}}.$$

Так как сцепной вес локомотива составляет  $4\psi_{CP}P_o$ , а величина  $2\psi_{CP} \frac{H - R}{L} \ll 1$ , то

коэффициент использования сцепной массы локомотива в этом случае определяется следующим образом:

$$\eta_{сц}^I \approx 1 - 2\psi_{CP} \frac{H - R}{L}.$$

Таким образом, локомотив с соединительным валом 5 между гидропередачами 2 имеет преимущество по коэффициенту использования сцепной массы перед тепловозом без соединительного вала из-за перегрузки ходовых тележек:

$$\Delta\eta_{сц}^I = 2\psi_{CP} \frac{H - R}{L}.$$

Различие тяговых характеристик энергетических установок 1 вследствие неравенства частот вращения коленчатых валов дизелей и вязкости масла в гидроаппаратах 2 у тепловоза с промежуточным валом 5 между гидропередачами не сказывается на коэффициенте использования сцепной массы, т.е. суммарная сила тяги остается постоянной. Для тепловоза без промежуточного вала 5 между гидропередачами коэффициент использования сцепной массы уменьшается:

$$\eta_{сц}^{II} = 1 - \frac{\Delta M_T}{M_T}.$$

Зная это, можно записать, что

$$\Delta\eta_{сц}^{II} = \frac{\Delta M_T}{M_T}.$$

По данным [3] отношение  $\frac{\Delta M_T}{M_T} = 0,05$ ,

поэтому величина  $\Delta\eta_{сц}^{II}$  также составляет 0,05.

При движении локомотива в тяговом приводе возникают динамические нагрузки в результате действия как внешних, так и внутренних факторов. К наиболее значимым внешним факторам относятся боксование локомотива, колебания обрессоренных масс и удары при прохождении рельсовых стыков, а к наиболее значительным внутренним – кинематические погрешности осевых редукторов и «изломы» карданных валов.

Динамические нагрузки тягового привода при боксовании локомотива, появляющиеся вследствие фрикционных автоколебаний, достаточно хорошо изучены. На основе теоретических и экспериментальных исследований установлено, что указанные нагрузки в 3 раза превышают максимальную статическую нагрузку [4] и являются поэтому определяющими при расчете узлов и деталей тягового

привода на прочность. Но при проверке надежности и долговечности тягового привода учет динамических нагрузок при боксовании не обязателен из-за малого времени работы локомотива в этом режиме. На надежность узлов тягового привода существенное влияние оказывают динамические нагрузки, возникающие из-за вынужденных крутильных колебаний привода.

Одной из причин вынужденных крутильных колебаний элементов тягового привода тепловоза служат кинетические и технологические погрешности осевых редукторов. В результате проведенных исследований [3] установлено, что максимальная кинематическая погрешность осевых редукторов составляет  $10'$ , что вызывает динамическую нагрузку на колесной паре в 4,3 кН, равную 6,0% от максимальной силы тяги.

Рассмотрим динамические нагрузки тягового привода от колебаний обрессоренных масс тепловоза.

Рама тележки тепловоза во время движения перемещается в вертикальной плоскости по отношению к колесной паре и расположено на ней осевому редуктору (рис. 2).

Во время движения экипажа изменения взаимного положения осевого редуктора и рамы тележки приводят к вращательным колебаниям корпуса редуктора вокруг оси колесной пары, которые приводят к закручиванию входного вала редуктора. При изменении

угла закручивания вала редуктора возникают крутильные колебания валопровода системы, создающие дополнительные низкочастотные (около 3 Гц) динамические нагрузки в элементах привода.

На динамические нагрузки тягового привода, вызванных колебаниями обрессоренных масс тепловоза, влияет положение реактивной тяги осевого редуктора [5]. Теоретическими исследованиями установлено, что угол поворота осевого редуктора  $\varphi$  вокруг оси колесной пары при динамической осадке рессорного подвешивания рамы тележки  $Z$  определяется соответственно следующими формулами:

- при горизонтальной реактивной тяге

$$\varphi = \frac{Z^2}{2H_p L_p}, \quad (3)$$

- при вертикальной реактивной тяге

$$\varphi = \frac{Z}{H_p}, \quad (4)$$

где  $H_p$  – расстояние от точки закрепления реактивной тяги на корпусе осевого редуктора до оси колесной пары;  $L_p$  – длина реактивной тяги.

Так как  $\frac{Z}{2L_p} \ll 1$ , то из (3) и (4) следует, что угол поворота осевого редуктора и про-

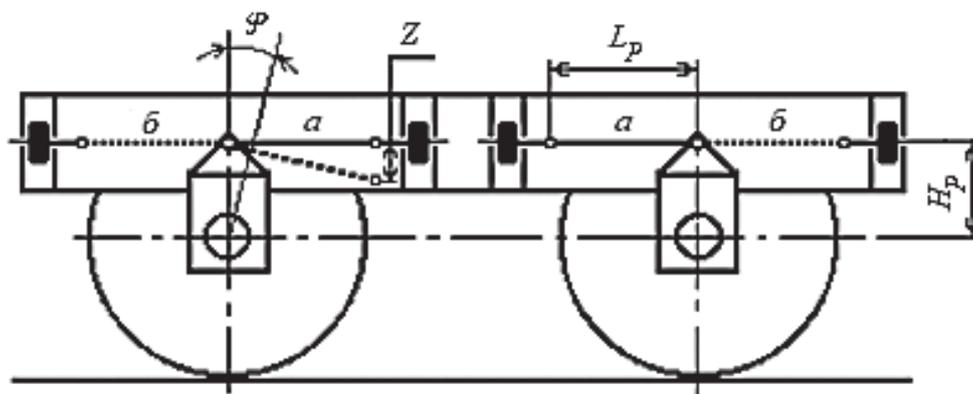


Рис. 2. Варианты крепления осевых редукторов колесных пар в ходовых тележках локомотивов с групповым тяговым приводом

порциональные ему динамические нагрузки в тяговом приводе от колебаний рамы тележки при горизонтальной тяге ниже, чем при вертикальной. Кроме того, при горизонтальной реактивной тяге динамический момент может быть уменьшен путем увеличения не только расстояния от точки ее закрепления до оси колесной пары, но и ее длины. Экспериментальные исследования показали, что в случае горизонтального расположения реактивных тяг величина динамического момента, по крайней мере, в 2 раза ниже, чем при вертикальном их расположении [6].

Наличие в карданном приводе колесных пар тепловоза осевых редукторов вызывает зависимость формы и величины динамических нагрузок элементов привода от расположения реактивных тяг относительно рамы тележки [5]. При сходящихся реактивных тягах (рис. 2, *a – a*) колебания подпрыгивания тележки приводят к противофазным крутильным колебаниям группового тягового привода, а колебания галопирования практически не вызывают динамических нагрузок привода. При расходящихся реактивных тягах (рис. 2, *б – б*) колебания упругого подвешивания рамы тележки любого вида вызывают противофазные крутильные колебания группового тягового привода. Именно влиянием колебаний галопирования при расходящихся реактивных тягах, закрепленных на крайних поперечных балках тележки, объясняются относительно большие динамические нагрузки в групповом тяговом приводе тепловоза. При расположении реактивных тяг осевых редукторов в одном направлении (рис. 2, *a – б*) колебания рамы тележки любого вида обуславливают возникновение в групповом тяговом приводе синфазных крутильных колебаний.

Горизонтальное сходящееся расположение реактивных тяг осевых редукторов является наиболее рациональным с точки зрения минимизации динамических нагрузок группового тягового привода, вызываемых колебаниями обрессоренных масс тепловоза. По ориентировочным оценкам указанные нагрузки не превосходят 3,8 кН на колесную пару, что

составляет 5,2% от максимального значения силы тяги.

Поездные испытания локомотивов показали, что при наезде колесными парами на неровность пути или прохождении рельсовых стыков и крестовин в тяговом приводе локомотива возникают значительные дополнительные динамические нагрузки [6]. Установлено также, что динамические нагрузки зависят от конструкции экипажной части локомотива. Величина дополнительных динамических нагрузок на привод зависит: при горизонтальном расположении реактивной тяги осевого редуктора от перемещения, скорости и ускорения колесной пары в вертикальной плоскости относительно рамы ходовой тележки; при вертикальном расположении реактивной тяги – только от вертикального ускорения колесной пары. Причем их уровень при горизонтальной реактивной тяге осевого редуктора ниже, чем при вертикальной. Экспериментальные исследования дизель-поездов ДР1А с вертикальной реактивной тягой и тепловозов ТГ102 с горизонтальной подтвердили этот вывод [5, 7]. На рис. 3 представлены амплитуды динамических нагрузок в реактивных тягах осевых редукторов от скорости движения, где видно, что динамические нагрузки при горизонтальном расположении реактивных тяг на тепловозе ТГ102 в 1,8 раза меньше, чем при вертикальных реактивных тягах на дизель-поезде ДР1А.

Кроме того, следует указать, что возникающие в групповом тяговом приводе силы от прохождения одной колесной парой рельсовых стыков вызывают динамические нагрузки в реактивных тягах осевых редукторов других колесных пар, не взаимодействующих в этот момент с рельсовыми стыками. Такой факт говорит о том, что динамическое воздействие рельсовых стыков распространяется по всей трансмиссии привода локомотива. Отметим и то, что динамические нагрузки в горизонтальных реактивных тягах осевых редукторов, вызванные прохождением колесными парами рельсовых стыков, не превышают, согласно рис. 3, 10 кН, что составляет

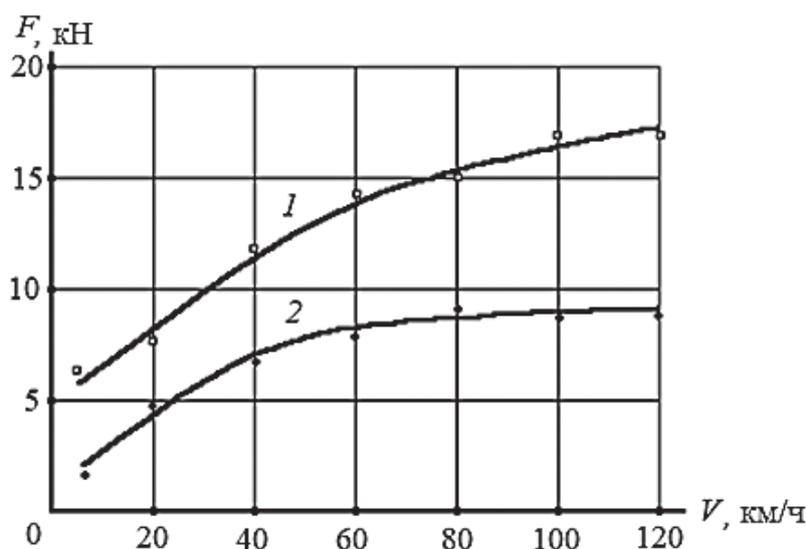


Рис. 3. Динамические нагрузки в реактивных тягах осевых редукторов дизель-поезда ДР1А (1) и тепловоза ТГ102 (2) от прохождения стыков железнодорожного полотна при различных скоростях движения, приведенные к осям колесных пар

13,4% от максимального значения силы тяги на колесной паре.

Существенную роль в нагруженности элементов привода играют параметры их упругости. Особый интерес вызывает влияние жесткостей амортизаторов реактивных тяг осевых редукторов на динамические нагрузки привода, так как они предназначены для снижения динамических усилий и некоторое выравнивание тяговых нагрузок между колесными парами [8].

Выравнивание тяговых нагрузок по колесным парам группового привода в «стоповом» режиме работы и при резком изменении мощности тепловоза в некоторой степени достигается путем применения резинометаллических амортизаторов реактивных тяг осевых редукторов. Однако заметного улучшения тяговых свойств тепловоза эта мера не дает, так как в отсутствие амортизаторов наиболее нагруженная колесная пара при достижении предела по сцеплению незначительно (из-за высокой жесткости привода) проскальзывает по рельсу, что незамедлительно приводит к увеличению тяги другой колесной пары и обеспечивает полное использование сцепной массы [9, 10]. В случае же установившегося

режима движения тепловоза распределение тягового усилия по колесным парам группового привода не зависит от упругих параметров его элементов, а определяется осевыми нагрузками, условиями сцепления колес с рельсами и разностью диаметров кругов катания колесных пар [11].

Наличие амортизаторов реактивных тяг способствует уменьшению динамических нагрузок в тяговом приводе от технологических погрешностей деталей осевых редукторов. Амортизаторы уменьшают динамические нагрузки в реактивных тягах, вызываемые колебаниями обрессоренных масс тепловоза и прохождением колесными парами рельсовых стыков. Однако малая жесткость амортизаторов реактивных тяг ведет к росту углов «излома» карданных валов, что приводит к увеличению динамических нагрузок тягового привода. Поэтому понижение параметров жесткости амортизаторов реактивных тяг осевых редукторов тепловозов с целью уменьшения динамических нагрузок группового привода не может быть признано целесообразным. Следует отметить и то, что жесткость амортизаторов реактивных тяг не оказывает существенного влияния на динами-

ческие нагрузки тягового привода в режиме боксования, которые являются определяющими при расчете элементов привода на прочность [12, 13].

Итак, большинство динамических факторов практически в равной степени влияют на снижение сцепной массы тепловоза с промежуточным валом гидропередат и без него. Исключение составляет изменение сцепной массы, приходящейся на отдельный привод, вследствие галопирования тепловоза и стохастической природы сцепления.

С целью анализа влияния указанных факторов примем, что момент сцепления  $M_{сц}$ , приходящийся на отдельный тяговый привод, изменяется по гармоническому закону (рис. 4):

$$M_{сц} = M_{сц}^C - \Delta M_{сц}^C \sin(2\pi vt + \alpha) - B \cdot u, \quad (5)$$

где  $M_{сц}^C$ ,  $\Delta M_{сц}^C$  – среднее и амплитудное значения момента сцепления, приходящегося на отдельный тяговый привод, соответственно;  $u$  – линейная скорость скольжения колес по рельсам при боксовании;  $v$ ,  $\alpha$ ,  $t$  – частота, начальная фаза и время изменения момента сцепления соответственно;  $B$  – коэффициент, характеризующий уменьшение момента сцепления с увеличением скорости скольжения.

Для определения наибольшего значения вращающего момента  $M_{BP}$ , при котором может наступить разное боксование всего тягового привода, уравнение (5) дополним выражениями вращающего момента, начальной фазы изменения момента сцепления и уравнением движения экипажа

$$\begin{cases} M_{BP} = M_{сц}^C - \Delta M_{BP} - Au, \\ \sin \alpha = \frac{\Delta M_{BP}}{\Delta M_{сц}^C}, \\ \frac{J}{R} \frac{du}{dt} = M_{BP} - M_{сц}, \end{cases} \quad (6)$$

в которых  $A$  – коэффициент, характеризующий уменьшение вращающего момента с увеличением скорости;  $R$  – радиус колеса по кругу катания;  $J$  – приведенный к колесу момент инерции отдельного тягового привода.

В результате совместного решения (5) и (6) получим

$$M_{BP_{max}} = M_{сц}^C - \frac{c}{\sqrt{4\pi^2 + c^2}} \Delta M_{сц}^C,$$

где  $c = \frac{R(B-A)}{Jv}$  – обобщенный параметр тягового привода локомотива.

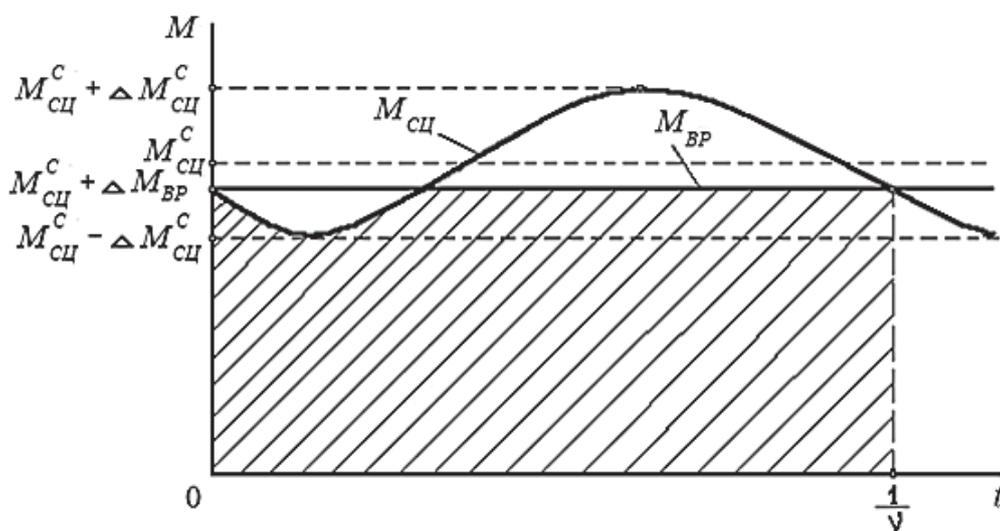


Рис. 4. Гармонический закон изменения момента сцепления

Однако величина  $M_{BP\max}$  не полностью расходуется на тягу. В период, когда вращающий момент превышает момент сцепления (рис. 4), на тягу приходится только часть вращающего момента, равная моменту сцепления. Величина максимального вращающего момента, приходящаяся на тягу, составляет не более

$$M_{BP\max} = M_{СЦ}^C - \varepsilon \cdot \Delta M_{СЦ}^C, \quad (7)$$

здесь  $\varepsilon = \frac{2+c \left( \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \arcsin \frac{c}{\sqrt{4\pi^2 + c^2}} \right)}{\sqrt{4\pi^2 + c^2}}$  – по-

правочный коэффициент. Его зависимость от обобщенного параметра тягового привода локомотива графически представлена на рис. 5.

В соответствии с (7) определим максимальную оценку динамического коэффициента использования сцепной массы локомотива

$$\eta_D = 1 - \varepsilon \frac{\Delta M_{СЦ}^C}{M_{СЦ}^C}. \quad (8)$$

Процесс галопирования во время движения не приводит к потере сцепной массы тепловоза с соединительным валом. Для тепловоза же без соединительного вала динамический коэффициент использования сцепной массы уменьшается в зависимости от относительной разгрузки тележки, так как

$$\frac{\Delta M_{СЦ}^C}{M_{СЦ}^C} = \frac{\Delta P_T}{2P_O}.$$

Поэтому можно записать, что

$$\Delta \eta_{СЦ}^{III} = 1 - \varepsilon_{\Gamma} \frac{\Delta P_T}{2P_O}.$$

Следовательно, преимущество тепловоза с соединительным валом между гидропередачами составляет

$$\Delta \eta_{СЦ}^{III} = \varepsilon_{\Gamma} \frac{\Delta P_T}{2P_O}.$$

Например, для локомотива с параметрами  $R = 0,475$  м,  $B = 26 \cdot 10^2$  Н·м/с,  $A = 70 \cdot 10^3$  Н·м/с,  $J = 88 \cdot 10^3$  Н·м,  $\nu = 1,5$  Гц,  $C_{\Gamma} = 0,68$ ,  $\varepsilon_{\Gamma} = 0,38$  при  $\frac{\Delta P_T}{2P_O} = 0,1$  [14] значение  $\Delta \eta_{СЦ}^{III}$  составляет 0,038.

С целью анализа влияния стохастической природы сцепления на использование сцепной массы локомотива с групповым тяговым приводом колесных пар величина  $\Delta M_{СЦ}^C / M_{СЦ}^C$ , входящая в (8), выражена через среднее значение коэффициента сцепления привода  $\Psi_{\text{ПР}}$  и его среднеквадратическое отклонение  $\sigma_{\Psi_{\text{ПР}}}$  с учетом правила трех сигм:

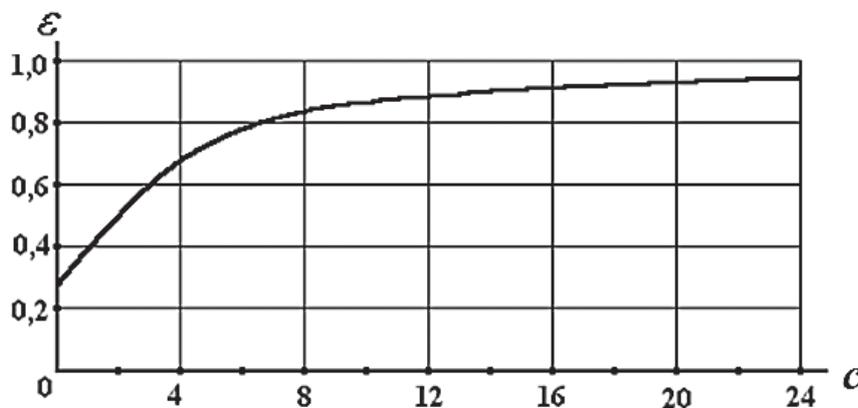


Рис. 5. Зависимость поправочного коэффициента  $\varepsilon$  от обобщенного параметра тягового привода локомотива  $c$

$$\eta_{\text{СЦ}}^{\text{IV}} = 1 - \varepsilon_C \frac{3\sigma_{\Psi_{\text{ПР}}}}{\Psi_{\text{ПР}}}. \quad (9)$$

Коэффициент сцепления привода определим, как среднее арифметическое значение коэффициентов сцепления механически связанных колесных пар:

$$\Psi_{\text{ПР}} = \frac{\sum_1^n \Psi_i}{n}, \quad (10)$$

здесь  $n$  – число механически связанных колесных пар (для индивидуального привода  $n = 1$ ).

Из (10) в соответствии с теорией вероятностей [15] при независимости  $\Psi_i$  следует, что

$$\Psi_{\text{ПР}} = \Psi_{\text{СР}}, \text{ а } \sigma_{\Psi_{\text{ПР}}} = \frac{\sigma_{\Psi}}{\sqrt{n}}, \quad (11)$$

где  $\Psi_{\text{СР}}$ ,  $\sigma_{\Psi}$  – среднее значение и среднеквадратическое отклонение коэффициента сцепления колесной пары.

После подстановки (11) в (9) имеем

$$\eta_{\text{СЦ}}^{\text{IV}} = 1 - \varepsilon_C \frac{3\sigma_{\Psi}}{\Psi_{\text{СР}} \sqrt{n}}. \quad (12)$$

Из выражения (12) вытекает, что тепловоз с промежуточным валом между гидропередачами имеет бóльший коэффициент использования сцепной массы, вследствие стохастической природы коэффициента сцепления, по сравнению с тепловозом без промежуточного вала:

$$\Delta\eta_{\text{СЦ}}^{\text{IV}} = 3\varepsilon_C \frac{\sqrt{2}-1}{2} \frac{\sigma_{\Psi}}{\Psi_{\text{СР}}}.$$

По данным [16]  $\sigma_{\Psi} = 0,02$ ,  $\Psi_{\text{СР}} = 0,33$ ,  $v_C = 0,3$  Гц. Поэтому величины  $c_C$  и  $\varepsilon_C$  составляют соответственно 3,4 и 0,60, а значение  $\Delta\eta_{\text{СЦ}}^{\text{IV}}$  равно 0,023.

Из приведенных выше расчетов следует, что наличие промежуточного вала на тепло-

возе обеспечивает значительно более полное использование сцепной массы локомотива:

$$\begin{aligned} \Delta\eta_{\text{СЦ}} &= \\ &= (\Delta\eta_{\text{СЦ}}^{\text{I}} + \Delta\eta_{\text{СЦ}}^{\text{II}} + \Delta\eta_{\text{СЦ}}^{\text{III}} + \Delta\eta_{\text{СЦ}}^{\text{IV}}) \cdot 100\% = \\ &= (0,023 + 0,05 + 0,038 + 0,023) \cdot 100 = 13,4\%. \end{aligned}$$

Таким образом, полученная величина – снижение коэффициента использования сцепной массы тепловоза без соединительного вала гидропередач, равная 13,4%, свидетельствует о необходимости кинематического сочленения групповых приводов тележек при работе тепловоза на режимах, близких к пределу сцепления.

#### Динамические нагрузки силовой трансмиссии тягового привода локомотива

Динамические факторы рассмотренного выше режима работы тепловоза на пределе сцепления при малой скорости движения являются низкочастотными (до 1,5 Гц). При этом тяговый привод ведет себя как абсолютно жесткое тело. Потому нагрузки, возникающие в соединительном валу гидропередач на данном режиме работы тепловоза, можно считать квазистатическими с точки зрения работы тягового привода.

Квазистатические нагрузки соединительного карданного вала гидропередач в режиме работы тепловоза на пределе по сцеплению колесных пар с рельсами при малых скоростях движения ( $M_{V_{\text{min}}}^{\text{CB}}$ ) вызывают улучшение использования сцепной массы локомотива. Поэтому определим указанные нагрузки с помощью данных, полученных при расчете коэффициента использования сцепной массы:

$$\begin{aligned} M_{V_{\text{min}}}^{\text{CB}} &= \\ &= \left( \Delta\eta_{\text{СЦ}}^{\text{I}} + \Delta\eta_{\text{СЦ}}^{\text{II}} + \frac{\Delta P_T}{2P_O} + \frac{3}{\sqrt{2}} \frac{\sigma_{\Psi}}{\Psi_{\text{СР}}} \right) \times \quad (13) \\ &\quad \times M_{\text{ТЕЛ.Р}}, \end{aligned}$$

где  $M_{\text{ТЕЛ.Р}}$  – расчетное значение вращающего момента раздаточного карданного вала.

Величина  $M_{\text{ТЕЛ.Р}}$ , входящая в формулу (13), получена по выражению

$$M_{\text{ТЕЛ.Р}} = \frac{2}{i_{\text{ОР}} \cdot \eta_{\text{ОР}}} R \psi_{\text{СР}} P_{\text{О}},$$

в котором  $i_{\text{ОР}}$ ,  $\eta_{\text{ОР}}$  – передаточное число и КПД осевого редуктора соответственно.

При  $i_{\text{ОР}} = 4,0$ ,  $\eta_{\text{ОР}} = 0,95$ ,  $\Delta\eta_{\text{СЦ}}^I = 0,023$ ,  $\Delta\eta_{\text{СЦ}}^{II} = 0,05$ ,  $\Delta P_T / 2P_{\text{О}} = 0,1$ ,  $\sigma_{\psi} = 0,02$  и  $\psi_{\text{СР}} = 0,33$  квазистатическая нагрузка соединительного вала гидропередач для рассматриваемого режима работы тепловоза составляет в абсолютном выражении  $5,5 \cdot 10^3$  Н·м, или 30,2% от  $M_{\text{ТЕЛ.Р}}$ .

Выполним расчет квазистатических нагрузок соединительного карданного вала гидропередач для режима работы тепловоза на конструкционной скорости и для момента трогания с места. При этом учтены проявляющиеся на высоких скоростях движения статические нагрузки от разности диаметров кругов катания колесных пар группового привода [3], а также уменьшение коэффициента сцепления и силы тяги при переходе от режима максимальной тяги к режиму номинальной скорости движения. Тогда

$$M_{V_{\text{max}}}^{CB} = \left[ K_{\text{СЦ}} \frac{\Delta D}{4R \cdot K_K} + K_T \times \left( \Delta\eta_{\text{СЦ}}^I + \frac{\Delta M_T}{M_T} + \frac{\Delta P_T}{2P_{\text{О}}} + \frac{3}{\sqrt{2}} \frac{\sigma_{\psi}}{\psi_{\text{СР}}} \right) \right] M_{\text{ТЕЛ.Р}},$$

где  $K_{\text{СЦ}}$ ,  $K_T$  – коэффициенты, учитывающие уменьшение коэффициента сцепления и силы тяги при увеличении скорости движения от 0 до 100 км/ч ( $K_{\text{СЦ}} = 0,53$ ,  $K_T = 0,125$ );  $\Delta D$  – величина допуска на разность диаметров кругов катания колесных пар группового привода;  $K_K$  – относительный коэффициент крипа по характеристике сцепления ( $K_K = 0,028$  [17]).

При  $\Delta D = 1 \cdot 10^3$  м,  $\Delta M_T / M_T = 7,0\%$  и  $\frac{\Delta P_T}{2P_{\text{О}}} = 0,3$  [14] квазистатическая нагрузка

соединительного вала гидропередач для режима работы на конструкционной скорости движения тепловоза составляет в абсолютном выражении  $3,0 \cdot 10^3$  Н·м, или 16,5% от  $M_{\text{ТЕЛ.Р}}$ . Наибольший квазистатический нагрузочный момент соединительного вала гидропередач тепловоза наблюдается на малых скоростях движения  $5,5 \cdot 10^3$  Н·м.

Однако полученная величина квазистатического момента соединительного вала гидропередач тепловоза имеет место при двух работающих дизелях. Если работает только один дизель, то искомая нагрузка указанного вала определяется следующей формулой:

$$M_{\text{О}}^{CB} = \frac{M_{\text{ТЕЛ.Р}}}{2} + \left( \Delta\eta_{\text{СЦ}}^I + \frac{\Delta P_T}{2P_{\text{О}}} + \frac{3}{\sqrt{2}} \frac{\sigma_{\psi}}{\psi_{\text{СР}}} \right) \frac{M_{\text{ТЕЛ.Р}}}{2}.$$

Таким образом, расчетное значение квазистатической нагрузки соединительного вала гидропередач тепловоза при работе одного дизеля при  $\Delta\eta_{\text{СЦ}}^I = 0,023$ ,  $\Delta P_T / 2P_{\text{О}} = 0,1$ ,  $\sigma_{\psi} = 0,02$  и  $\psi_{\text{СР}} = 0,33$  в абсолютном выражении равно  $11,4 \cdot 10^3$  Н·м, или 63,0% от  $M_{\text{ТЕЛ.Р}}$ , что в 2 раза больше, чем в случае одновременной работы двух силовых установок тепловоза.

## Заключение

В качестве выводов отметим, что:

1) получен коэффициент использования сцепной массы тепловоза с групповым приводом колесных пар. С увеличением числа колесных пар в групповом приводе растет его значение;

2) разработана математическая модель для определения наибольшего значения вращающего момента, при котором наступает разное боксование группового тягового привода колесных пар локомотива. Учтено влияние стохастической природы сцепления колес с рельсами, колебания кузова в момент трогания с места и во время движения на использование

цепной массы локомотива с групповым тяговым приводом;

3) уровень динамических нагрузок на элементы группового тягового привода зависит от конструктивных особенностей ходовых тележек, таких как положение реактивных тяг осевых редукторов колесных пар, а также условий эксплуатации – прохода по неровностям железнодорожного пути и скорости движения;

4) квазистатическая нагрузка на соединительный вал между гидропередачами увеличивается в 2 раза при неработающей одной из двух силовых установок тепловоза.

### Библиографический список

1. Фуфрянский Н. А. Развитие локомотивной тяги / Н. А. Фуфрянский, А. С. Нестрахов, А. Н. Долганов, Н. Н. Каменев, Э. А. Пахомов ; под ред. Н. А. Фуфрянского, А. Н. Бевзенко. – М. : Транспорт, 1982. – 303 с.

2. Логунов Д. Н. Тепловоз ТГ16 / Д. Н. Логунов, Г. В. Радовский, М. Ф. Химаренко, Ю. И. Доронин и др. – М. : Транспорт, 1976. – 192 с.

3. Обоснование допусков износа деталей колесно-редукторного блока тепловозов с гидропередачей : отчет о НИР. – Гос. регистрация № 01870055352. – Л. : ЛИИЖТ, 1988. – 75 с.

4. Добрынин Л. К. Уровень динамических нагрузок в трансмиссиях тепловозов с гидропередачами при боксовании / Л. К. Добрынин, В. А. Лысак, Ю. Н. Соколов // Тр. ВНИТИ (Коломна). – 1966. – Вып. 22. – С. 93–101.

5. Сабуров Ф. Ф. Исследование влияния расположения реактивной тяги редуктора колесной пары на динамические нагрузки в элементах группового карданного привода колесных пар тепловоза / Ф. Ф. Сабуров, П. Я. Балцкар // Тр. ЛИИЖТа. – 1974. – Вып. 370. – С. 62–74.

6. Балцкар П. Я. Динамические нагрузки в приводе колесных пар тепловоза при движении его по неровностям рельсового пути / П. Я. Балцкар // Тр. ЛИИЖТа. – 1975. – Вып. 386. – С. 88–97.

7. Балцкар П. Я. Взаимодействие группового тягового привода и элементов тележки тепловоза :

дис. ... канд. техн. наук : 05.22.07 / П. Я. Балцкар. – Л. : ЛИИЖТ, 1975. – 169 с.

8. Михальчук Л. А. Тепловозы ТГМ4 и ТГМ4А. Устройство и работа / Л. А. Михальчук, В. Н. Логунов, Е. Н. Чебанова и др. – М. : Транспорт, 1982. – 287 с.

9. Вербек Г. Современное представление о сцеплении и его использовании / Г. Вербек // Железные дороги мира. – 1974. – № 4. – С. 23–53.

10. Панов Н. И. Тепловозы. Конструкция, теория и расчет : учеб. пособие / Н. И. Панов. – М. : Машиностроение, 1976. – 544 с.

11. Сабуров Ф. Ф. Энергетика перспективно-го тягового привода / Ф. Ф. Сабуров, В. И. Бахолдин // Железнодорожный транспорт. – 1986. – № 5. – С. 36–38.

12. Добрынин Л. К. Динамические нагрузки в трансмиссии тепловоза ТГМ10 / Л. К. Добрынин, В. А. Лысак // Тр. ВНИТИ (Коломна). – 1964. – Вып. 20. – С. 142–169.

13. Результаты динамических испытаний трансмиссий тепловоза ТГМ 10. – Индекс И-27-63 : отчет о НИР. – Коломна : ВНИТИ, 1963. – 79 с.

14. Бородулин И. П. Тепловозы: Основы теории и конструирования : учеб. пособие / И. П. Бородулин, Э. А. Пахомов, Г. М. Рудаков ; под ред. В. Д. Кузьмича. – М. : Транспорт, 1982. – 317 с.

15. Вентцель Е. С. Теория вероятностей / Е. С. Вентцель. – М. : Наука, 1969. – 576 с.

16. Розенфельд В. Е. Теория электрической тяги : учебник для вузов ж.-д. транспорта. – 2-е изд. / В. Е. Розенфельд, И. П. Исаев, Н. Н. Сидоров. – М. : Транспорт, 1983. – 326 с.

17. Минов Д. К. Повышение тяговых свойств электровозов и тепловозов с электропередачей / Д. К. Минов. – М. : Транспорт, 1965. – 267 с.

### References

1. Fufryanskiy N. A., Nestrakhov A. S., Dolganov A. N., Kamenev N. N. & Pakhomov E. A. *Razvytiye lokomotyvnoy tyagy* [Locomotive traction development]. Moscow, Transport Publ., 1982, 303 p. (In Russian)

2. Logunov D. N., Radovskiy G. V., Khymentenko M. F., Doronyn Y. I. et al. *Teplovoz TG16* [Diesel

*locomotive TG16*]. Moscow, Transport Publ., 1976, 192 p. (In Russian)

3. *Obosnovaniye dopuskov iznosa detaley kolesno-reduktornogo bloka teplovozov s gidroperedachey* [Component wear tolerance justification of a wheel-gear block of a diesel locomotive with hydraulic transmission]. Otchet Research report. State registration no. 01870055352. Leningrad, LIIZhT Publ., 1988, 75 p. (In Russian)

4. Dobrynyn L. K., Lysak V. A. & Sokolov Y. N. Uroven dynamicheskikh nagruzok v transmisyakh teplovozov s gidroperedachamy pry buksovanii [Dynamic load level in drive shafts of diesel locomotives with hydraulic transmission during slippage]. *Proceedings of VNITI*, 1966, issue 22, pp. 93–101. (In Russian)

5. Saburov F. F. & Baltskar P. Y. Issledovaniye vliyaniya raspolozheniya reaktivnoy tyagy reduktora kolesnoy pary na dynamicheskiye nagruzky v elementakh gruppovogo kardannogo pryvoda kosenykh par teplovoza [The study of jet thrust location effect of a wheelset reduction gear on dynamic loads in group wheelset cardan drive of a diesel locomotive]. *Proceedings of LIIZhT*, 1974, issue 370, pp. 62–74. (In Russian)

6. Baltskar P. Y. Dynamicheskiye nagruzky v pryvode kolesnykh par teplovoza pry dvizhenii yego po nerovnostyam relsovogo puty [Dynamic loads in a wheelset driving gear of a diesel locomotive during its movement along the track with irregularities]. *Proceedings of LIIZhT*, 1975, issue 386, pp. 88–97. (In Russian)

7. Baltskar P. Y. *Vzaimodeistviye gruppovogo tyagovogo pryvoda i elementov teleshky teplovoza* [The interaction of a group traction drive and diesel locomotive truck components]. Diss. Cand. Sci: 05.22.07. Leningrad, LIIZhT Publ., 1975, 169 p. (In Russian)

8. Mykhalchuk L. A., Logunov V. N., Chebanova Y. N. et al. *Teplovozy TGM4 i TGM4A. Ustroystvo i rabota* [TGM4 and TGM4A diesel locomotives. Con-

struction and functioning]. Moscow, Transport Publ., 1982, 287 p. (In Russian)

9. Verbek G. Sovremennoye predstavleniye o stseplenii i yego ispolzovanii [Modern notion about coupling and its usage]. *World railroads*, 1974, no. 4, pp. 23–53. (In Russian)

10. Panov N. I. *Teplovozy. Konstruktsiya, teoriya i raschet* [Diesel locomotives. Construction, theory and calculation]. Moscow, Mashinostroyeniye [Mechanical engineering Publ.], 1976, 544 p. (In Russian)

11. Saburov F. F. & Bakhodyn V. I. Energetyka perspektivnogo tyagovogo pryvoda [Energy properties of promissory tractive drive]. *Railway transport*, 1986, no. 5, pp. 36–38. (In Russian)

12. Dobrynyn L. K. & Lysak V. A. Dynamicheskiye nagruzky v transmisi teplovoza TGM10 [Dynamic loads in transmission of TGM10 diesel engine]. *Proceedings of VNITI*, 1964, issue 20, pp. 142–169. (In Russian)

13. *Rezultaty dunamicheskikh ispytaniy transmisy teplovoza TGM10. – Indeks I-27–63: Otchet o NIR* [The results of TGM10 diesel locomotive transmission dynamic testing. – Code I-27–63: Research report]. Kolomna, VNITI Publ., 1963, 79 p. (In Russian)

14. Borodulyan I. P., Pakhomov E. A. & Rudakov G. M. *Teplovozy: Osnovy teorii i konstruirovaniya* [Diesel engines: Theory and construction]. Moscow, Transport Publ., 1982, 317 p. (In Russian)

15. Vdentsel Y. S. *Teoriya veroyatnostey* [Probability theory]. Moscow, Nauka Publ., 1969, 576 p. (In Russian)

16. Rozenfeld V. Y., Isayev I. P. & Sidorov N. N. *Teoriya elektricheskoy tyagy* [Theory of electric traction]. 2<sup>nd</sup> ed. Moscow, Transport Publ., 1983, 326 p. (In Russian)

17. Mynov D. K. *Povysheniye tyagovykh svoystv elektrovozov i teplovozov s elektroperedachey* [Tractive characteristics boost in electric and diesel locomotives with electric power transmission]. Moscow, Transport Publ., 1965, 267 p. (In Russian)

\* КРУЧЕК Виктор Александрович – доктор техн. наук, профессор; ГРИЦЕНКО Александр Васильевич – доктор техн. наук, профессор; ТИТОВА Тамара Семеновна – доктор техн. наук, профессор (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 656.259.12

**А. Д. Манаков, А. Г. Кабецкий, А. А. Трошин, Ю. М. Пашаев****АСИММЕТРИЯ РЕЛЬСОВЫХ ЦЕПЕЙ С РЕЛЕ ДСШ-2**

Дата поступления: 20.02.2017

Решение о публикации: 24.04.2017

**Аннотация**

**Цель:** Рассмотреть причины возникновения и способы снижения провалов напряжения на путевых реле резонансных рельсовых цепей с реле ДСШ-2. **Методы:** Анализ причин возникновения провалов напряжения на путевом реле свободной от подвижного состава рельсовой цепи проводился методом натурных экспериментов с осциллографированием и анализом напряжения на путевых реле, а также измерением сопротивления изоляции рельсовой линии и индуктивностей основных обмоток дроссель-трансформаторов. **Результаты:** Определено, что одной из причин возникновения провалов напряжения на путевом реле являются поперечная асимметрия сопротивления рельсовой линии, создаваемая металлической крошкой, генерируемой токоприемником электропоезда при прохождении не перекрываемого промежутка на подходе к станции. Выявлено влияние на провалы напряжения продольной асимметрии сопротивления рельсовой линии, которая образуется разбросом параметров индуктивностей секций основной обмотки дроссель-трансформатора. Исследовано влияние на величину провалов напряжения режимов ведения электропоезда и места отключения тяги электропоезда. **Практическая значимость:** Предложено правило подключения к рельсам секций основных обмоток дроссель-трансформаторов для снижения влияния разброса параметров суммарной индуктивности секций дроссель-трансформаторов на продольную асимметрию сопротивления рельсовой линии. Проведенные исследования позволили определить причины возникновения и способы снижения провалов напряжения на путевых реле резонансных рельсовых цепей с реле ДСШ-2.

**Ключевые слова:** Асимметрия тягового тока, поперечная асимметрия сопротивления рельсовой линии, продольная асимметрия сопротивления рельсовой линии, резонансная рельсовая цепь, провалы напряжения.

\***Alexander D. Manakov**, D. Sci., CRTC senior researcher, manakoff\_2@mail.ru; **Andrey G. Kabetskiy**, engineer, kabeckiy@gmail.com; **Alexander A. Troshin**, engineer, tralexalex@yandex.ru; **Yuriy M. Pashaev**, postgraduate student, prime-16@yandex.ru (Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University)  
ASYMMETRY OF RAIL CIRCUITS WITH DSH-2 RELAY

**Summary**

**Objective:** To consider the causes and ways to reduce voltage sags on resonant track relays of track circuits with dssh-2 relays. **Methods:** Analysis of voltage depressions causes on a track relay with track circuit, free of rolling stock on rails, was carried out by means of natural experiments with oscillography and voltage on a track relay analysis, as well as measurement of insulation resistance of rail lines and the inductances of the main windings of transformers. **Results:** It was determined that one of the causes of voltage depressions on road relays were the transverse asymmetry of the resistance of rail lines caused by metal chips generated by pantograph trains when passing a nonoverlayable interval on the approach to the station. The impact of longitudinal spin asymmetry of rail line resistance on voltage sags, which is formed by a variation in inductance of the primary winding sections of an impedance bond. The relationship of voltage sags and the methods of rolling stock handling as well as places of electric power

cut-offs' was studied. **Practical importance:** The rule of connecting the main windings of transformers to the rails of sections was proposed, in order to reduce the impact of the variation in total inductance of transformers' sections on the longitudinal asymmetry of rail line resistance. The conducted research made it possible to determine the causes and ways to reduce voltage dips on the resonant track relays of track circuits with dssh-2 relays.

**Keywords:** Asymmetry of traction current, lateral asymmetry of rail line resistance, longitudinal asymmetry of rail line resistance, resonant rail chain, voltage sags.

Рельсовые цепи служат средством регулирования и обеспечения безопасности движения поездов. Основным их видом при электрической тяге поездов как на магистральных линиях железных дорог России, так и на линиях метро являются двухниточные рельсовые цепи. В таких рельсовых цепях обратный тяговый ток возвращается на тяговую подстанцию по двум рельсам. Для прохождения обратного тягового тока через изолирующие стыки используются дроссели или дроссель-трансформаторы (ДТ).

Схема участка Петербургского метрополитена показана на рис. 1, где СТП – совмещенная тяговопонижающая подстанция, В – выпрямитель, ТД – тяговый двигатель электропоезда, ДТ1–ДТ6 – ДТ типа ДТМ-0,17-1000 (ДТМ-0,17-1000М), ИС – изолирующий стык, РЦ – рельсовая цепь, ПКРЦ – комплект аппаратуры питающего конца рельсовой цепи,

РКРЦ – комплект аппаратуры релейного конца рельсовой цепи,  $\omega$  – угловая частота вращения оси ТД,  $i_{\Pi}$  – прямой тяговый ток,  $i_o$  – обратный тяговый ток, ОТТ – отсос тягового тока, КП – колесная пара последнего вагона электропоезда, НД – направление движения электропоезда.

Осциллограммы напряжений на путевых реле рельсовых цепей 205РЦ (205ПР) и 207РЦ (207ПР) представлены на рис. 2. Состояние путевых реле 205ПР и 207ПР соответствует положению подвижного состава, показанному на рис. 1. При этом электропоезд освободил 205РЦ, что показано на осциллограмме (см. рис. 2, луч 1) высоким напряжением на путевом реле 205ПР, а рельсовая цепь 207РЦ в течение 6,5 с, после освобождения 205РЦ, остается занятой подвижным составом, что отвечает низкому напряжению на путевом реле 207ПР (см. рис. 2, луч 2). Затем 207РЦ

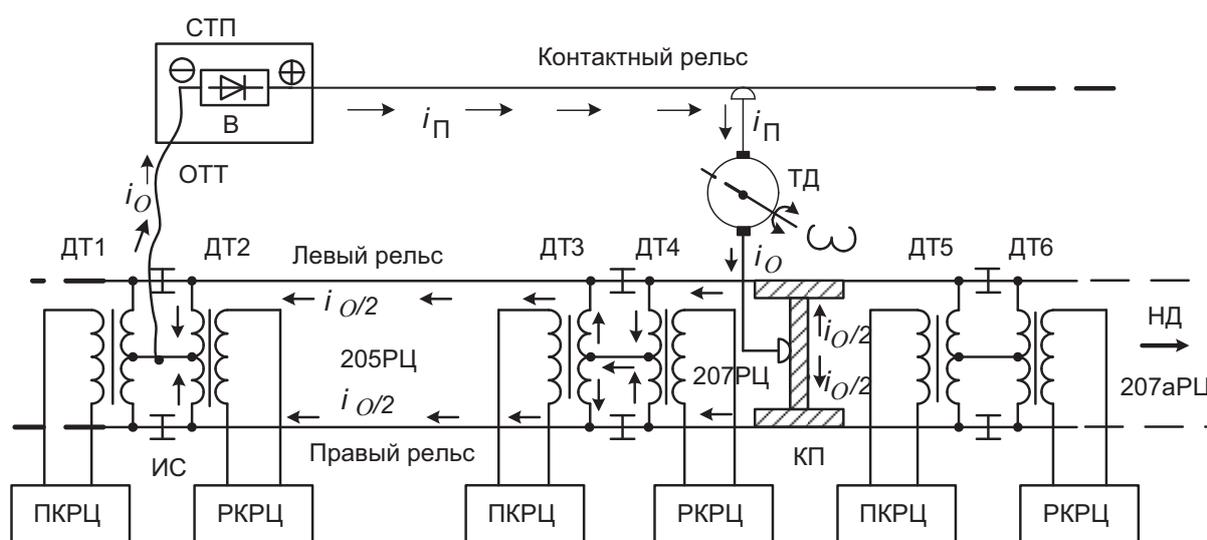


Рис. 1. Схема участка Петербургского метрополитена

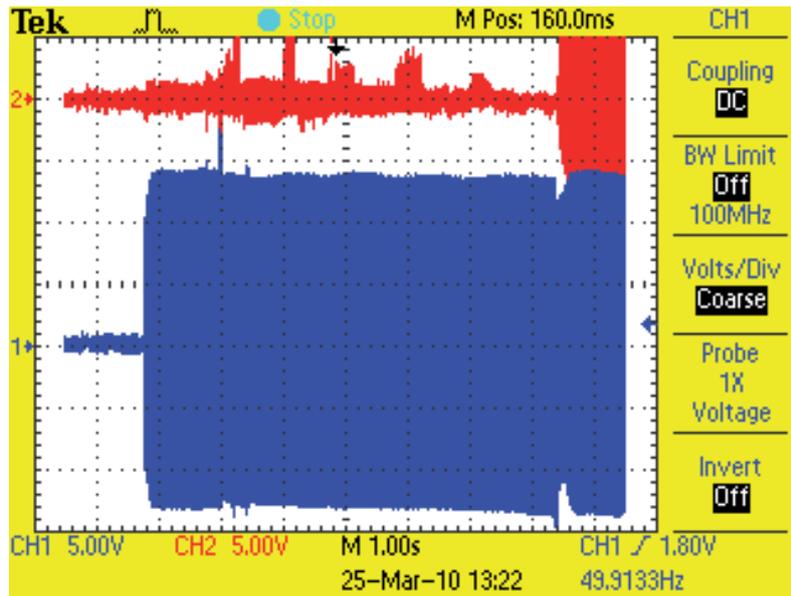


Рис. 2. Напряжение на путевых элементах путевых реле:  
луч 1 – 205ПР, (Д1:10); луч 2 – 207ПР, (Д1:10)

освобождается, что соответствует на осциллограмме повышению напряжения на путевом реле 207ПР.

Из осциллограмм на рис. 2 следует, что после освобождения 205РЦ и при движении поезда по 207РЦ на путевом реле 205ПР возникает провал напряжения, который приводит к размыканию контактов путевого реле 205ПР, что говорит о ложной занятости рельсовой цепи 205РЦ. Это ведет к нарушению работы систем автоматической локомотивной сигнализации и автоматического регулирования скорости (АЛС-АРС) движения поездов и, как следствие, к задержкам поездов.

### Исследование работы рельсовых цепей с реле ДСШ-2

Резонансные рельсовые цепи с реле ДСШ-2 получили широкое распространение в государственном унитарном предприятии «Петербургский метрополитен».

Схема резонансной рельсовой цепи с реле ДСШ-2 и централизованным размещением аппаратуры на посту электрической централизации представлена на рис. 3, где 205СТП –

трансформатор питания рельсовой цепи типа ПОБС-5А;  $L_{205ТФ}$  – индуктивность типа РОБС-3А, исключает замыкание сигнальных токов АЛС-АРС через питающий трансформатор 205СТП;  $C_{205ТФ}$  – емкость 30 мкФ, настраивает питающий конец рельсовой цепи в резонанс на частоте 50 Гц и ограничивает ток трансформатора 205СТП при шунтировании рельсовой цепи поездом; 205ПТ – согласующий трансформатор типа ПОБС-2А, включенный по автотрансформаторной схеме с коэффициентом трансформации  $n_{205ПТ} = 1,7$ ;  $R_{КП1}$ ,  $R_{КП2}$ ,  $R_{КР1}$ ,  $R_{КР2}$  – сопротивления жил кабеля на питающем и релейном концах рельсовой цепи; ДТМ-0,17-1000М и ДТМ-0,17-1000 – ДТ с коэффициентом трансформации  $n_{ДТ} = 40$  для пропуска тягового тока в обход изолирующих стыков;  $A_1-A_2$  – выводы основной обмотки ДТ;  $B_1-B_2$  – выводы дополнительной обмотки ДТ; К – средний вывод основной обмотки ДТ;  $A_1-K$  – левая (выводы направлены на наблюдателя) секция основной обмотки ДТ;  $A_2-K$  – правая секция основной обмотки ДТ; 205КР – емкость, равная 16 мкФ для коротких рельсовых цепей и 12 мкФ при длине рельсовой цепи выше 200 м, регулирует фазовые соотношения между током путевого эле-

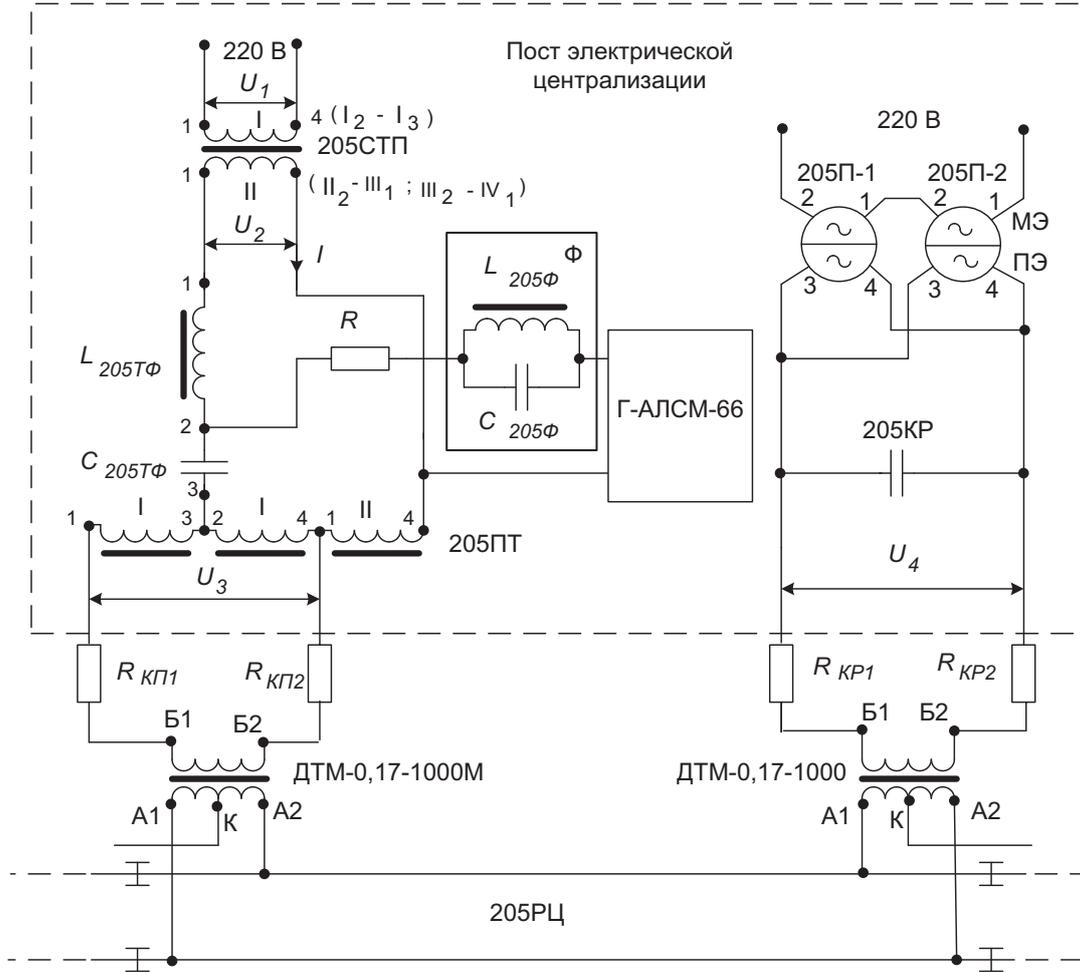


Рис. 3. Схема резонансной рельсовой цепи

мента и напряжением на местном элементе реле ДСШ-2, номинальный угол сдвига фаз –  $20 \pm 5^\circ$  [1]; 205 П-1 и 205 П-2 – путевые реле ДСШ-2; ПЭ – путевой элемент реле; МЭ – местный элемент реле; Г-АЛСМ-66 – генератор сигналов АЛС-АРС;  $L_{205\Phi}$  – индуктивность в виде реактора РОБС-3А;  $C_{205\Phi}$  – емкость 70 мкФ;  $\Phi$  – фильтр, настроенный на частоту 50 Гц, исключает утечки тока 50 Гц через выход генератора Г-АЛСМ-66;  $R$  – резистор сопротивлением 40 Ом, ограничивает ток генератора при шунтировании рельсовой цепи на питающем конце [2].

Условием резонанса напряжений на питающем конце рельсовой цепи является равенство [2]

$$U_{C_{205\Phi}} = U_{L_{205\Phi}} + U_{205\text{ ПТ}(I_2-I_4)} +$$

$$+ U_{205\text{ ПТ}(II_1-II_4)},$$

в котором  $U_{C_{205\Phi}}$  – напряжение на емкости  $C_{205\Phi}$ ;  $U_{L_{205\Phi}}$  – напряжение на индуктивности  $L_{205\Phi}$ ;  $U_{205\text{ ПТ}(I_2-I_4)}$  и  $U_{205\text{ ПТ}(II_1-II_4)}$  – напряжения на обмотках  $(I_2 - I_4)$  и  $(II_1 - II_4)$  трансформатора 205ПТ.

Были проведены измерения электрических характеристик рельсовой цепи 205РЦ. Результаты измерений представлены в табл. 1. Реле ДСШ-2 имеет следующие характеристики [2]: напряжение нормальной работы на путевом элементе – 60 В, напряжение отпускания сектора – 20 В, идеальное соотношение фаз, при котором ток путевого элемента опережает по фазе напряжение на местном элементе, равно углу  $20^\circ$ .

ТАБЛИЦА 1. Электрические характеристики рельсовой цепи 205РЦ

Режим работы 205РЦ	Напряжения, В				Ток, А	Фазовый угол между напряжением на местном элементе и током в путевом элементе, град
	$U_1$	$U_2$	$U_3$	$U_4$	$I$	
Нормальный	223	44	158	96	1,63	26
Шунтовой	222	43	70	33	1,0	37

Из табл. 1 следует, что напряжение на путевом элементе путевого реле выше нормы на 60%. Увеличение напряжения на путевом элементе путевого реле исключает влияние провалов напряжения на работу резонансной рельсовой цепи, но при этом нарушаются условия выполнения шунтового и контрольного режимов работы рельсовой цепи, что приводит к снижению безопасности движения поездов. Для повышения безопасности движения поездов требуется определить и исключить причины возникновения провалов напряжения на путевых реле рельсовых цепей с реле ДСШ-2 в Петербургском метрополитене.

### Обследование поперечной асимметрии сопротивлений рельсовых линий

Известно, что влияние тягового тока на устройства рельсовых цепей (РЦ) и автоматической локомотивной сигнализации (АЛС) связано с неравномерным распределением тягового тока между рельсовыми нитями рельсовой линии. Его причинами являются продольная и поперечная асимметрии сопротивлений рельсовых нитей. Поперечная асимметрия, или асимметрия по утечкам, – это следствие присоединения к одной из тяговых нитей заземлений контактных опор и других металлических сооружений. Продольная асимметрия, или асимметрия по сопротивлению, возникает из-за нарушения целостности рельса, одного или нескольких стыковых соединителей на одной из рельсовых нитей рельсовой линии [3].

Исследованию влияния асимметрии тягового тока в рельсовой линии на работу РЦ и АЛС посвящены работы [4–14].

Электромагнитная совместимость электроподвижного состава с устройствами РЦ и АЛС обеспечивается тем, что электродвижущие силы помех, создаваемых тяговыми токами на входах аппаратуры этих устройств, направлены встречно [4, 5].

В работе [6] представлены коэффициенты асимметрии переменного тягового тока для однородной рельсовой линии при наличии только поперечной, поперечной и продольной или только продольной асимметрии.

Методика расчета асимметрии тягового тока в рельсовых линиях двухпутных перегонов разработана в статье [7]. Показано, что на асимметрию тягового тока влияют не только повреждения и старения стыковых соединителей и дроссельных перемычек, сопротивление шпал и рельсов по отношению к земле, входные сопротивления цепей заземления опор контактной сети, но и токи в рельсовых нитях своего и соседнего путей, контактные провода соседних путей, высоковольтные провода линии электроснабжения, расположенные на опорах контактной сети. В математической модели рельсовой линии, разработанной в [7], комплексные сопротивления секций основных обмоток ДТ для тягового тока представлены равными величинами.

Влияние на продольную асимметрию сопротивления рельсовой линии: удельных параметров элементов рельсовой линии (сплошные рельсы; активное и индуктивное сопротивление стыковых соединителей, не скрепленных с рельсами; индуктивные сопротивления основных обмоток ДТ), явления электрохимической

коррозии и условий эксплуатации токопроводящих стыков изучены в работе [8].

Вопросы влияния продольной и поперечной асимметрии тягового тока на работу кодовой рельсовой цепи переменного тока частотой 25 Гц рассмотрены в [9]. Исследования проведены на математической модели, разработанной в среде электронного моделирования Multisim 11.0.

В работе [10] на математической модели системы тягового электроснабжения двухпутного участка железной дороги проведены исследования магнитного влияния соседнего пути на работу рельсовых цепей переменного тока частотой 50 Гц с учетом продольной и поперечной асимметрии рельсовой линии.

Для участков с электрической тягой поездов на переменном токе разработана методика математического моделирования процессов генерации помех в обратной тяговой рельсовой сети, с учетом варьирования сопротивлений «рельс–земля» и величин продольной и поперечной асимметрии сопротивлений рельсовой линии [11].

Исследования фазочувствительной рельсовой цепи 25 Гц с реле ДСШ-16 для участков с электротягой на переменном токе в работе [12] показали, что при асимметрии тягового тока, равной 15 А, помехи тягового тока приводят к уменьшению вращающего момента сектора реле ДСШ-16 на 15%. В работе предлагается на участках с повышенным обратным тяговым переменным током исключить применение рельсовых цепей с реле ДСШ-16.

В работах [13, 14] приведены результаты исследований влияния тяжеловесных поездов на работу устройств РЦ и автоматической локомотивной сигнализации непрерывного действия (АЛСН). Показано, что при пропуске тяжеловесных поездов возрастают тяговые токи по секциям основных обмоток ДТ и разность тяговых токов в этих секциях. В результате нелинейности характеристик ДТ увеличиваются помехи от тягового тока в путевых приемниках РЦ и приемниках АЛСН.

В приведенных публикациях рассматривается асимметрия тяговых сетей при элек-

трической тяге поездов на переменном токе и не изучаются процессы влияния асимметрии постоянного тягового тока на работу резонансных РЦ, применяемых в метрополитенах. В описанных математических моделях не учитывается влияние разброса параметров индуктивностей секций основных обмоток ДТ на продольную асимметрию рельсовых линий. В настоящей статье рассматриваются процессы влияния асимметрии постоянного тягового тока на работу резонансных РЦ с реле ДСШ-2, применяемых в Петербургском метрополитене. Были проведены обследования поперечной асимметрии сопротивлений рельсовых линий. Они проводились в зоне расположения рельсовых цепей 205РЦ и 207РЦ (см. рис. 1) и состояли в визуальном осмотре, регистрации напряжений на аппаратуре РЦ и проведении измерений [15].

Были определены сопротивления изолированных рельсов 205РЦ и 207РЦ относительно контура заземления метро при помощи омметра MRU-101 № 121724/03 (фирма Sonel) – измерителя сопротивления заземляющих устройств.

Правый (по ходу движения электропоезда) рельс 205РЦ (см. рис. 1) имеет значительную неравномерность сопротивления изоляции на релейном (18,6 кОм) и на питающем (12,6 кОм) концах, равную 32%; левый рельс 205РЦ – соответственно 4,11 и 3,76 кОм. Разница значений сопротивлений изоляции на релейном и питающем концах левого рельса составляет 8,5%. На релейном конце 205РЦ сопротивление изоляции левого рельса 205РЦ в 4,5 раза меньше сопротивления изоляции правого рельса.

Сопротивление изоляции правого по ходу движения рельса 207РЦ имеет изоляции на релейном конце – 6,12 кОм, а на питающем – 6,09 кОм; левого рельса – на релейном конце 0,465 кОм, а на питающем – 0,463 кОм. На релейном конце 207РЦ сопротивление изоляции левого рельса в 13 раз меньше, чем правого рельса 207РЦ.

На рис. 4 показана схема заземления металлических оснований ДТ рельсовых цепей

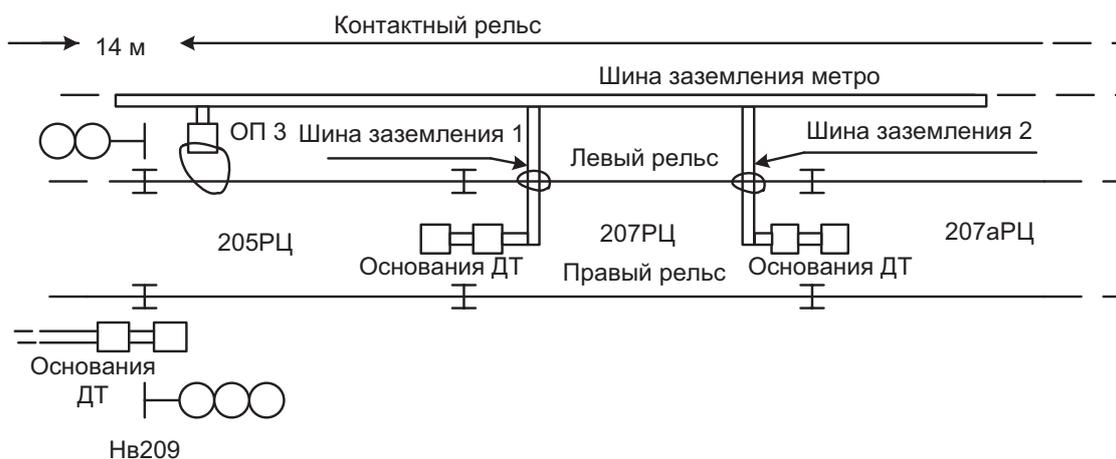


Рис. 4. Схема заземления оснований ДТ

205РЦ, 207РЦ и 207аРЦ. Шины заземления 1 и 2 оснований ДТ проходят под левым рельсом на расстоянии 10 см от рельсовых подкладок и лежат непосредственно на бетоне.

У входного светофора Нв209 (см. рис. 4) расположен неперекрываемый воздушный промежуток контактного рельса протяженностью 14 м. Обследования показали, что при проходе электропоездом таких промежутков в режиме тяги, в момент схода токоприемника электропоезда с контактного рельса возникает дуга и на поверхности контактного рельса образуются неровности, которые приводят к механическому износу токоприемника на вагонах электропоезда с образованием металлической крошки. При движении электропоезда металлическая крошка разносится потоком воздуха и снижает сопротивление изоляционных промежутков между подошвой рельсов и шинами заземления оснований ДТ. Предположительные зоны понижения сопротивления изоляции, приводящие к асимметрии тягового тока, обведены овалами на рис. 4. Это утверждение согласуется с измерениями сопротивлений изоляции рельсов 205РЦ и 207РЦ, в которых сопротивления левых рельсов в 4,5 и 13 раз меньше, чем правых, соответственно.

Из рис. 4 следует, что через сниженное сопротивление изоляции шины заземления 1 и шины заземления 2 ДТ параллельно левому

рельсу 207РЦ включена шина заземления метро. Данный вывод подтверждает осциллограмма на рис. 2 (луч 2), на которой показаны всплески напряжения до 50 В на путевом реле 207ПР рельсовой цепи 207РЦ, свидетельствующие об асимметрии тягового тока при проследовании последнего вагона электропоезда по цепи.

В районе входного светофора Нв209 со стороны левого рельса 205РЦ расположен электромеханический автостоп (ОП3), который также заземлен на шину заземления метро. Можно предположить, что часть тягового тока, сошедшего с левого рельса 207РЦ на шину заземления метрополитена, возвращаясь к тяговому отсосу, находящемуся у входного светофора Нв209 (см. рис. 4), через изоляционный промежуток, покрытый металлической крошкой, в районе автостопа ОП3 и приводит к асимметрии тягового тока в рельсовой цепи 205РЦ.

### Влияние ДТ на продольную асимметрию сопротивлений рельсовых линий

Предположим, что продольная асимметрия, или асимметрия по сопротивлению, при условии целостности рельсов, исправности стыковых соединителей и равенстве по длине

дроссельных перемычек может возникать при различии параметров индуктивностей секций основной обмотки ДТ. При этом она будет оказывать мешающее влияние на устройства РЦ, так как из-за различия величин сопротивлений секций ДТ на них будут создаваться разные падения напряжения. Разница напряжений будет трансформироваться в дополнительную обмотку ДТ с учетом коэффициента трансформации и оказывать влияние на резонанс напряжений на питающем конце рельсовой цепи.

С помощью измерительного прибора Е7-15, а также с использованием метода амперметра-вольтметра на частоте 50 Гц были определены индуктивности секций основной обмотки ДТМ-0,17-1000М. Результаты измерений сведены в табл. 2. Например, на частоте сигнала измерения 50 Гц (строки 1, 2 и 3) разбросы

параметров индуктивностей секций основной обмотки соответственно составляют 13,3, 14,3 и 13,4% по отношению к наибольшему значению индуктивности секции основной обмотки. В среднем индуктивность левой секции основной обмотки ДТ больше, чем правой секции, на 13,6%.

Сравнение средних величин индуктивностей секций основной обмотки ДТ, измеренных на частотах сигнального тока 50 и 100 Гц, показывает, что с увеличением частоты сигнального тока в 2 раза индуктивность секций ДТ уменьшилась на 30%, и зависимость индуктивности от частоты нелинейная.

Из приведенных в табл. 2 данных следует, что для всех ДТ индуктивность левой секции основной обмотки больше, чем правой, и это является конструктивной особенностью ДТ. Такую особенность ДТ можно объяснить

ТАБЛИЦА 2. Значения индуктивностей секций ДТМ-0,17-1000 М

Строка	Заводской номер ДТМ-0.17-1000М	Индуктивность, измеренная прибором Е7-15, мкГн				Индуктивность, измеренная методом амперметра-вольтметра, мкГн	
		Частота сигнала измерения, Гц					
		100		1000		50	
		Левая секция	Правая секция	Левая секция	Правая секция	Левая секция	Правая секция
1	8231	107	94	95,8	87,4	150	130
2	8242	104	93	93,7	85,1	154	132
3	8279	106	92	93,8	84,7	149	129
4	8277	107	94	95,5	86,3	154	132
5	8283	103	90	91,8	82,4	142	121
6	8282	103	91	91,6	83,1	154	133
7	8276	103	91	92,3	82,9	151	132
8	8244	106	93	93,9	85,1	152	133
9	8230	105	93	94,1	85,6	151	126
10	8241	107	95	95,8	87,1	152	132
11	8271	103	91	91,9	83,1	154	134
12	8234	106	92	93,5	84,6	146	128
Средние величины		105	92,4	93,6	84,8	150,7	130,2

различной длиной выводов секций ДТ. Вертикальное расположение основной обмотки ДТ приводит к тому, что вывод левой секции поднимается от основания корпуса ДТ, а вывод правой секции связан непосредственно с обмоткой. Разная длина выводов левой и правой секций создает асимметрию по параметру индуктивности в основной обмотке ДТ.

Для исключения влияния разброса параметров индуктивностей секций основной обмотки ДТ на работу рельсовой цепи на питающем и релейном концах одной рельсовой цепи к каждому рельсу необходимо подключать разные секции основных обмоток, тем самым компенсируя разброс параметров ДТ. Например, если на месте ДТ3 (см. рис. 1) включен ДТ № 8231 (см. табл. 2), а на месте ДТ2 включен ДТ № 8242 (см. табл. 2), то суммарная индуктивность секций ДТ в правом рельсе рельсовой цепи 205РЦ на частоте 50 Гц равна 282 мкГн, а в левом рельсе – 284 мкГн. При этом разброс параметров индуктивностей секций основной обмотки ДТ в рельсовой цепи 205РЦ на частоте 50 Гц равен 2 мкГн, на частоте 100 Гц – 2 мкГн, а на частоте 1000 Гц – 0,2 мкГн.

Компенсация разброса параметров индуктивностей секций основной обмотки ДТ выполняется автоматически, если ДТ одной рельсовой цепи устанавливаются в междупутье рельсовой линии.

Согласно существующим правилам проектирования, при условии установки первого ДТ рельсовой цепи в междупутье, а второго ДТ этой же рельсовой цепи – у стены тоннеля, ближний, по отношению к рельсам, вывод основной обмотки ДТ подключается к ближнему рельсу, а дальний – к дальнему. Например, если на месте ДТ3, который размещен в междупутье (см. рис. 1), включен ДТ № 8231 (см. табл. 1), а на месте ДТ2, который находится у стены тоннеля, – ДТ № 8242 (см. табл. 1), то суммарная индуктивность секций ДТ в правом рельсе рельсовой цепи 205РЦ на частоте 50 Гц равна 304 мкГн, а в левом – 262 мкГн. При этом разброс параметров индуктивностей секций основной обмотки ДТ в

205РЦ на частоте 50 Гц составляет 42 мкГн, на частоте 100 Гц – 24 мкГн, а на частоте 1000 Гц – 17 мкГн.

Неравномерное распределение параметров индуктивностей секций основных обмоток ДТ по левому и правому рельсам одной рельсовой цепи приводит к мешающему влиянию тягового тока на работу резонансных рельсовых цепей. При проектировании рельсовых цепей требуется выполнять правило, при котором к одному рельсу рельсовой цепи должны подключаться различные секции двух ДТ с целью компенсации разброса параметров суммарной индуктивности секций ДТ в правом и левом рельсах рельсовой цепи.

### **Влияние переноса места отключения тяги электропоездов на работу резонансной рельсовой цепи**

Обследования рельсовых цепей показали, что влияние тягового тока на работу резонансных рельсовых цепей происходит в момент коммутации тягового тока. Были проведены исследования по влиянию переноса места отключения тяги и режима ведения электропоезда на работу резонансной рельсовой цепи.

Степень влияния переноса места отключения тяги электропоезда на работу резонансной рельсовой цепи определялся методом натурального эксперимента, который состоял в регистрации напряжений на элементах рельсовых цепей при изменении места отключения тяги электропоездов на 10, 20 и 30 м по ходу движения от знака «отключить тяговые двигатели». Запись напряжений производилась регистратором параметров рельсовых цепей Участка надежности и контроля (УН и К) Службы сигнализации, централизации и блокировки (Ш) Петербургского метрополитена.

Схема эксперимента приведена на рис. 5, где места расположения электропоездов в разные моменты времени отмечаются как номер позиции. В позиции 1 электропоезд стоит на платформе перед выходным светофором Нв211М.



В позиции 2 тяга электропоездов по существующей инструкции ведения электропоездов отключается у знака «отключить тяговые двигатели». Это происходит на расстоянии 15 м за выходным светофором Нв211М. В данной позиции поезд находится на расстоянии 53 м от точки подключения выравнивающей перемычки обратного тягового тока.

На рис. 6 показаны осциллограммы напряжений, где 205 СТП1 – напряжение на первичной обмотке трансформатора питания рельсовой цепи 205РЦ; 205СТП2 – напряжение на вторичной обмотке трансформатора питания рельсовой цепи 205РЦ; П205, П207, П207а, П207с – напряжения на путевых элементах путевого реле ДСШ-2 рельсовых цепей 205РЦ, 207РЦ, 207аРЦ, 207сРЦ соответственно; 205ПТвы – напряжение на выходе путевого трансформатора питания рельсовой цепи 205РЦ (напряжение на дополнительной обмотке питающего ДТ). Осциллограммы на

рис. 6, расположенные сверху вниз, соответствуют обозначениям, показанным с правой стороны.

Момент времени снижения напряжения на путевом реле рельсовой цепи 205РЦ (П205) (см. рис. 6, время 16 мин 44 с) совпадает с таковым на трансформаторе питания рельсовой цепи 205РЦ (205ПТвы). Из осциллограммы напряжения 205ПТвы видно, что после резкого падения напряжения на питающем конце рельсовой цепи 205РЦ происходит медленное его восстановление, что соответствует срыву колебаний в резонансном контуре с последующим восстановлением колебаний.

Понижение напряжения на питающем конце 205РЦ можно объяснить влиянием разностного тока в секциях основной обмотки ДТ на питающем конце. Наводимая разностным током электродвижущая сила (ЭДС) в дополнительной обмотке ДТ вычитается из напряжения сигнального тока и расстраивает резонанс



Рис. 6. Осциллограммы напряжений: отключение тяги происходит у знака «отключить тяговые двигатели» на ПК123+90

напряжений на питающем конце рельсовой цепи 205РЦ. Уменьшение напряжения на путевом реле рельсовой цепи 205РЦ (П205) является следствием снижения напряжения на питающем конце рельсовой цепи (205ПТвы) (см. рис. 6).

В позиции 3 (см. рис. 5) отключение тяги электропоезда осуществлялось на 10 м дальше по ходу движения от знака «отключить тяговые двигатели». Провалы напряжения на питающем конце рельсовой цепи 205РЦ и их глубина сохранились.

В позиции 4 тяга электропоезда отключалась на 20 м дальше по ходу движения от знака «отключить тяговые двигатели». Провалы напряжения на путевом реле рельсовой цепи 205РЦ существенно снизились (рис. 7, а) по сравнению с отключениями тяги электропоезда в позициях 2 и 3.

В позиции 5 отключение тяги электропоезда осуществлялось на 30 м дальше по ходу движения от знака «отключить тяговые двигатели» (см. рис. 5). Результаты эксперимента приведены на рис. 7, б. Из осциллограмм вытекает, что провалы напряжения не существенно отличаются от отключения тяговых двигателей на расстоянии 20 м от знака «отключить тяговые двигатели» (см. рис. 7, а). Это можно объяснить тем, что головной вагон электропоезда приблизился к точке подключения выравнивающей перемычки обратного тягового тока на расстояние 23 м (см. рис. 5). Здесь происходит перераспределение обратного тягового тока между отсосом у входного светофора Нв209 и выравнивающей перемычкой на рельсовой цепи 209РЦ.

Другой причиной понижения влияния обратного тягового тока на работу рельсовой цепи 205РЦ следует признать то, что на дополнительном расстоянии в 30 м электропоезд развивает установленную скорость, при этом снижается тяговый ток, потребляемый электропоездом, тяга отключается на более низком токе и соответственно с меньшим влиянием на работу рельсовой цепи 205РЦ.

Эксперименты по переносу места отключения тяги поездов показали, что провалы

напряжения на путевом реле рельсовой цепи 205РЦ уменьшаются. Однако условие переноса места отключения тяги не всегда выполнимо, например при наличии крутых уклонов тоннеля метро.

### **Влияние режима ведения электропоезда на работу резонансной рельсовой цепи**

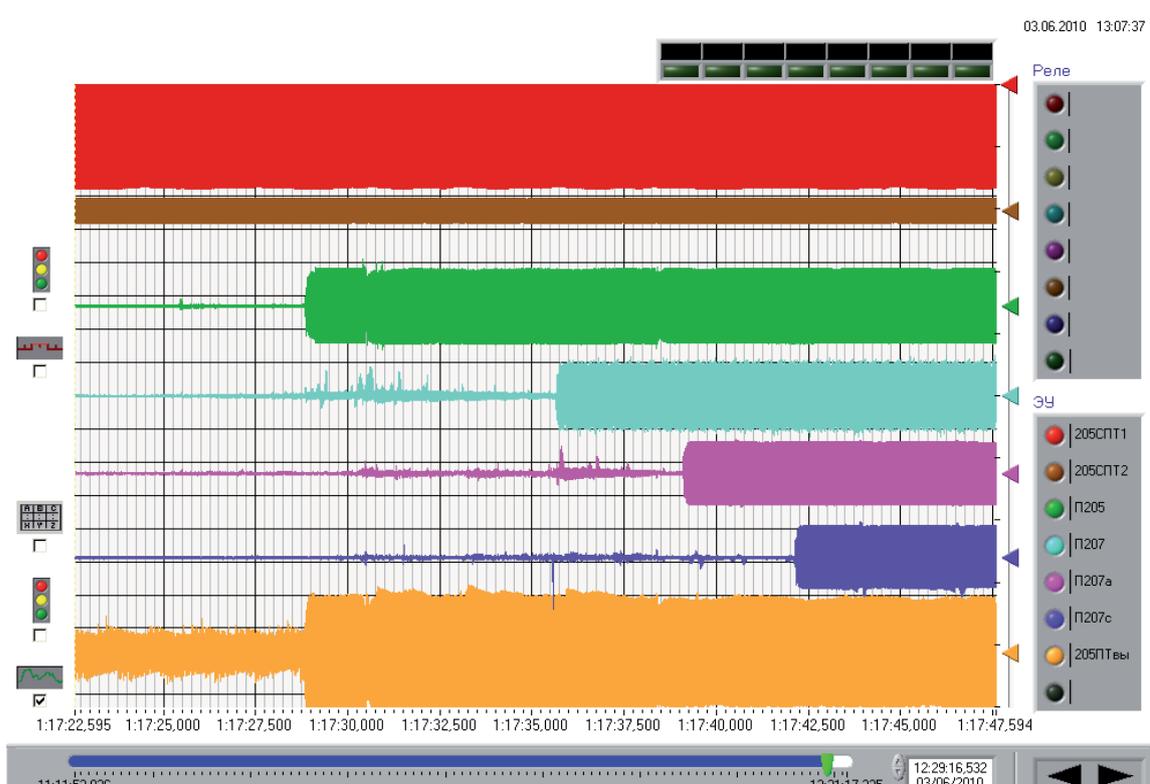
Как видно на схеме (см. рис. 5), в позиции 1 электропоезд стоит на платформе перед выходным светофором Нв211М. Эксперимент состоял в регистрации напряжений на элементах рельсовых цепей при отправлении электропоездов со станции в разных режимах ведения электропоезда: «Ход 1», «Ход 2» и «Ход 3». Наибольшее потребление мощности электропоездом осуществляется в режиме «Ход 3», при этом происходит разгон электропоезда за минимальное время.

При режиме «Ход 1» отключение тяги производилось после полного освобождения поездом приемоотправочного пути. Во время движения электропоездов в режимах «Ход 2» и «Ход 3» отключение тяги проходило у знака «отключить тяговые двигатели», на расстоянии 15 м за выходным светофором Нв211М. Результаты эксперимента представлены в табл. 3.

На рис. 8, а–в приведены осциллограммы напряжений: 205спт1 – напряжение на первичной обмотке питающего трансформатора рельсовой цепи 205РЦ; 205спт2 – напряжение на вторичной обмотке питающего трансформатора рельсовой цепи 205РЦ; 205рц, 207рц, 207а рц, 207с рц – напряжения на путевых элементах путевых реле ДСШ-2 рельсовых цепей 205РЦ, 207РЦ, 207аРЦ, 207сРЦ соответственно; 205пт – напряжение на выходе путевого трансформатора питания рельсовой цепи 205РЦ (напряжение на дополнительной обмотке питающего ДТ).

Из осциллограмм на рис. 8, а (205рц) вытекает, что в режиме «Ход 1» напряжение на путевых реле 205РЦ остается стабильным. При

а



б



Рис. 7. Осциллограммы напряжений: отключение тяги происходит на 20 (а) и 30 м (б) дальше по ходу от знака «отключить тяговые двигатели»

ТАБЛИЦА 3. Наличие провалов напряжения на путевых реле рельсовой цепи 205РЦ в зависимости от режима ведения электропоезда

Номер эксперимента	Маршрут поезда	Время начала движения	Режим ведения поезда	Провалы напряжения на путевых реле 205РЦ
1	201	11ч 11 мин	«Ход 1», поезд 1	Нет
2	214	11ч 22 мин	«Ход 1», поезд 2	Нет
3	202	11ч 25 мин	«Ход 1», поезд 3	Нет
4	239	11ч 28 мин	«Ход 2», поезд 1	Да
5	248	11ч 32 мин	«Ход 2», поезд 2	Да
6	235	11ч 35 мин	«Ход 2», поезд 3	Да
7	237	11ч 37 мин	«Ход 3», поезд 1	Да
8	238	11ч 40 мин	«Ход 3», поезд 2	Да
9	236	11ч 43 мин	«Ход 3», поезд 3	Да

а

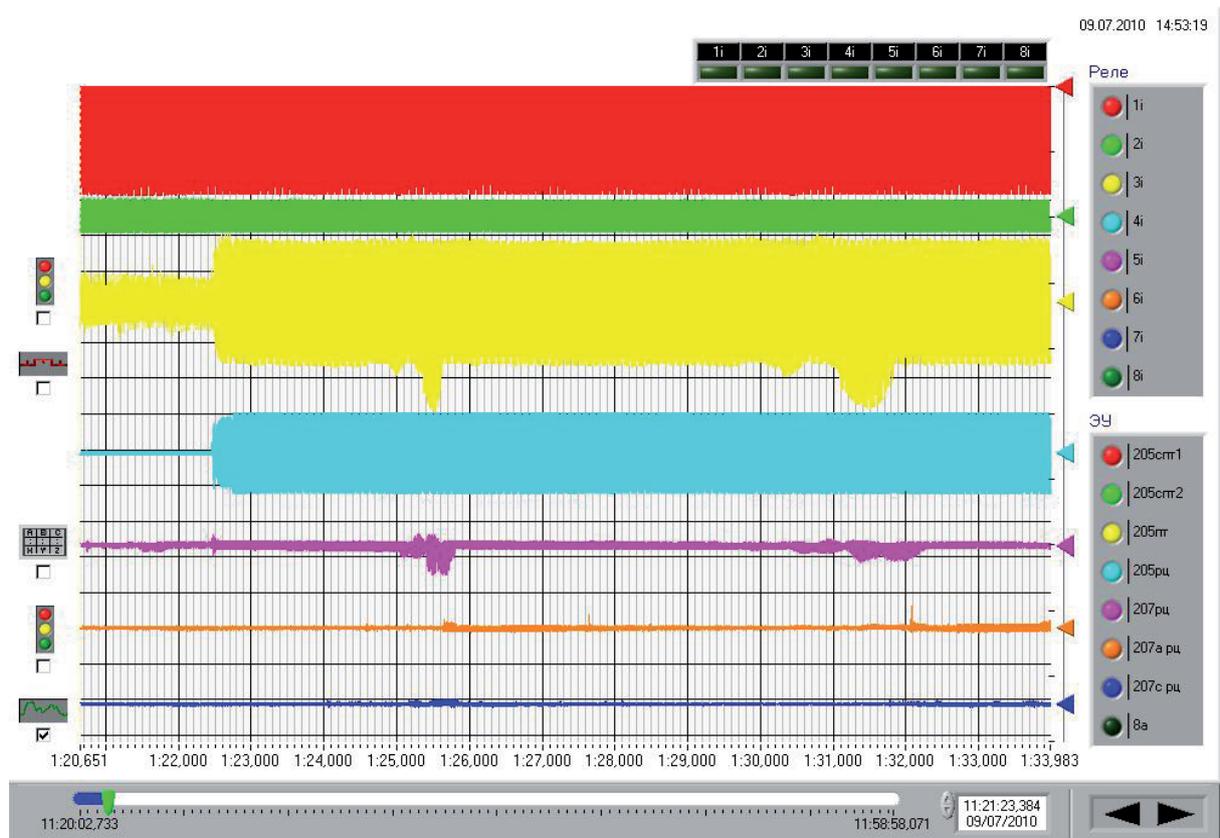
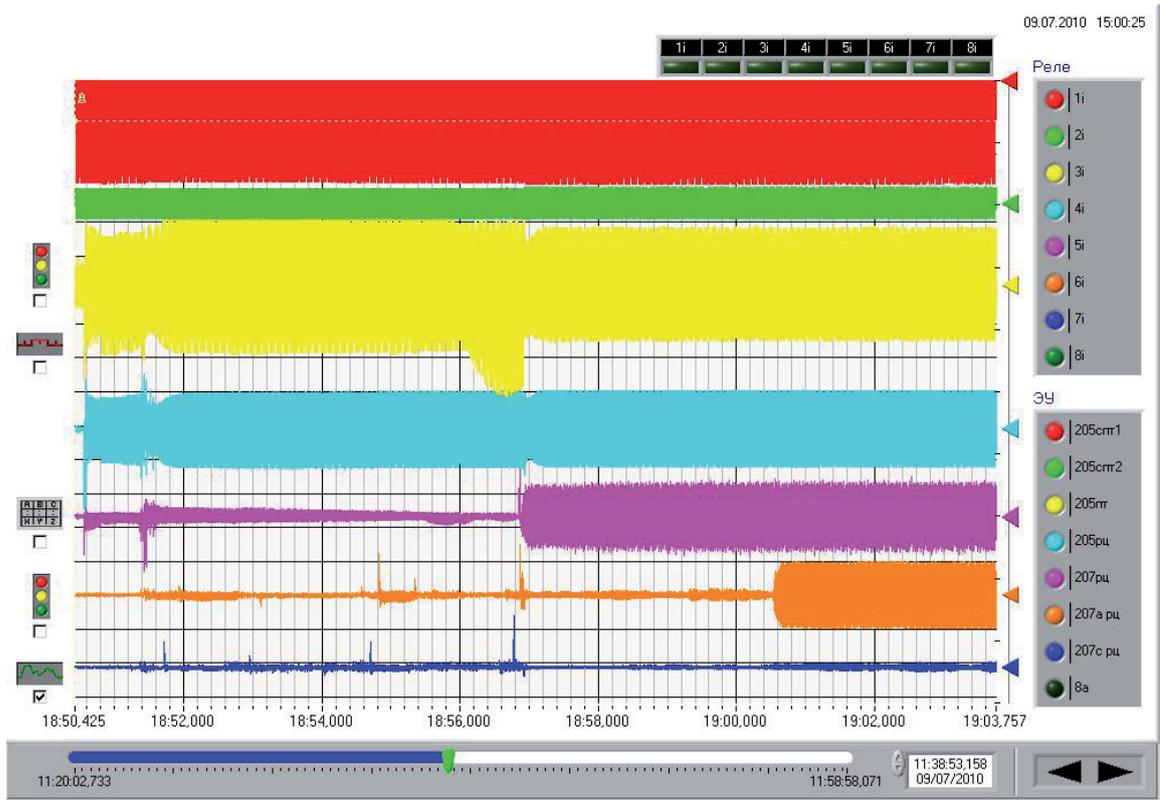
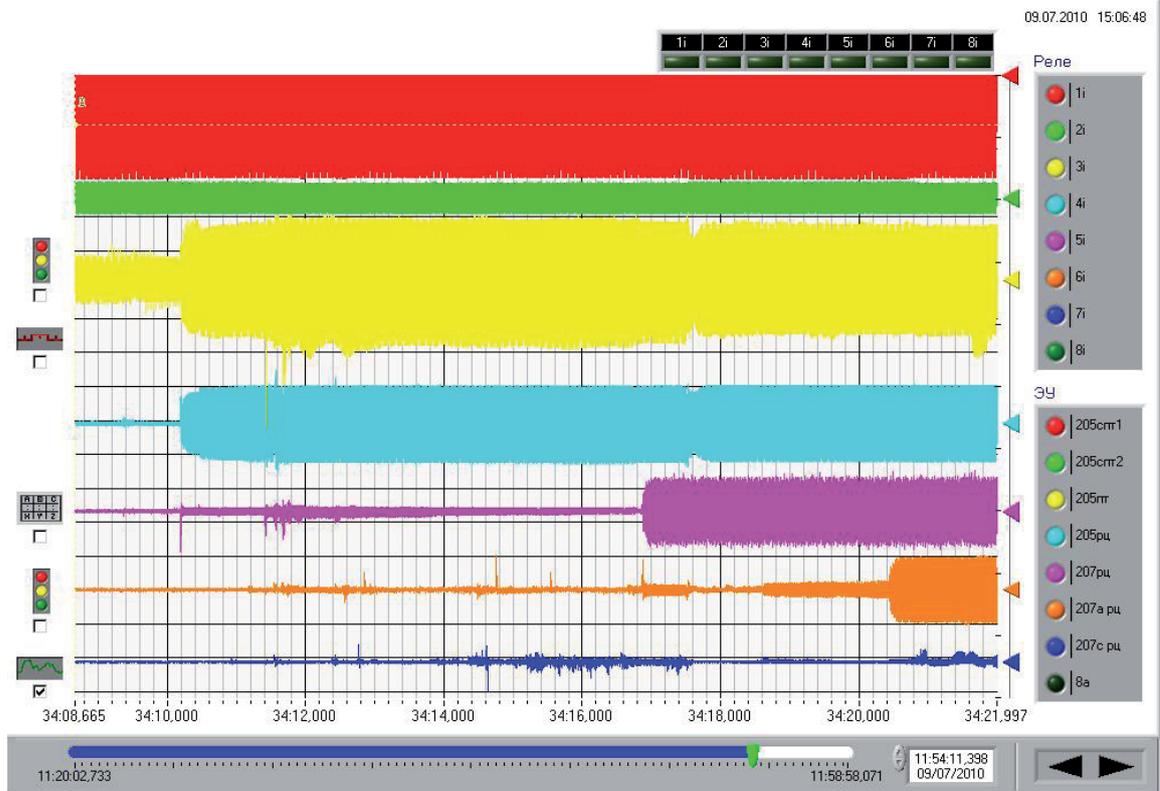


Рис. 8. Осциллограммы напряжений в режимах «Ход 1», поезд 1 (а), «Ход 2», поезд 3 (б), «Ход 3», поезд 3 (в)

б



б



Окончание рис. 8

этом в моменты коммутации электропоездов напряжение на путевом трансформаторе питания 205пт рельсовой цепи 205РЦ резко возрастает, но срыва колебаний в резонансном контуре на питающем конце цепи нет. Причиной отсутствия провалов напряжения на путевых реле 205РЦ следует признать низкие уровни токов коммутации и их производных в режиме «Ход 1».

В режиме «Ход 2» (см. рис. 8, б) напряжение 205пт на питающем конце рельсовой цепи 205РЦ в границах временного интервала 18 мин 51,4 с – 18 мин 57 с повышенное. Остаточное напряжение на путевом реле 207рц в шунтовом режиме работы рельсовой цепи 207РЦ на этом интервале времени показывает, что идет большой отбор мощности подвижным составом от СТП. Начало и окончание разгона электропоезда связаны с возникновением провалов напряжений 205пт в рельсовой цепи 205РЦ.

Осциллограммы напряжений в режиме «Ход 3» (см. рис. 8, в) эквивалентны осциллограммам напряжений в режиме «Ход 2» (см. рис. 8, б).

Проведенные испытания показали, что искажения питающего напряжения резонансных рельсовых цепей вызваны ведением электропоездов в режимах «Ход 2» и «Ход 3» при разгоне электропоезда, когда происходит отбор максимальной мощности, и при отключении тяги электропоезда, когда возникают высокие производные изменения тягового тока.

На участках высокой интенсивности движения поездов переход с требуемого режима ведения электропоезда «Ход 3» на режим «Ход 1», с целью снижения провалов напряжения на путевых реле, является недопустимым методом, так как приведет к сбою графика движения поездов.

## Заключение

Резонансные рельсовые цепи широко применяются в государственном унитарном предприятии «Петербургский метрополитен».

Опыт эксплуатации показал появление сбоев в работе резонансных рельсовых цепей, которые состоят в том, что после освобождения рельсовой цепи и в моменты коммутации тягового тока при разгоне электропоезда по соседней рельсовой цепи или отключении тяги происходит провал напряжения на освобожденной рельсовой цепи. Это приводит к кратковременной ложной занятости рельсовой цепи и нарушению работы систем автоматической локомотивной сигнализации и автоматического регулирования скорости движения поездов и, как следствие, к задержкам поездов.

Проведено обследование рельсовых цепей по определению причины возникновения поперечной асимметрии сопротивления рельсовой линии, которая связана с образованием металлической крошки, образуемой при прохождении токосъемников электропоезда через не перекрываемый изолирующий промежуток контактного рельса, и со снижением сопротивления рельсов по отношению к шине заземления метро.

Выявлена роль разброса параметров индуктивностей секций основной обмотки ДТ на продольную асимметрию сопротивления рельсовой линии. Показано, что при условии установки первого ДТ рельсовой цепи в междупутье, а второго ДТ этой же рельсовой цепи – у стены тоннеля необходимо выполнять правило, при котором к одному рельсу рельсовой цепи должны подключаться различные секции основных обмоток двух ДТ с целью компенсации разброса параметров суммарной индуктивности секций ДТ в различных рельсах рельсовой цепи.

Эксперименты по влиянию места отключения тяги электропоездов на величины провалов напряжения в резонансной рельсовой цепи показали, что происходит уменьшение провалов напряжения на путевых реле рельсовой цепи. Однако условие переноса места отключения тяги не всегда выполнимо, например при наличии крутых уклонов тоннеля метро.

Было изучено влияние режимов ведения электропоездов на величины провалов напря-

жения на путевом реле резонансной рельсовой цепи. При движении электропоезда в режиме «Ход 1» провалы напряжения отсутствовали. На участках с высокой интенсивностью движения поездов переход с требуемого режима ведения электропоезда «Ход 3» на режим «Ход 1» для снижения провалов напряжения на путевых реле недопустим, так как ведет к сбою графика движения поездов.

Проведенные исследования позволили исключить провалы напряжения на путевых реле резонансных рельсовых цепей путем снижения продольной асимметрии рельсовой линии за счет компенсации разброса параметров индуктивностей секций основных обмоток ДТ, подключенных к рельсам одной рельсовой цепи, а также путем понижения влияния металлической крошки на поперечную асимметрию сопротивления нитей рельсовой линии.

### Библиографический список

1. Сороко В. И. Аппаратура железнодорожной автоматики и телемеханики : справочник. Кн. 1 / В. И. Сороко, В. А. Милюков. – М. : НПФ Планета, 2000. – 961 с.
2. Махмутов К. М. Устройства интервального регулирования движения поездов на метрополитене / К. М. Махмутов. – М. : Транспорт, 1986. – 351 с.
3. Аркатов В. С. Рельсовые цепи. Анализ работы и техническое обслуживание / В. С. Аркатов, Ю. А. Кравцов, Б. М. Степенский. – М. : Транспорт, 1990. – 295 с.
4. Шаманов В. И. Электромагнитная совместимость систем железнодорожной автоматики и телемеханики : учеб. пособие / В. И. Шаманов. – М. : ФГБОУ «Учеб.-метод. центр по образованию на ж.-д. транспорте», 2013. – 244 с.
5. Шаманов В. И. Процесс формирования асимметрии тягового тока в рельсовых линиях / В. И. Шаманов // *Электротехника*. – 2014. – № 8. – С. 34–38.
6. Шаманов В. И. Асимметрия тяговых токов под катушками АЛС / В. И. Шаманов, Ю. А. Трофимов // *Автоматика. Связь. Информатика*. – 2008. – № 11. – С. 37–39.
7. Шаманов В. И. Динамика асимметрии переменного тягового тока в рельсовых линиях на двухпутных перегонах / В. И. Шаманов // *Электротехника*. – 2016. – № 10. – С. 74–79.
8. Шаманов В. И. Магнитные свойства рельсовых линий и уровень помех на аппаратуру автоматики и телемеханики / В. И. Шаманов // *Электротехника*. – 2015. – № 9. – С. 50–54.
9. Урцева В. С. Влияние асимметрии тягового тока на работу рельсовых цепей / В. С. Урцева, Н. В. Стадухина, К. В. Менакер // *Современные проблемы транспортного комплекса России*. – 2011. – № 1. – С. 188–197.
10. Завгородний А. В. Моделирование электромагнитных процессов в системе тягового электропитания / А. В. Завгородний, В. И. Гаврилюк // *Наука и прогресс транспорта. Вестн. Днепропетровск. ун-та ж.-д. транспорта*. – 2005. – Вып. 6. – С. 11–15.
11. Трофимов Ю. А. Обеспечение электромагнитной совместимости рельсовых цепей и устройств автоматической локомотивной сигнализации с тяговой сетью переменного тока : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Ю. А. Трофимов. – Иркутск : ИрГУПС, 2006. – 23 с.
12. Шаманов В. И. Помехи от тяговых токов в фазочувствительных рельсовых цепях / В. И. Шаманов, Г. С. Березовский, Ю. А. Трофимов // *Автоматика. Связь. Информатика*. – 2007. – № 1. – С. 30–32.
13. Шевердин И. Н. Влияние тяжеловесных поездов на рельсовые цепи и АЛС / И. Н. Шевердин, В. И. Шаманов, Ю. А. Трофимов // *Автоматика. Связь. Информатика*. – 2004. – № 8. – С. 24–29.
14. Шевердин И. Н. Влияние тяжеловесных поездов на рельсовые цепи и АЛС / И. Н. Шевердин, В. И. Шаманов, Ю. А. Трофимов // *Автоматика. Связь. Информатика*. – 2006. – № 10. – С. 16–19.
15. Обследование работы рельсовых цепей с учетом влияния обратного тягового тока : отчет по работе согласно договору № 248/09 (заключительный). – СПб. : ПГУПС, 2010. – 104 с.

### References

1. Soroko V. I. & Mylyukov V. A. *Apparatura zheleznodorozhnoy avtomatyky i telemekhaniky [Equipment of railway automatics and telemechanics]*.

Book 1. Moscow, NPF Planeta Publ., 2000, 961 p. (In Russian)

2. Makhmutov K. M. *Ustroistva intervalnogo regulirovaniya dvizheniya poyezdov na metropolytene* [Movement of trains collision avoidance equipment in a subway]. Moscow, Transport Publ., 1986, 351 p. (In Russian)

3. Arkatov V. S., Kravtsov Y. A. & Stepenskiy B. M. *Relsoviye tsepy. Analiz raboty i tekhnicheskoye obsluzhivaniye* [Track circuits. Functioning analysis and maintenance support]. Moscow, Transport Publ., 1990, 295 p. (In Russian)

4. Shamanov V. I. *Elektromagnitnaya sovmestymost system zheleznodorozhnoy avtomatyky i telemekhaniky* [Electromagnetic compatibility of railway automatics and telemechanics systems]. Moscow, Learning and teaching educational centre of railway transport Publ., 2013, 244 p. (In Russian)

5. Shamanov V. I. *Protsess formirovaniya assymetrii tyagovogo toka v relsovykh liniyakh* [Traction current asymmetry formation in railway lines]. *Electrical engineering*, 2014, no. 8, pp. 34–38. (In Russian)

6. Shamanov V. I. & Trofimov Y. A. *Assymetriya tyagovykh tokov pod katushkami ALS* [Traction current asymmetry under ALSS coils]. *Automatics. Connection. Informatics*, 2008, no. 11, pp. 37–39. (In Russian)

7. Shamanov V. I. *Dinamika assymetrii peremennogo toka v relsovykh liniyakh na dvuputnykh regionov* [Traction current asymmetry dynamics in railway lines on double-track running lines]. *Electrical engineering*, 2016, no. 10, pp. 74–79. (In Russian)

8. Shamanov V. I. *Magnitnye svoystva relsovykh liniy i uroven pomekh na apparaturu avtomatyky i telemekhaniky* [Magnetic properties of railway lines and interference level on automatics and telemechanics equipment]. *Electrical engineering*, 2015, no. 9, pp. 50–54. (In Russian)

9. Urtseva V. S., Stadukhina N. S., Stadukhina N. V. & Menaker K. V. *Vliyaniye assymetrii tyagovogo toka na rabotu relsovykh tsepey* [The influence of traction current asymmetry on track circuits functioning]. *Mo-*

*dern issues of transport system of the Russian Federation*, 2011, no. 1, pp. 188–197. (In Russian)

10. Zavgorodniy A. V. & Gavrylyuk V. I. *Modelirovaniye elektromagnitnykh protsessov v systeme tyagovogo elektrosnabzheniya* [Electromagnetic processes modeling in traction energy system]. *Nauka i progress transporta. Vestnyk Dnepropetrovskogo univesiteta zheleznodorozhnogo transporta* [Science and progress of transport. Dnepropetrovsk railway transport university], 2005, issue 6, pp. 11–15. (In Russian)

11. Trofimov Y. A. *Obespecheniye elektromagnitnoy sovmestymosti relsovykh tsepey i ustroystv avtomaticheskoy lokomotivnoy signalizatsii s tyagovoy setyu peremennogo toka* [Electromagnetic compatibility of track circuits provision and automatic cab signalling with electric traction network of alternating current]. Abstract Cand. Diss. Irkutsk, IrGUPS, 2006, 23 p. (In Russian)

12. Shamanov V. I., Berezovskiy G. S. & Trofimov Y. A. *Pomekhy ot tyagovykh tokov v fazochuvstvytelnykh relsovykh tsepyakh* [Traction current disturbance in phase-sensitive track circuits]. *Automatics. Connection. Informatics*, 2007, no. 1, pp. 30–32. (In Russian)

13. Sheverdyn I. N., Shamanov V. I. & Trofimov Y. A. *Vliyaniye tyazhelovesnykh poyezdov na relsoviye tsepy i ALS* [Heavy-tonnage trains impact on track circuits and ALSS]. *Automatics. Connection. Informatics*, 2004, no. 8, pp. 24–29. (In Russian)

14. Sheverdyn I. N., Shamanov V. I. & Trofimov Y. A. *Vliyaniye tyazhelovesnykh poyezdov na relsoviye tsepy i ALS* [Heavy-tonnage trains impact on track circuits and ALSS]. *Automatics. Connection. Informatics*, 2006, no. 10, pp. 16–19. (In Russian)

15. *Obsledovaniye raboty relsovykh tsepey s uchedom vliyaniya obratnogo tyagovogo toka: otchet po rabote soglasno dogovoru no. 248/09 (zakluchitelniy)* [Examination of track circuit functioning taking into account reverse traction current impact: report on performance as per contract no. 248/09 (final)]. Saint Petersburg, Petersburg State Transport University Publ., 2010, 104 p. (In Russian)

\*МАНАКОВ Александр Демьянович – доктор техн. наук, старший научный сотрудник ЦКЖТ, manakoff\_2@mail.ru; КАБЕЦКИЙ Андрей Геннадьевич – инженер, kabeckiy@gmail.com; ТРОШИН Александр Александрович – инженер, tralexalex@yandex.ru; ПАШАЕВ Юрий Михайлович – аспирант, prime-16@yandex.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 621.316.722.076.12

**А. Н. Марикин, В. А. Мирощенко****АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ  
В УСТРОЙСТВЕ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ  
С ПЕРЕМЕННОЙ ИНДУКТИВНОСТЬЮ**

Дата поступления: 12.04.2017

Решения о публикации: 24.04.2017

**Аннотация**

**Цель:** Проанализировать переходные процессы при включении устройства компенсации реактивной мощности с переменной индуктивностью и резком изменении нагрузки в электротяговой сети переменного тока. Определить диапазон регулирования реактивной мощности для возможных конструктивных исполнений устройства. Выбрать наиболее энергоэффективный вариант взаимного включения регулируемого реактора и батареи конденсаторов с нерегулируемой емкостью в устройстве компенсации реактивной мощности. Сделать вывод об использовании в системе управления устройства обратной связи. **Методы:** Рассмотрены схемы подключения устройства к однофазной сети переменного тока. Выбраны схемы взаимного подключения управляемого реактора и конденсаторной батареи. Произведен анализ диапазона регулирования конструктивных исполнений устройства компенсации реактивной мощности. В программном комплексе MATLAB Simulink произведено моделирование различных схемных решений компенсирующих устройств. Для одного варианта смоделирована работа устройства компенсации при резком изменении электротяговой нагрузки. **Результаты:** Установлено, что при последовательном подключении управляемого реактора и конденсаторной батареи диапазон регулирования может составлять не более 15% от номинальной мощности. Пусковой ток устройства достигает двукратного значения. При параллельном подключении имеется возможность регулировать реактивную мощность в широком диапазоне. Пусковой ток в этом случае достигает четырехкратного превышения над номинальным значением. В качестве дополнительного устройства предлагается использовать неуправляемый реактор, последовательно с конденсаторной батареей. Такой вариант позволяет снизить пусковой ток и одновременно обеспечить фильтрацию третьей гармоники тока. **Практическая значимость:** Последовательно-параллельный вариант схемного решения компенсирующей установки представляется наиболее перспективным для применения в тяговых сетях переменного тока.

**Ключевые слова:** Компенсация реактивной мощности, управляемый реактор, электротяговая сеть, фильтрация высших гармоник, переходные процессы.

**Aleksander N. Marykyn**, D. Sci., professor, head of a chair, marikin\_s@mail.ru; **\*Vasiliy A. Myroshenko**, postgraduate student, vasilymir@yahoo.com (Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University) THE ANALYSIS OF ELECTROMAGNETIC PROCESSES IN REACTIVE POWER COMPENSATION UNIT WITH VARIABLE INDUCTANCE

**Summary**

**Objective:** To analyze transient processes when activating reactive power compensation unit with variable inductance and load bounce in electric traction alternating current network. To determine reactive power control range for possible structural variations of a unit. To choose the most power efficient variant of mutual connection of controlled reactor and capacitor bank with uncontrolled capacity in reactive power compensation unit. To make a conclusion, concerning feedback device

application in control system. **Methods:** Connection diagrams of a unit to an alternating current monophasic network. Mutual connection diagrams of controlled reactor and capacitor bank were chosen. Structural variations' control range analysis of reactive power compensation unit was conducted. In MATLAB Simulink software package, simulation of different bucking out system circuitry was fulfilled. Simulation of compensation unit functioning was carried out for one variant with load bounce in electric traction. **Results:** It was established that, in case of series connection of controlled reactor and capacitor bank, control range may comprise no more than 15% of nominal capacity. Starting current of a unit reaches twofold value. Parallel connection makes it possible to control reactive power in a broad band. Starting current in this case reaches fourfold excess of value. It is suggested to use uncontrolled reactor successively with capacitor bank as an additional unit. Such a variant makes it possible to reduce starting current and simultaneously provide filtration of the third current harmonics. **Practical importance:** A series-parallel variant of compensation unit circuitry seems to be the most perspective for application in electric traction alternating current network.

**Keywords:** Reactive power compensation, controlled reactor, electric traction network, filtration of upper harmonics, transient processes.

## Введение

Одним из способов повышения энергоэффективности электрифицированных железных дорог переменного тока является компенсация реактивной мощности [1]. В настоящее время в электротяговой сети переменного тока применяются нерегулируемые либо ступенчато регулируемые установки компенсации реактивной мощности [2]. Они не позволяют плавно управлять реактивной мощностью в широком диапазоне, что необходимо в условиях резкопеременной тяговой нагрузки [3].

Устройство плавного управления реактивной мощностью в требуемом диапазоне может быть реализовано на основе конденсаторной батареи постоянной емкости в сочетании с управляемым реактором. Изменение индуктивности реактора можно осуществлять несколькими способами: переключением отпаяк обмотки реактора; подмагничиванием магнитопровода реактора постоянным током; регулированием тока, протекающего через реактор с помощью тиристоров или силовых транзисторов; механическим изменением немагнитного зазора в цепи реактора [4].

Взаимное включение реактора и конденсаторной батареи может быть и последовательное, и параллельное. Каждый из вариантов имеет свои достоинства и недостатки.

Целями настоящей статьи являются анализ электромагнитных процессов при включении и резком изменении нагрузки для различных конструктивных исполнений устройства компенсации, определение диапазона регулирования реактивной мощностью, выбор оптимального варианта.

## Общая схема подключения компенсирующего устройства

Рассмотрим устройство поперечной компенсации реактивной мощности [5]. При этом предполагаем устанавливать устройство на подстанции. Схема подключения устройства представлена на рис. 1.

На схеме компенсирующее устройство (КУ) подключено параллельно нагрузке в электротяговой сети переменного тока через высоковольтный выключатель  $Q$ . КУ охвачено обратной связью от фазометра  $\varphi$ , подключенного к трансформаторам тока (ТА) и напряжения (ТВ), которые установлены на подстанции. Такая схема подключения обеспечивает увеличение коэффициента мощности внешней питающей сети, повышение уровня напряжения на фидерах подстанции и, как следствие, рост уровня напряжения на токоприемнике электровоза [6]. Наличие обратной связи позволяет

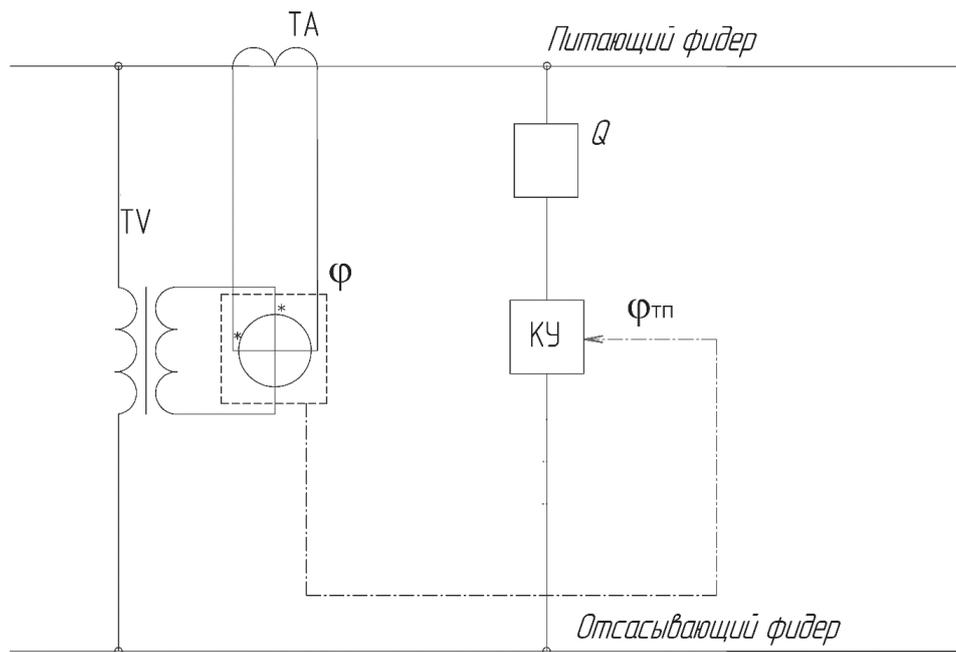


Рис. 1. Схема подключения компенсирующего устройства

регулировать индуктивность управляемого реактора, поддерживая коэффициент мощности на уровне не менее 0,95. Высоковольтный выключатель обеспечивает коммутацию токов в рабочих и аварийных режимах.

В составе самого устройства реактор может быть включен как последовательно, так и параллельно с конденсаторной батареей. Рассмотрим электромагнитные процессы в каждом отдельном варианте.

### Последовательное включение

Последовательное включение конденсаторной батареи постоянной емкости и управляемого реактора обладает хорошими форсирующими свойствами [7]. При меньшем значении сопротивления реактора, чем сопротивление конденсаторной батареи ( $X_L < X_C$ ), имеется возможность регулировать реактивную мощность от 0 до мощности конденсаторной батареи. При последовательном включении реактора основной проблемой является резонанс напряжений как на первой гармонике 50 Гц, так и на высших гармониках тока и напряжения

100, 150, 250 Гц (рис. 2) [8]. Кроме того в процессе регулирования наблюдается превышение напряжения на конденсаторной батарее относительно напряжения сети. Это связано с суммарным уменьшением сопротивления контура. На рис. 2 представлена зависимость превышения напряжения конденсаторной батареи относительно сети  $U_C/U$  от диапазона регулирования мощности компенсирующего устройства  $D_Q$ .

В то же время ток резонансной частоты может в несколько раз превышать номинальное значение [9]. Поэтому при плавном регулировании индуктивности реактора равенство емкостного и индуктивного сопротивлений недопустимо.

Анализ рис. 2 показывает, что целесообразным является диапазон регулирования между второй и третьей гармониками. Регулирование при больших значениях индуктивного сопротивления реактора приводит к недопустимому повышению напряжения на обкладках конденсаторной батареи.

В программном комплексе MATLAB Simulink [10, 11] были смоделированы переходные процессы при включении устрой-

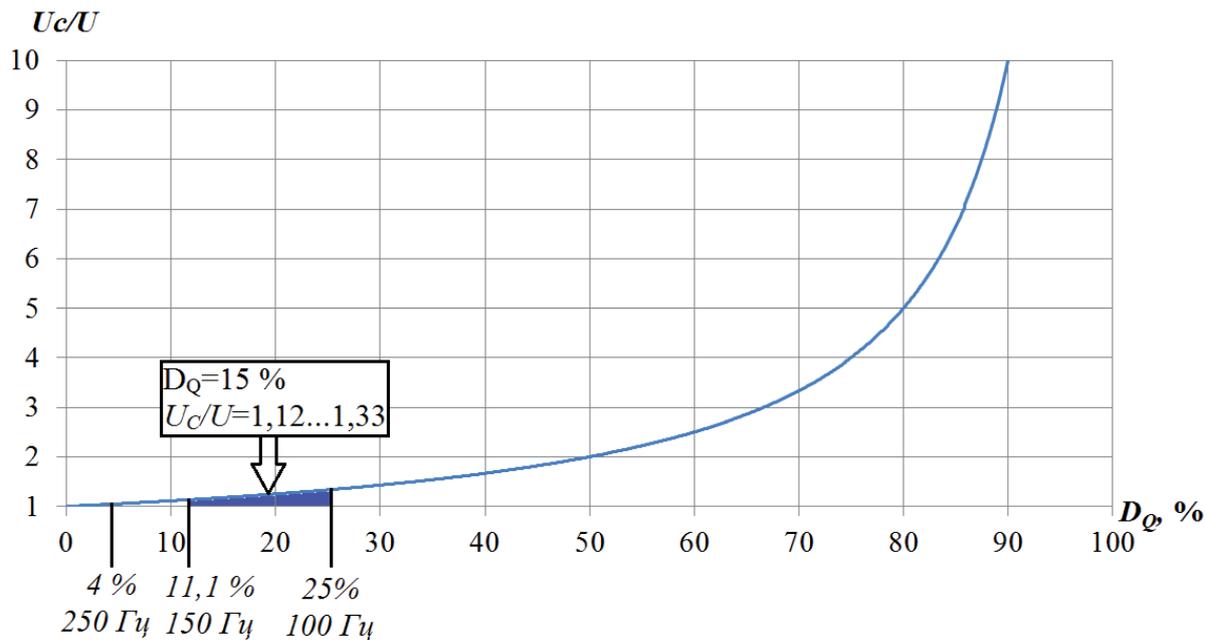


Рис. 2. Зависимость превышения напряжения конденсаторной батареи относительно сети  $U_c/U$  от максимального диапазона регулирования компенсирующего устройства

ства без нагрузки и с нагрузкой на линии. На рис. 3 представлен результат моделирования при включении устройства на номинальную мощность 5 МВА с максимальной индуктивностью. Его анализ показывает, что в момент коммутации имеет место более чем двукрат-

ное превышение номинального значения тока, поэтому необходима установка дополнительного оборудования для ограничения бросков тока.

При последовательном подключении реактора и конденсаторной батареи устройство

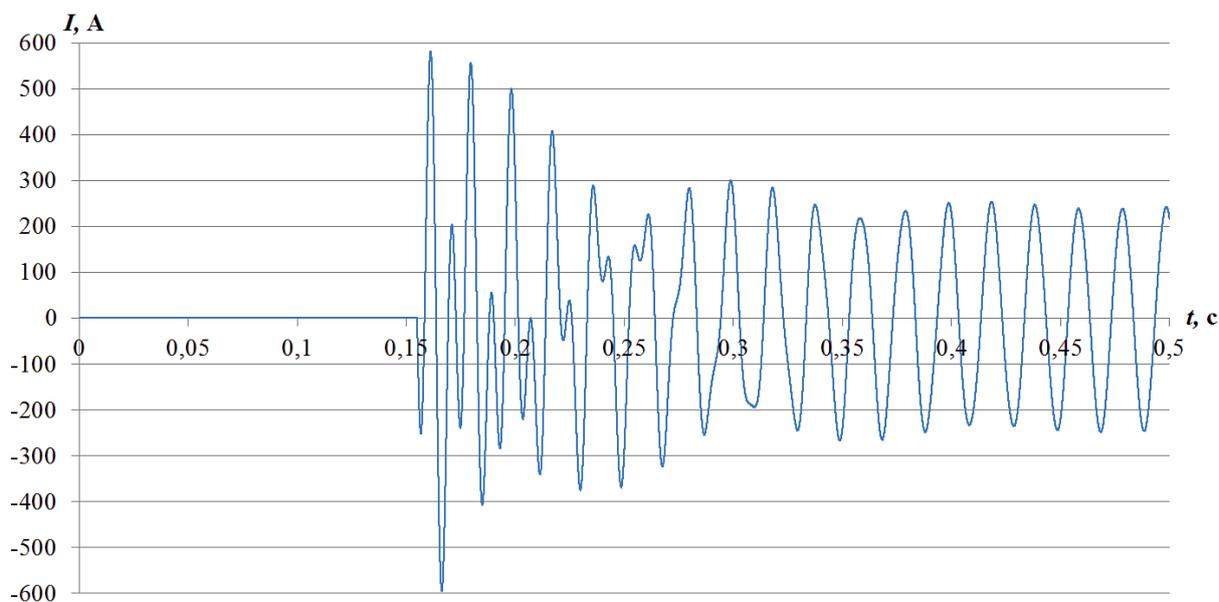


Рис. 3. График тока сети при включении устройства с последовательным подключением конденсаторов и реактора

будет потреблять большую мощность даже при отсутствии нагрузки на линии в любой точке регулирования. Потому требуется отключение устройства при низкой нагрузке сети или ее отсутствии.

### Параллельное включение

При параллельном включении резонанс напряжений отсутствует, но имеет место резонанс токов, при котором сопротивление компенсирующего устройства стремится к бесконечности, а ток в контуре «реактор–конденсаторная батарея» ограничивается лишь сопротивлением реактивных элементов. Так как увеличение суммарного сопротивления компенсирующего устройства до больших значений не требует отключения устройства при отсутствии нагрузки, то возможно регулирование реактивной мощности даже при низкой нагрузке.

При регулировании индуктивности в условиях, когда  $X_L < X_C$ , возможна компенсация емкостной составляющей реактивной мощности

[12], а переход через индуктивность  $X_L = X_C$  влечет возрастание токов в контуре компенсирующего устройства.

На рис. 4 приведен результат моделирования включения компенсирующего устройства в сеть без нагрузки. Можно наблюдать практически четырехкратное превышение рабочего тока устройства.

Подключение устройства в сеть с нагрузкой и без нее с разными значениями индуктивности дает аналогичный результат. В то же время необходимо дополнительное устройство для понижения пусковых токов устройства.

### Последовательно-параллельное включение

Одним из способов понижения пусковых токов при параллельном соединении является установка неуправляемого реактора, последовательно с конденсаторной батареей. Если неуправляемый реактор и конденсаторная батарея будут рассчитаны на резонанс напря-

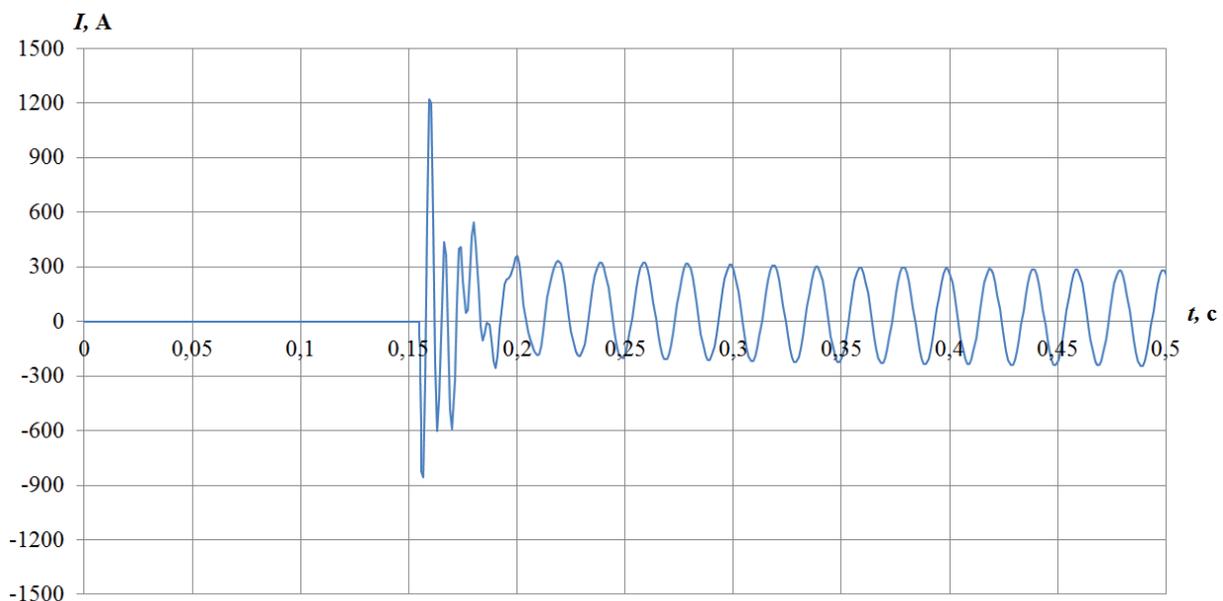


Рис. 4. График тока сети при включении устройства с параллельным подключением конденсаторов и реактора

жений для частоты 147 Гц, компенсирующее устройство будет выполнять функцию фильтрации третьей гармонической составляющей для тяговой сети [13]. Третья гармоника – преобладающая из спектра высших гармоник тока, генерируемых электровозом переменного тока [14].

На рис. 5 представлен график тока сети при включении устройства в сеть без нагрузки, построенный в результате моделирования. Его анализ показывает, что пусковой ток устройства снизился, но незначительно. Поэтому требуются дополнительные меры для ограничения пусковых токов, например применение ПИД-регуляторов.

Далее была смоделирована ситуация резкого изменения нагрузки на линии. На рис. 6, *a* приведена зависимость тока сети от времени при заходе поезда в зону подстанции, на рис. 6, *б* – зависимость фазового угла на фидерах тяговой подстанции. Из рисунка следует, что коммутационные броски тока при изменении нагрузки в устройстве не происходят [15]. С помощью ПИД-регулятора могут быть достигнуты требуемая точность и устойчивость системы управления компенсирующим устройством.

## Заключение

Устройство компенсации реактивной мощности на основе конденсаторной батареи постоянной емкости и управляемого реактора способно регулировать реактивную мощность в сети в широком диапазоне.

Для всех конструктивных вариантов наблюдаются пусковые токи в 2–4 раза больше номинальных. Для любого варианта подключения необходима дополнительная установка устройства ограничения пусковых токов.

Установка нерегулируемого реактора последовательно с конденсаторной батареей в варианте параллельного включения позволяет снизить пусковой ток устройства и обеспечить фильтрацию третьей гармоники.

Наибольший диапазон регулирования достигается при параллельном включении конденсаторной батареи и управляемого реактора, может достигать 100% от номинальной мощности. При последовательном подключении он составляет около 15%.

Для достижения требуемой точности и устойчивости системы управления следует использовать цепи обратной связи, например с ПИД-регулятором.

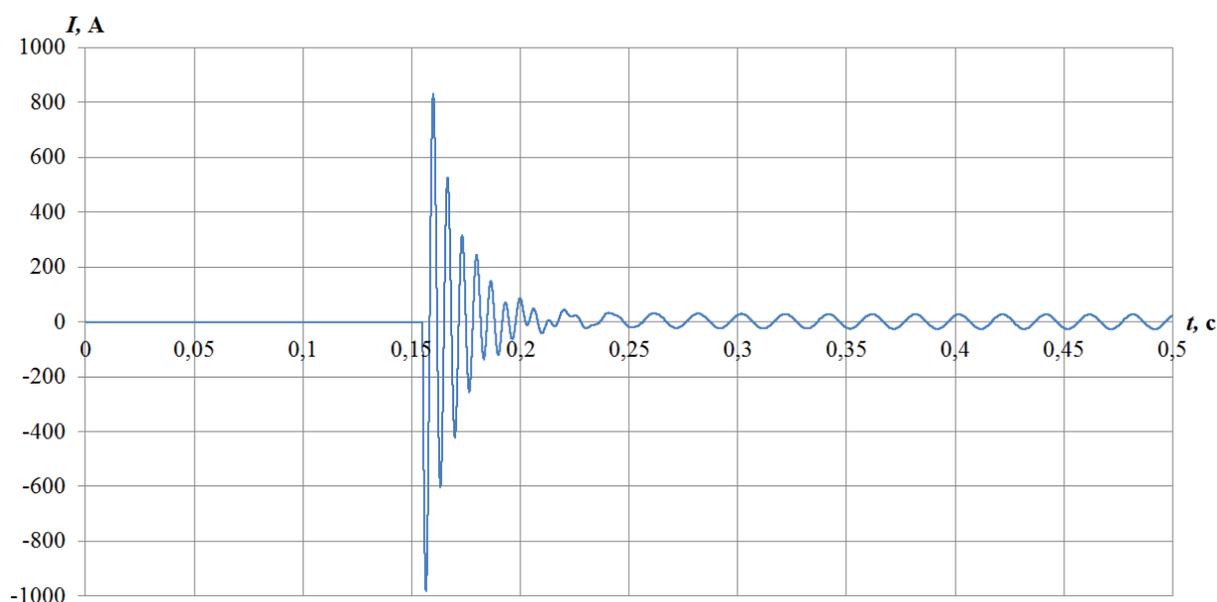


Рис. 5. График тока сети при включении устройства с последовательно-параллельным подключением конденсаторов и реакторов

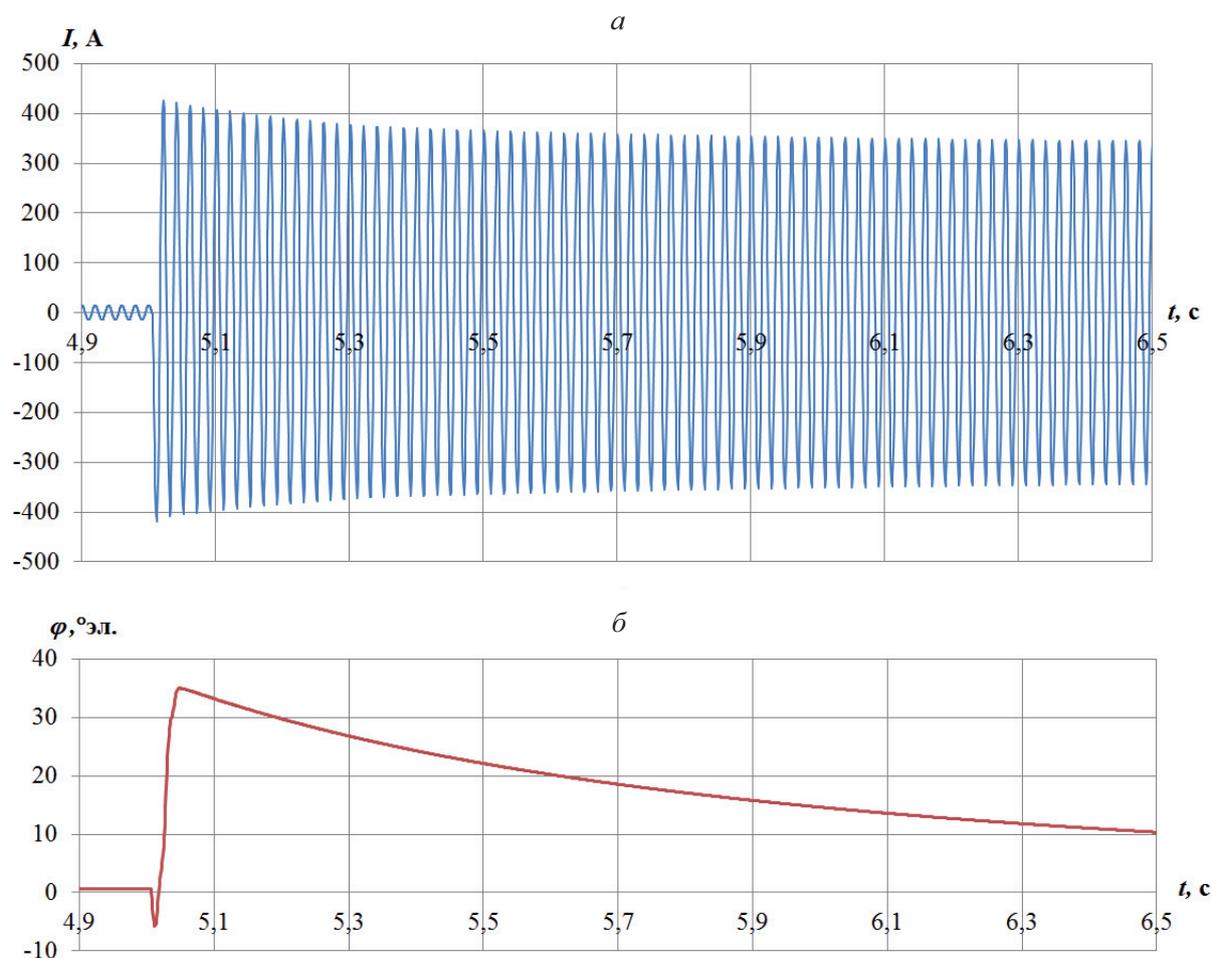


Рис. 6. Графики тока (а) и фазового угла сети (б) при изменении нагрузки с последовательно-параллельным подключением конденсаторов и реакторов

### Библиографический список

1. Овсейчук В. Компенсация реактивной мощности. К вопросу о технико-экономической целесообразности / В. Овсейчук, Г. Трофимов, А. Кац, И. Винер, Р. Укасов, А. Шимко // Новости электротехники. – 2008. – № 4 (52). – URL : <http://www.news.elteh.ru/arh/2008/52/08.php> (дата обращения: 12.03.2017).

2. Бородулин В.М. Конденсаторные установки электрифицированных железных дорог / В.М. Бородулин, Л.А. Герман, Г.А. Николаев. – М. : Транспорт, 1983. – 183 с.

3. Марикин А.Н. Адаптивное устройство компенсации реактивной мощности в тяговом электроснабжении переменного тока / А.Н. Марикин,

В.А. Мирощенко // Изв. Петерб. гос. ун-та путей сообщения. – 2014. – Вып. 1 (38). – С. 16–21.

4. Соколов С.Е. Управляемые реакторы. Обзор технологий / С.Е. Соколов, А.Г. Долгополов // Новости электротехники. – 2012. – № 3 (75). – С. 18–22.

5. Марикин А.Н. Устройство поперечной компенсации реактивной мощности с изменяющейся индуктивностью / А.Н. Марикин, С.В. Кузьмин, В.А. Мирощенко // Изв. Петерб. гос. ун-та путей сообщения. – 2015. – Вып. 3 (44). – С. 77–84.

6. Марквард К.Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог / К.Г. Марквард. – М. : Транспорт, 1982. – 528 с.

7. Идельчик В.И. Электрические системы и сети : учебник для вузов / В.И. Идельчик. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 592 с.

8. Босый Д. А. Комплексная оценка показателей качества электроэнергии на тяговых подстанциях переменного тока / Д. А. Босый // Наука и прогресс транспорта. Вестн. Днепропетровск. нац. ун-та ж.-д. транспорта. – 2013. – № 4 (46). – С. 30–37.

9. Минина А. А. Методика выбора параметров средств компенсации реактивной мощности в тяговых сетях переменного тока / А. А. Минина, В. И. Пантелеев, Е. В. Платонова // Вестн. Сиб. гос. аэрокосмич. ун-та им. акад. М. Ф. Решетнева. – 2013. – Вып. 1 (47). – С. 59–63.

10. Щербаков В. С. Основы моделирования систем автоматического регулирования и электротехнических систем в среде Matlab и Simulink : учеб. пособие / В. С. Щербаков, А. А. Руппель, В. А. Глушеч. – Омск : Изд-во СибАДИ, 2003. – 160 с.

11. Черных И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink / И. В. Черных. – М. : ДМК Пресс ; СПб. : Питер, 2008. – 288 с.

12. Берзан В. П. Компенсация реактивной мощности тяговой сети электрифицированного железнодорожного транспорта / В. П. Берзан, В. И. Пацюк, М. С. Тыршу, И. В. Андрос, В. Д. Шелягин, А. Т. Никулин, А. В. Бернацкий // Проблемы региональной энергетики. – 2010. – № 2 (13). – С. 19–34.

13. Черемисин В. Т. Двухрезонансные фильтрокомпенсирующие устройства электрифицированных железных дорог / В. Т. Черемисин, В. А. Кващук, С. Н. Бренков // Транспорт Российской Федерации. – 2008. – № 5. – С. 48–51.

14. Евстафьев А. М. Повышение энергетической эффективности электровозов переменного тока / А. М. Евстафьев, А. Н. Сычугов // Изв. Петерб. гос. ун-та путей сообщения. – 2013. – Вып. 1 (34). – С. 22–30.

15. Вострикова Е. А. О выборе зоны нечувствительности при компенсации реактивной мощности / Е. А. Вострикова, А. Г. Немцев // Вестн. Чуваш. гос. ун-та. – 2004. – № 2. – С. 132–135.

## References

1. Ovseychuk V. A., Trofimov G., Kats A., Viner I., Ukasov R. & Shymko A. Kompensatsiya reaktivnoy moshnosti. K voprosu o tekhniko-ekonomicheskoy

tselesoobraznosti [Reactive power compensation. On the issue of technical and economic expediency]. *Electrical engineering Bulletin*, 2008, no. 4 (52). (In Russian)

2. Borodulyn V. M., German L. A. & Nikolayev G. A. *Kondensatorniye ustanovky elektryfirovannykh zheleznykh dorog* [Condensing units of electrified railroads]. Moscow, Transport Publ., 1983, 183 p. (In Russian)

3. Marykyn A. N. & Myroshenko V. A. Adaptivnoye ustroystvo kompesatsii reaktivnoy moshnosti v tyagovom elektrosnabzhenii peremennogo toka [Reactive power compensation adaptive device in tractive electrical supply of alternating current]. *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2014, issue 1 (38), pp. 16–21. (In Russian)

4. Sokolov S. Y. & Dolgoplov A. G. Upravlyayemiye reaktory. Obzor tekhnologii [Controlled reactors. Overview of techniques]. *Electrical engineering bulletin*, 2012, no. 3 (75), pp. 18–22. (In Russian)

5. Marykyn A. N., Kuzmyn S. V. & Myroshenko V. A. Ustroystvo poperechnoy kompesatsii reaktivnoy moshnosti s izmenyajushchey induktivnostyu [Reactive shunt compensation unit with variable inductance]. *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2015, issue 3 (44), pp. 77–84. (In Russian)

6. Markvard K. G. *Elektrosnabzheniye elektryfirovannykh zheleznykh dorog* [Power supply of electrified railroads]. Moscow, Transport Publ., 1982, 528 p. (In Russian)

7. Idelchik V. I. *Elektrycheskiye sistemy i sety* [Electric systems and mains]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1989, 592 p. (In Russian)

8. Bosiy D. A. Kompleksnaya otsenka pokazateley kachestva elektroenergii na tyagovykh podstantsiyakh peremennogo toka. Nauka i progress transporta [Integrated assessment of electric power quality rating on alternating-current traction substations. Science and progress of transport]. *Vestnik Dnepropetrovskogo natsionalnogo universiteta zheleznodorozhnogo transporta* [Dnepropetrovsk National University of Railway Transport Bulletin], 2013, no. 4 (46), pp. 30–37. (In Russian)

9. Mynina A. A., Panteleyev V. I. & Platonova Y. V. Metodika vybora parametrov sredstv kompesatsii reaktivnoy moshnosti v tyagovykh setyakh peremennogo toka [Choice technique of reactive power compensa-

tion techniques in traction mains of alternating current]. *Siberian State aerospace University*, 2013, issue 1 (47), pp. 59–63. (In Russian)

10. Sherbakov V. S., Ruppel A. A. & Glushets V. A. *Osnovy modelirovaniya system avtomaticheskogo regulirovaniya i elektrotekhnicheskikh system v srede Matlab i Simulink [Simulation foundations of automatic control systems and electrotechnical systems in Matlab and Simulink medium]*. Omsk, SibADI Publ., 2003, 160 p. (In Russian)

11. Chernykh I. V. *Modelirovaniye elektrotekhnicheskikh ustroystv v MATLAB, SimPowerSystems i Simulink [Simulation of electrical devices in MATLAB, SimPowerSystems and Simulink]*. Moscow, DMK Press Publ.; Saint Petersburg, Peter Publ., 2008, 288 p. (In Russian)

12. Berzan V. P., Patsyuk V. I., Tyrshu M. S., Andros I. V., Shelyagyn V. D., Nikulyn A. T. & Bernatskiy A. V. Kompensatsiya reaktivnoy moshnosti tyagovoy sety elektrifitsirovannogo zheleznodorozhnogo transporta [Reactive power compensation of electrified railway transport traction mains]. *Regional power*

*engineering issues*, 2010, no. 2 (13), pp. 19–34. (In Russian)

13. Cheremysyn V. T., Kvashuk V. A. & Brenkov S. N. Dvukhrezonansniye filtrokompensirujushiyе ustroystva elektrifitsirovannykh zheleznodorozhnykh dorog [Double-resonant filter-compensating facilities of electrified railroads]. *Transport of the Russian Federation*, 2008, no. 5, pp. 48–51. (In Russian)

14. Yevstafiev A. M. & Sychugov A. N. Povyshekiye energeticheskoy effektivnosti elektrovozov peregannogo toka [Energy effectiveness increase of alternating-current electric locomotives]. *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2013, issue 1 (34), pp. 22–30. (In Russian)

15. Vostrikova Y. A. & Nemtsev A. G. O vybore zony nechuvstvytelnosti pry kompensatsii reaktivnoy moshnosti [On the choice of dead zone in the process of reactive power compensation]. *Vestnyk Chuvashskogo gosudarstvennogo universiteta [Chuvash State University Bulletin]*, 2004, no. 2, pp. 132–135. (In Russian)

МАРИКИН Александр Николаевич – доктор техн. наук, профессор, заведующий кафедрой, marikin\_s@mail.ru; \* МИРОЩЕНКО Василий Анатольевич – аспирант, vasilymir@yahoo.com (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 681.518.5:004.052.32

**Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников,  
Д. В. Ефанов, Д. В. Пивоваров**

## **ПРИМЕНЕНИЕ РАВНОВЕСНОГО КОДА «1 ИЗ 5» ДЛЯ ОРГАНИЗАЦИИ КОНТРОЛЯ КОМБИНАЦИОННЫХ СХЕМ**

Дата поступления: 11.04.2017

Решение о публикации: 11.04.2017

### **Аннотация**

**Цель:** Исследование особенностей применения равновесного кода «1 из 5» при организации систем функционального контроля комбинационных логических схем. **Методы:** Применяются методы теории информации и кодирования, теории дискретных устройств и технической диагностики дискретных систем. **Результаты:** Предложено использовать для организации контроля комбинационных схем методом логического дополнения равновесный код «1 из 5», тестер которого имеет простую структуру и требует для полной проверки пяти тестовых комбинаций. Приводится способ вычисления функций логического дополнения, позволяющий обеспечить тестируемость блока логического дополнения и тестера в составе схемы контроля. Показаны преимущества применения равновесного кода «1 из 5» перед использованием для организации контроля комбинационных схем других равновесных кодов с меньшей длиной кодового слова. **Практическая значимость:** Применение для контроля комбинационных схем равновесного кода «1 из 5» перспективно при организации самопроверяемых дискретных устройств автоматики и вычислительной техники.

**Ключевые слова:** Комбинационная схема, система контроля, метод вычисления контрольных разрядов, метод логического дополнения, равновесные коды, код «1 из 5», самопроверяемость.

**Valeriy V. Sapozhnikov**, D. Sci., professor, port.at.pgups1@gmail.com; **Vladimir V. Sapozhnikov**, D. Sci., professor, at.pgups@gmail.com; **\*Dmitriy V. Efanov**, Cand. Sci., associate professor, TrES-4b@yandex.ru; **Dmitriy V. Pyvovarov**, postgraduate student, pivovarov.d.v.spb@gmail.com (Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University).

### **Summary**

**Objective:** To study specificities of constant-weight code application in the process of concurrent error detection of combinational logic circuits organization. **Methods:** Information and coding theories, as well as technical diagnostics of discrete systems were applied. **Results:** It was suggested to apply a “1-out of-5” equilibrium code in organizing of combinational circuits control by means of Boolean complement method, the tester of which has a simple structure and needs five testing patterns for its full check. The calculation method of Boolean complement functions was given; the former makes it possible to provide testability of a Boolean complement block and a tester within a checking circuit. The advantages of a “1-out of-5” equilibrium code application were presented, compared to the usage of other equilibrium codes with a shorter length of a code word for organization of combinational circuits’ check. **Practical importance:** The application of a “1-out of-5” equilibrium code for organization of combinational circuits’ check is promising for self-checking discrete automatic and calculating machines.

**Keywords:** Combinational circuit, check system, check bits calculation method, Boolean complement method, constant-weight codes, “1-out-of-5” code, self-testability.

При разработке надежных дискретных систем автоматического и автоматизированного управления на транспорте и в промышленности повсеместно используются самопроверяемые схемы встроенного и надстраиваемого контроля [1–3]. Методы их построения базируются на теории систем функционального (рабочего) диагностирования – такого способа определения технического состояния объекта диагностирования, при котором он не отключается от управляемых объектов, а все входные воздействия одновременно являются и тестовыми [4].

В составе дискретных систем могут быть выделены последовательностные и комбинационные составляющие. Для контроля исправности последних часто применяют системы функционального контроля [5, 6].

Цель данной статьи – развитие методов синтеза систем функционального контроля комбинационных схем автоматики и вычислительной техники на основе метода логического дополнения по равновесным кодам. Для организации контроля комбинационных схем предлагается использовать равновесный код «1 из 5».

### Структурные схемы систем функционального контроля

При организации контроля комбинационных логических схем часто применяются методы помехоустойчивого кодирования [7]. При этом, как правило, используют равномерные коды с небольшой избыточностью, ориентированные только на обнаружение ошибок, что позволяет организовывать относительно простые контрольные схемы [8].

На рис. 1 изображена структурная схема системы функционального контроля. В ней блок  $F(x)$  – это исходная комбинационная схема (объект диагностирования). Для организации контроля правильности выполнения функций блоком  $F(x)$  и, тем самым, косвенного определения его технического состояния он снабжается специализированной схемой

контроля [9, 10]. Схема контроля может быть реализована по методу либо вычисления контрольных разрядов [11], либо логического дополнения [12].

В первом случае схема контроля реализуется следующим образом. Информационный вектор  $\langle f_m f_{m-1} \dots f_2 f_1 \rangle$ , разряды которого отождествлены со значениями функций, реализуемых блоком  $F(x)$ , с помощью блока контрольной логики  $G(x)$  дополняется до кодового слова  $\langle f_m f_{m-1} \dots f_2 f_1 g_k g_{k-1} \dots g_2 g_1 \rangle$  заранее выбранного делимого  $(m, k)$ -кода ( $m$  и  $k$  – длины информационных и контрольных векторов) [13, 14]. Для проверки соответствия информационных и контрольных разрядов в схеме контроля устанавливается полностью самопроверяемый тестер  $TSC$ , выходы которого  $z^0$  и  $z^1$  являются и контрольными выходами схемы контроля (рис. 2, а).

Второй вариант реализации схемы контроля связан с преобразованием значений разрядов информационного вектора  $\langle f_m f_{m-1} \dots f_2 f_1 \rangle$  в разряды кодового слова некоторого равномерного кода, чаще всего неразделимого [15, 16]. Блок контрольной логики  $G(x)$  в этом случае вычисляет значения функций логического дополнения  $g_1, g_2, \dots, g_{k-1}, g_k$ , которые поступают на входы блока логического дополнения и сравниваются в нем со значениями рабочих функций  $f_1, f_2, \dots, f_{m-1}, f_m$  по правилу

$$h_i = f_i \oplus g_i, \quad i = \overline{1, m}. \quad (1)$$

Функции  $g_i$  подбираются таким образом, чтобы кодовое слово, получаемое на выходах блока логического дополнения, принадлежало заранее выбранному коду. Соответствие формируемого кодового слова заранее выбранному коду проверяется полностью самопроверяемым тестером  $TSC$  (рис. 2, б).

В [17] отмечается, что структура системы функционального контроля, построенная по методу логического дополнения, имеет ряд преимуществ по сравнению со структурой, организованной по методу вычисления контрольных разрядов. Прежде всего метод логического дополнения позволяет гораздо проще

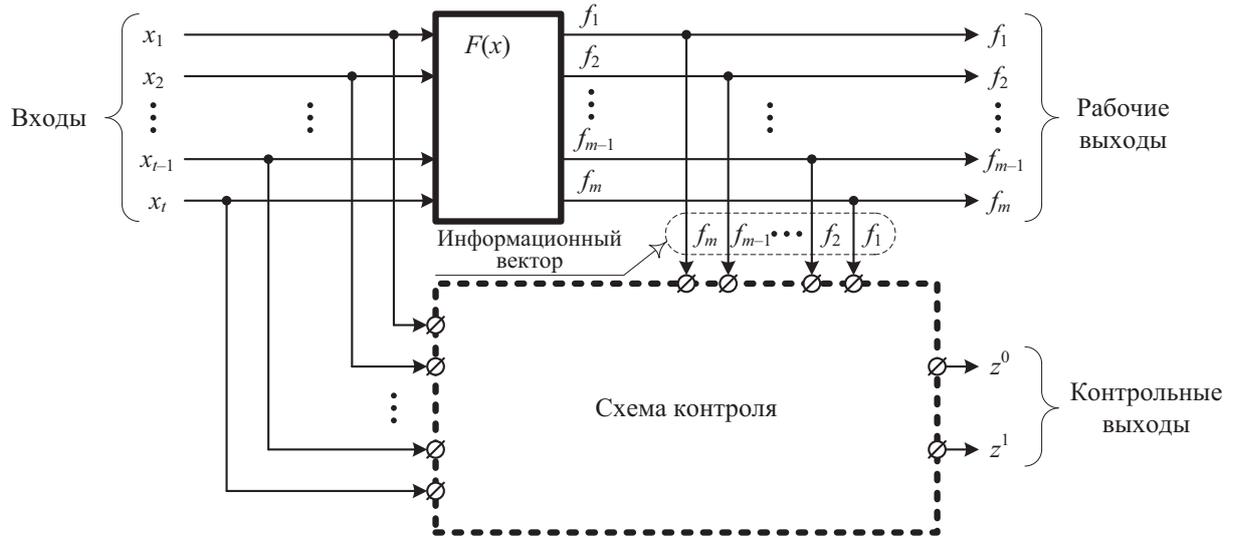


Рис. 1. Структурная схема системы контроля

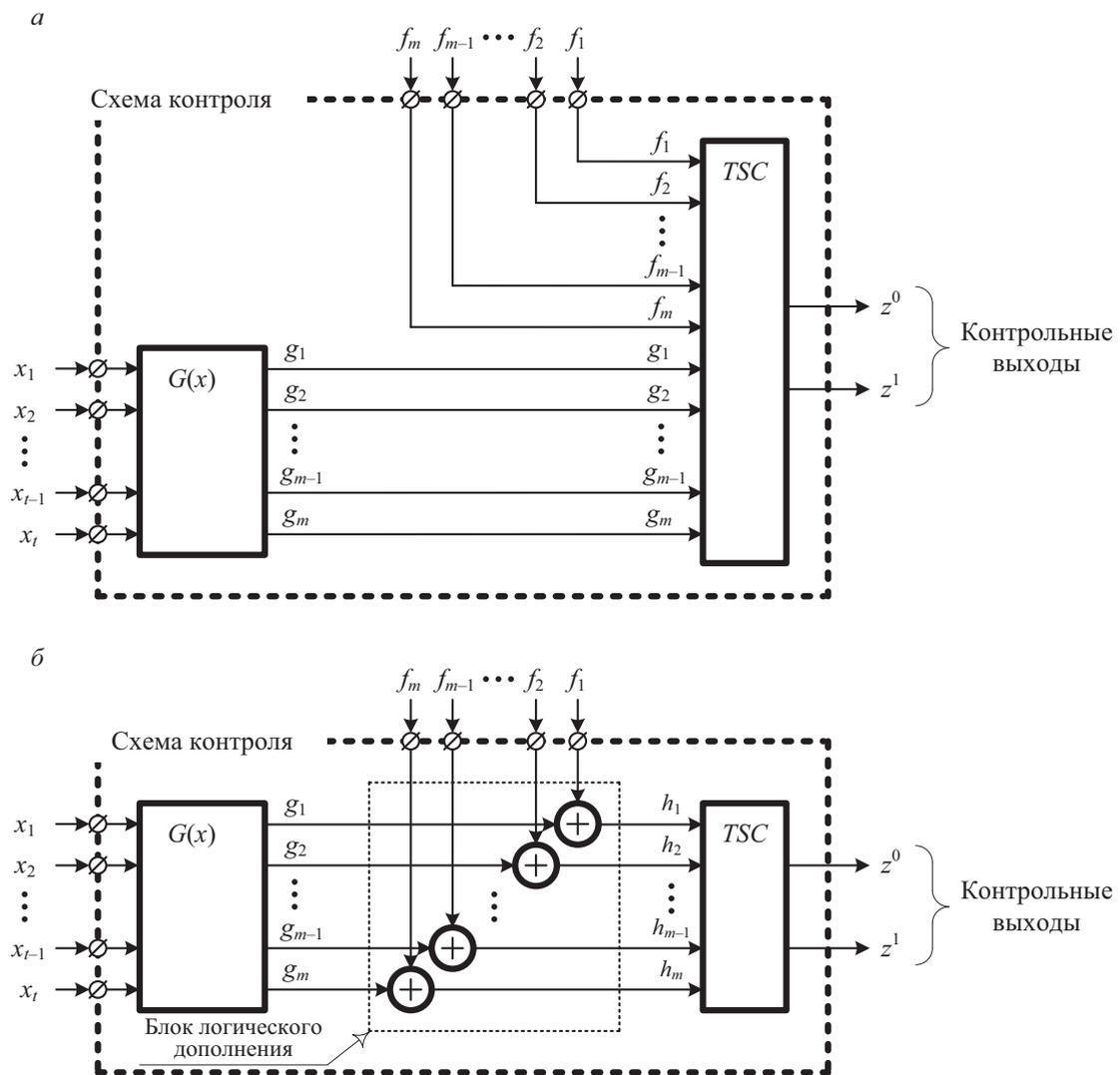


Рис. 2. Варианты реализации схемы контроля:

а – по методу вычисления контрольных разрядов; б – по методу логического дополнения

обеспечить самопроверяемость схемы контроля, а также за счет возможности подбора функций дополнения удастся влиять на такой важный показатель как структурная избыточность системы контроля.

При организации системы функционального контроля по методу логического дополнения часто используют равновесные коды с небольшой длиной кодовых слов – коды «1 из 3», «1 из 4», «2 из 4» [18–23]. Структуры тестеров таких кодов простые и требуют небольшого количества тестовых комбинаций для полной проверки.

Рассмотрим развитие метода логического дополнения за счет применения при организации контроля равновесного кода «1 из 5» (1/5-кода), тестер которого также имеет простую структуру и необходимо небольшое количество проверочных комбинаций [24].

### Использование 1/5-кода для контроля комбинационных схем

При организации контроля комбинационных логических схем по 1/5-коду может применяться следующий алгоритм:

1) множество выходов комбинационной схемы разбивается на подмножества, содержащие по пять элементов (подмножества могут пересекаться);

2) выходы, входящие в каждое из подмножеств, контролируются на основе 1/5-кода с помощью отдельной схемы контроля, имеющей два контрольных выхода;

3) выходы схем контроля различных подмножеств выходов объединяются на входах самопроверяемой схемы сжатия парафазных сигналов [25] с целью получения одной группы контрольных выходов  $\langle z^0 z^1 \rangle$ .

Следует отметить, что, как правило, строится система функционального контроля, позволяющая фиксировать проявления любых одиночных константных неисправностей в объекте диагностирования  $F(x)$  [4]. При использовании для этих целей любых равновесных кодов, в частности 1/5-кода, требуется

анализ обнаруживающей способности кода в каждом из подмножеств. Если исходное разбиение множества выходов на подмножества не дает возможности 100%-ной идентификации одиночных неисправностей в блоке  $F(x)$ , то задачу построения системы контроля с обнаружением любых одиночных неисправностей можно решить двумя путями. Первый путь подразумевает преобразование подсхемы, реализующей функции конкретной «пятерки» выходов, в подсхему с монотонно независимыми выходами по известным алгоритмам [26]; второй – увеличение количества подмножеств выходов с использованием избыточных подмножеств, содержащих различные выходы из разных подмножеств.

Так или иначе, в схеме контроля для обеспечения свойства ее самопроверяемости требуется решить задачу формирования множества тестовых комбинаций для элементов блока логического дополнения и тестера 1/5-кода (1/5-TSC). Рассмотрим базовый подход, позволяющий определять функции логического дополнения таким образом, чтобы свойство самопроверяемости схемы контроля было гарантированно обеспечено.

### Базовый подход к вычислению функций логического дополнения

В основе способа построения системы функционального контроля с применением 1/5-кода лежит разбиение выходов объекта диагностирования на подмножества, состоящие из пяти выходов, каждому из которых соответствует некоторый информационный вектор длины  $m = 5$ . Для преобразования любого вектора данной длины в кодовое слово 1/5-кода требуется изменение значений максимум четырех разрядов информационного вектора. Другими словами, блок  $G(x)$  в схеме контроля должен вычислять только четыре функции логического дополнения, позволяющие преобразовать любой информационный вектор  $\langle f_5 f_4 f_3 f_2 f_1 \rangle$  в кодовое слово 1/5-кода  $\langle h_5 h_4 h_3 h_2 h_1 \rangle$  (рис. 3).

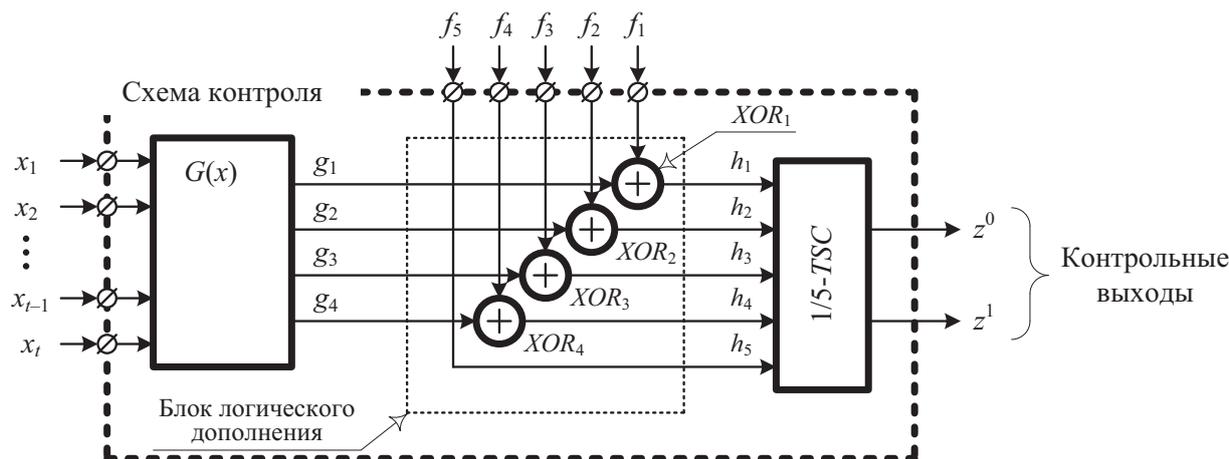


Рис. 3. Схема контроля по 1/5-коду

Функции логического дополнения  $g_1, g_2, g_3$  и  $g_4$  должны быть получены с учетом следующих соображений:

1) любой информационный вектор должен быть преобразован в кодовое слово 1/5-кода;

2) на входах 1/5-TSC (рис. 4) должны хотя бы по разу сформироваться все кодовые слова 1/5-кода: {00001; 00010; 00100; 01000; 10000} [24];

3) на входах каждого элемента сложения по модулю два в структуре блока логического дополнения должны хотя бы по разу сформироваться тестовые комбинации из множества {00; 01; 10; 11} [27].

Пусть не требуется доопределение функции  $f_5$ , и она сразу же подается на вход тестера:  $h_5 = f_5$ . Тогда на наборах  $\langle f_5 f_4 f_3 f_2 f_1 \rangle = \langle 1 \sim \sim \sim \rangle$  должно формироваться только одно кодовое слово 1/5-кода – 10 000. На остальных 16 наборах  $\langle f_5 f_4 f_3 f_2 f_1 \rangle = \langle 0 \sim \sim \sim \rangle$  должны образоваться остальные кодовые слова 1/5-кода. При этом должна быть обеспечена подача тестового множества для всех элементов сложения по модулю два в блоке логического дополнения. Следует отметить, что тестовые комбинации 00 и 11 для каждого элемента сложения по модулю два появляются на наборах  $\langle 1 \sim \sim \sim \rangle$ , что вытекает из формулы преобразования (1). Таким образом, задача доопределения функций имеет ограничения: 1) формирование хотя бы по разу векторов 1/5-кода 00001, 00010, 00100, 01000;

2) формирование хотя бы по разу тестовых комбинаций 01 и 10 для каждого из четырех элементов XOR.

Тестовая комбинация  $i$ -го элемента XOR  $\langle f_i g_i \rangle = \langle 01 \rangle$  будет образована тогда, когда исходный информационный вектор дополняется до вектора 1/5-кода, имеющего разряд  $h_i = 1$  и нулевые значения всех остальных разрядов. Другие же разряды информационного вектора дополняются значениями 0, если они были равны 0, и 1, если равны 1. Другими словами, остальные значения в информационном векторе, кроме  $f_i$ , преобразуются в нулевые значения разрядов вектора 1/5-кода. Аналогичная ситуация имеет место при формировании тестовой комбинации  $i$ -го элемента XOR  $\langle f_i g_i \rangle = \langle 10 \rangle$ . Таким образом, для образования обеих тестовых комбинаций  $\langle 01 \rangle$  и  $\langle 10 \rangle$  для  $i$ -го элемента XOR потребуется сформировать два раза один и тот же вектор 1/5-кода, имеющий единичное значение  $i$ -го разряда.

С учетом указанной особенности получена таблица истинности для преобразования информационных векторов в кодовые слова 1/5-кода. Функция  $g_5 = 0$  на всех информационных векторах, что позволяет заполнить вторую половину таблицы истинности автоматически: для информационных векторов  $\langle f_5 f_4 f_3 f_2 f_1 \rangle = \langle 1 \sim \sim \sim \rangle$ , значения функций логического дополнения  $g_i$  совпадают со значениями преобразуемых функций. Функции логического дополнения на информационных векторах

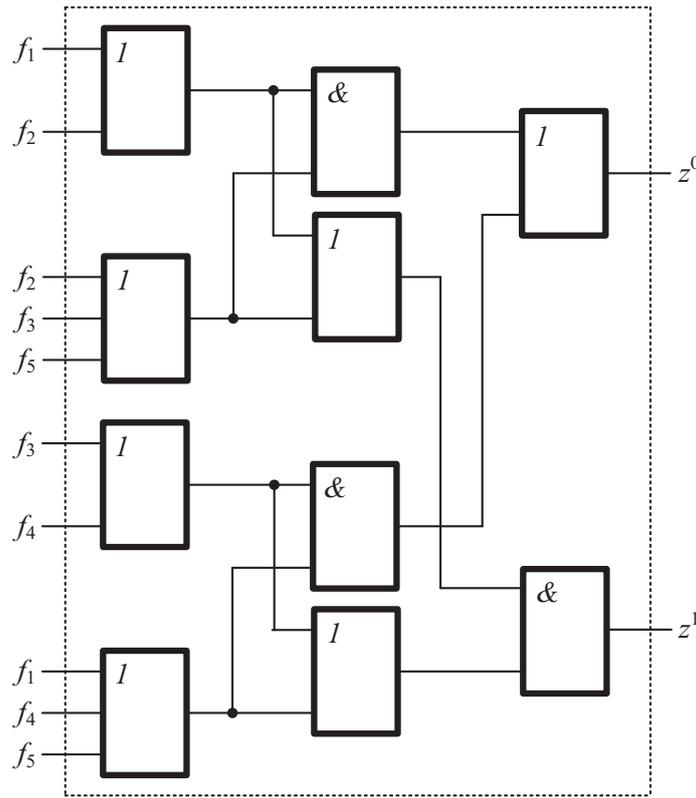


Рис. 4. Структурная схема 1/5-TSC

$\langle f_5, f_4, f_3, f_2, f_1 \rangle = \langle 0 \sim \sim \sim \sim \rangle$  получены с учетом обеспечения тестируемости блока логического дополнения и 1/5-TSC в схеме контроля.

Правила вычисления формул логического дополнения нетрудно формализовать. Из табл. 1 непосредственно следуют выражения, описывающие функции логического дополнения:

$$\begin{aligned}
 g_1 &= f_4 f_1 \vee f_3 f_1 \vee f_2 f_1 \vee \\
 &\vee f_5 f_1 \vee \overline{f_5 f_4 f_3} \vee \overline{f_5 f_3 f_2}, \\
 g_2 &= f_2 f_1 \vee f_5 f_2 \vee f_4 f_2 \vee f_3 f_2 \vee \\
 &\vee \overline{f_5 f_4 f_3 f_2} \vee \overline{f_5 f_4 f_3 f_1} \vee \overline{f_5 f_3 f_2 f_1}, \\
 g_3 &= \overline{f_4 f_3 f_1} \vee \overline{f_4 f_3 f_1} \vee f_5 f_3 \vee \\
 &\vee f_3 f_2 \vee \overline{f_5 f_4 f_3 f_2}, \\
 g_4 &= f_4 \overline{f_1} \vee f_5 f_4 \vee f_4 \overline{f_3 f_2} \vee \\
 &\vee \overline{f_5 f_3 f_2 f_1} \vee \overline{f_5 f_3 f_2 f_1}.
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

Блок контрольной логики в схеме контроля, реализованный по системе функций (2), будет проверяемым, что является важным в задаче

построения полностью самопроверяемых дискретных систем [4].

Таблица 1 – это один из множества способов преобразования информационных векторов в кодовые слова 1/5-кода. Он дает возможность образования каждого из кодовых слов 1/5-кода из подмножества {00001; 00010; 00100; 01000} при формировании на выходе блока  $F(x)$  четырех различных информационных векторов, а кодового слова 10000 – на шестнадцати информационных векторах из второй половины таблицы истинности –  $\langle 1 \sim \sim \sim \sim \rangle$ . Множество информационных векторов в табл. 2 разбито на пять подмножеств  $D_j, j = 1, 5$ , каждое из которых соответствует одному из кодовых слов 1/5-кода. В столбце записаны десятичные эквиваленты двоичных номеров информационных векторов, на которых формируется то или иное кодовое слово 1/5-кода.

Из табл. 2 вытекает первое необходимое условие обеспечения самопроверяемости схемы контроля.

ТАБЛИЦА 1. Правила преобразования рабочих функций

Десятичный эквивалент информационного вектора	Информационный вектор	Функции дополнения	Кодовое слово 1/5-кода
	$f_5 f_4 f_3 f_2 f_1$	$g_5 g_4 g_3 g_2 g_1$	$h_5 h_4 h_3 h_2 h_1$
$n_0$	00000	00010	00010
$n_1$	00001	00000	00001
$n_2$	00010	00000	00010
$n_3$	00011	01011	01000
$n_4$	00100	00101	00001
$n_5$	00101	01101	01000
$n_6$	00110	00111	00001
$n_7$	00111	00011	00100
$n_8$	01000	01010	00010
$n_9$	01001	00001	01000
$n_{10}$	01010	01110	00100
$n_{11}$	01011	01111	00100
$n_{12}$	01100	01101	00001
$n_{13}$	01101	01111	00010
$n_{14}$	01110	01010	00100
$n_{15}$	01111	00111	01000
$n_{16}$	10000	00000	10000
$n_{17}$	10001	00001	10000
$n_{18}$	10010	00010	10000
$n_{19}$	10011	00011	10000
$n_{20}$	10100	00100	10000
$n_{21}$	10101	00101	10000
$n_{22}$	10110	00110	10000
$n_{23}$	10111	00111	10000
$n_{24}$	11000	01000	10000
$n_{25}$	11001	01001	10000
$n_{26}$	11010	01010	10000
$n_{27}$	11011	01011	10000
$n_{28}$	11100	01100	10000
$n_{29}$	11101	01101	10000
$n_{30}$	11110	01110	10000
$n_{31}$	11111	01111	10000

ТАБЛИЦА 2. Распределения информационных векторов, появление которых гарантирует формирование соответствующего кодового слова 1/5-кода

Кодовые слова 1/5-кода				
00001	00010	00100	01000	10000
Информационные векторы, на которых формируется соответствующее кодовое слово 1/5-кода				
$D_1$	$D_2$	$D_3$	$D_4$	$D_5$
$n_1, n_4, n_6, n_{12}$	$n_0, n_2, n_8, n_{13}$	$n_7, n_{10}, n_{11}, n_{14}$	$n_3, n_5, n_9, n_{15}$	$n_{16} - n_{31}$

**Утверждение 1.** Полная проверка 1/5-TSC обеспечивается при условии формирования на выходах объекта диагностирования множества информационных векторов  $W$  такого, что

$$W \cap D_i \neq \emptyset, \quad i = \overline{1,4}. \quad (3)$$

Условие (3) не является жестким и требует формирования как минимум пяти информационных векторов. Однако помимо проверки тестера в схеме контроля нужно обеспечить полную проверку блока логического дополнения.

Аналогично табл. 2 могут быть составлены таблицы, в которых для каждого элемента XOR в схеме контроля перечислены информационные векторы, формирование которых необходимо для обеспечения поступления на его входы соответствующей тестовой комбинации. В табл. 3–6 для элементов  $XOR_1$ ,  $XOR_2$ ,  $XOR_3$  и  $XOR_4$  представлены разбиения всех информационных векторов на подмножества  $V_{1,1} - V_{1,4}$ ,  $V_{2,1} - V_{2,4}$ ,  $V_{3,1} - V_{3,4}$ ,  $V_{4,1} - V_{4,4}$  (первая цифра – номер элемента XOR, вторая – номер тестовой комбинации из множества  $\{00; 01; 10; 11\}$ ).

**Утверждение 2.** Полная проверка блока логического дополнения в схеме контроля по 1/5-коду обеспечивается при условии формирования на выходах объекта диагностирования множества информационных векторов  $W$  такого, что

$$W \cap V_{1,i} \neq \emptyset, \quad W \cap V_{2,i} \neq \emptyset, \quad W \cap V_{3,i} \neq \emptyset, \\ W \cap V_{4,i} \neq \emptyset, \quad i = \overline{1,4}. \quad (4)$$

Ограничение (4) более жесткое, чем ограничение (3). Из анализа табл. 3–6 следует, что для

полной проверки блока логического дополнения должно быть сформировано минимум восемь информационных векторов на выходах объекта диагностирования, например информационные векторы из подмножества  $\{n_1, n_2, n_3, n_4, n_7, n_8, n_9, n_{10}\}$ . Появление всех векторов из указанного подмножества также гарантирует образование четырех кодовых слов 1/5-кода из подмножества  $\{00001; 00010; 00100; 01000\}$ . Один из 16 векторов  $n_{16} - n_{31}$  обеспечивает появление кодового слова  $\langle 10000 \rangle$ . Таким образом, справедливо следующее положение.

**Утверждение 3.** Минимальное количество информационных векторов, которые должны быть сформированы на выходах объекта диагностирования для обеспечения свойства полной самопроверяемости схемы контроля, равно девяти.

Другими словами, необходимо формирование 9 из 32 возможных информационных векторов, что составляет 28,125% полного множества информационных векторов. Для примера, при использовании в качестве основы системы контроля 1/4-кода потребуются как минимум 7 векторов из 16 возможных, что составляет 43,75% полного множества информационных векторов [28]. Таким образом, сформировать контрольное множество информационных векторов для случая использования 1/5-кода оказывается более простым, чем, например, 1/4-кода.

## Заключение

Для организации контроля логических схем автоматики и вычислительной техники

ТАБЛИЦА 3. Распределения информационных векторов, появление которых гарантирует формирование соответствующей тестовой комбинации для  $XOR_1$ 

Тестовые комбинации			
00	01	10	11
Информационные векторы, на которых формируются соответствующие комбинации			
$V_{1,1}$	$V_{1,2}$	$V_{1,3}$	$V_{1,4}$
$n_0, n_2, n_8, n_{10}, n_{14},$ $n_{16}, n_{18}, n_{20}, n_{22}, n_{24},$ $n_{26}, n_{28}, n_{30}$	$n_4, n_6, n_{12}$	$n_1$	$n_3, n_5, n_7, n_9, n_{11},$ $n_{13}, n_{15}, n_{17}, n_{19}, n_{21},$ $n_{23}, n_{25}, n_{27}, n_{29}, n_{31}$

ТАБЛИЦА 4. Распределения информационных векторов, появление которых гарантирует формирование соответствующей тестовой комбинации для  $XOR_2$ 

Тестовые комбинации			
00	01	10	11
Информационные векторы, на которых формируются соответствующие комбинации			
$V_{2,1}$	$V_{2,2}$	$V_{2,3}$	$V_{2,4}$
$n_1, n_4, n_5, n_9, n_{12},$ $n_{16}, n_{17}, n_{20}, n_{21},$ $n_{24}, n_{25}, n_{28}, n_{29}$	$n_0, n_8, n_{13}$	$n_2$	$n_3, n_6, n_7, n_{10}, n_{11}, n_{14},$ $n_{15},$ $n_{18}, n_{19}, n_{22}, n_{23},$ $n_{26}, n_{27}, n_{30}, n_{31}$

ТАБЛИЦА 5. Распределения информационных векторов, появление которых гарантирует формирование соответствующей тестовой комбинации для  $XOR_3$ 

Тестовые комбинации			
00	01	10	11
Информационные векторы, на которых формируются соответствующие комбинации			
$V_{3,1}$	$V_{3,2}$	$V_{3,3}$	$V_{3,4}$
$n_0, n_1, n_2, n_3, n_8, n_9,$ $n_{16}, n_{17}, n_{18}, n_{19},$ $n_{24}, n_{25}, n_{26}, n_{27}$	$n_{10}, n_{11}$	$n_7, n_{14}$	$n_4, n_5, n_6, n_{12}, n_{13}, n_{15},$ $n_{20}, n_{21}, n_{22}, n_{23},$ $n_{28}, n_{29}, n_{30}, n_{31}$

ТАБЛИЦА 6. Распределения информационных векторов, появление которых гарантирует формирование соответствующей тестовой комбинации для  $XOR_4$ 

Тестовые комбинации			
00	01	10	11
Информационные векторы, на которых формируются соответствующие комбинации			
$V_{4,1}$	$V_{4,2}$	$V_{4,3}$	$V_{4,4}$
$n_0, n_1, n_2, n_4, n_6, n_7,$ $n_{16}, n_{17}, n_{18}, n_{19},$ $n_{20}, n_{21}, n_{22}, n_{23}$	$n_3, n_5$	$n_9, n_{15}$	$n_8, n_{10}, n_{11}, n_{12}, n_{13}, n_{14},$ $n_{28}, n_{29}, n_{30}, n_{31},$ $n_{24}, n_{25}, n_{26}, n_{27}$

на основе метода логического дополнения может эффективно применяться 1/5-код. Предложенный способ расчета функций логического дополнения позволяет не только обеспечить самопроверяемость блока логического дополнения и тестера, но и построить проверяемый блок контрольной логики. Кроме того, показано, что для обеспечения самопроверяемости схемы контроля в системе диагностирования требуется сформировать на выходах объекта диагностирования 9 из 32 возможных информационных векторов (28,125 % полного множества информационных векторов). Если же для реального логического устройства это сделать не удастся, может быть произведена перестановка выходов к контролируемой «пятерке» либо же применена модификация схемы контроля путем внесения в блок логического дополнения пятого элемента *XOR* и изменения правил вычисления функций логического дополнения.

Использование равновесного 1/5-кода при организации систем функционального контроля, по нашему мнению, перспективно, а идеи, реализованные в данной статье, могут быть применены наравне с известными идеями при организации систем функционального контроля на основе метода логического дополнения. При этом для каждого логического устройства создается возможность выбора наилучшего способа реализации с учетом, например, наименьших аппаратных затрат.

### Библиографический список

1. Согомоян Е. С. Самопроверяемые устройства и отказоустойчивые системы / Е. С. Согомоян, Е. В. Слабаков. – М. : Радио и связь, 1989. – 207 с.
2. Сапожников В. В. Методы построения безопасных микроэлектронных систем железнодорожной автоматики / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Х. А. Христов, Д. В. Гавзов ; под ред. Вл. В. Сапожникова. – М. : Транспорт, 1995. – 272 с.
3. Ubar R. Design and Test Technology for Dependable Systems-on-Chip (Premier Reference So-

urce) / R. Ubar, J. Raik, H.-T. Vierhaus. – Information Science Reference. – Hershey ; New York : IGI Global, 2011. – 578 p.

4. Пархоменко П. П. Основы технической диагностики (оптимизация алгоритмов диагностирования, аппаратурные средства) / П. П. Пархоменко, Е. С. Согомоян. – М. : Энергоатомиздат, 1981. – 320 с.

5. Nicolaidis M. On-Line Testing for VLSI – A Compendium of Approaches / M. Nicolaidis, Y. Zorian // Journal of Electronic Testing: Theory and Applications. – 1998. – Vol. 12, issue 1–2. – P. 7–20.

6. Mitra S. Which Concurrent Error Detection Scheme to Choose? / S. Mitra, E. J. McCluskey // Proceedings of International Test Conference, 2000. – Atlantic City, USA, 03–05 October 2000. – P. 985–994. – DOI: 10.1109/TEST.2000.894311.

7. Fujiwara E. Code Design for Dependable Systems : Theory and Practical Applications / E. Fujiwara. – New York ; London et al. : John Wiley & Sons, 2006. – 720 p.

8. Piestrak S. J. Design of Self-Testing Checkers for Unidirectional Error Detecting Codes / S. J. Piestrak. – Wrocław : Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 1995. – 111 p.

9. Дрозд А. В. Рабочее диагностирование безопасных информационно-управляющих систем / А. В. Дрозд, В. С. Харченко, С. Г. Антошук, Ю. В. Дрозд, М. А. Дрозд, Ю. Ю. Сулима ; под ред. А. В. Дрозда, В. С. Харченко. – Харьков : Нац. аэрокосмич. ун-т имени Н. Е. Жуковского «ХАИ», 2012. – 614 с.

10. Kharchenko V. Green IT Engineering : Concepts, Models, Complex Systems Architectures / V. Kharchenko, Yu. Kondratenko, J. Kasprzyk. – Springer Book series “Studies in Systems, Decision and Control”. – Berlin et al., 2017. – Vol. 74. – 305 p. – DOI: 10.1007/978-3-319-44162-7.

11. Ефанов Д. В. О свойствах кода с суммированием в схемах функционального контроля / Д. В. Ефанов, В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников // Автоматика и телемеханика. – 2010. – № 6. – С. 155–162.

12. Сапожников В. В. Организация функционального контроля комбинационных схем методом логического дополнения / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, А. В. Дмитриев, А. В. Морозов,

М. Гессель // Электронное моделирование. – 2002. – Т. 24, № 6. – С. 51–66.

13. Gorshe S. S. A Self-Checking ALU Design with Efficient Codes / S. S. Gorshe, B. Bose // Proceedings of 14<sup>th</sup> VLSI Test Symposium. – Princeton, USA, 1996. – P. 157–161.

14. Das D. Weight-Based Codes and Their Application to Concurrent Error Detection of Multilevel Circuits / D. Das, N. A. Toubia // Proceedings of the 17<sup>th</sup> IEEE VLSI Test Symposium, Dana Point, USA, CA, April 25–29, 1999. – P. 370–376.

15. Гессель М. Логическое дополнение – новый метод контроля комбинационных схем / М. Гессель, А. В. Морозов, В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников // Автоматика и телемеханика. – 2003. – № 1. – С. 167–176.

16. Гессель М. Контроль комбинационных схем методом логического дополнения / М. Гессель, А. В. Морозов, В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников // Автоматика и телемеханика. – 2005. – № 8. – С. 161–172.

17. Сапожников В. В. Построение самопроверяемых структур систем функционального контроля на основе равновесного кода «2 из 4» / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов // Проблемы управления. – 2017. – № 1. – С. 57–64.

18. Göessel M. A New Method for Concurrent Checking by Use of a 1-out-of-4 Code / M. Göessel, Vl. Sapozhnikov, V. Sapozhnikov, A. Dmitriev // Proceedings of the 6<sup>th</sup> IEEE International On-line Testing Workshop, 3–5 July 2000. – Palma de Mallorca, Spain, 2000. – P. 147–152.

19. Sapozhnikov V. V. Design of Totally Self-Checking Combinational Circuits by Use of Complementary Circuits / V. V. Sapozhnikov, Vl. V. Sapozhnikov, A. Morozov, G. Osadtschi, M. Gössel // Proceedings of East-West Design & Test Workshop. – Yalta, Ukraine, 2004. – P. 83–87.

20. Göessel M. New Methods of Concurrent Checking : Edition 1 / M. Göessel, V. Ocheretny, E. Sogomonyan, D. Marienfeld. – Dordrecht : Springer Science+Business Media B. V., 2008. – 184 p.

21. Das D. K. Constraint Don't Cares for Optimizing Designs for Concurrent Checking by 1-out-of-3 Codes / D. K. Das, S. S. Roy, A. Dmitriev, A. Morozov, M. Gössel // Proceedings of the 10<sup>th</sup> International

Workshops on Boolean Problems. – Freiberg, Germany, September 2012. – P. 33–40.

22. Efanov D. Methods of Organization of Totally Self-Checking Concurrent Error Detection System on the Basis of Constant-Weight «1-out-of-3»-Code / D. Efanov, V. Sapozhnikov, Vl. Sapozhnikov // Proceedings of 14<sup>th</sup> IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2016). – Yerevan, Armenia, October 14–17, 2016. – P. 117–125. – DOI: 10.1109/EWDTS.2016.7807622.

23. Сапожников В. В. Метод функционального контроля комбинационных логических устройств на основе кода «2 из 4» / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов // Изв. вузов. Приборостроение. – 2016. – Т. 59, № 7. – С. 524–533. – DOI: 10.17586/0021-3454-2016-59-7-524-533.

24. Сапожников В. В. Универсальный алгоритм синтеза 1/n-тестеров / В. В. Сапожников, В. Рабара // Проблемы передачи информации. – 1982. – Т. 18, № 3. – С. 62–73.

25. Huches J. L. A. Design of Totally Self-Checking Comparators with an Arbitrary Number of Inputs / J. L. A. Huches, E. J. McCluskey, D. J. Lu // IEEE Transactions on Computers. – 1984. – Vol. C-33, N 6. – P. 546–550.

26. Morosov A. Self-Checking Combinational Circuits with Unidirectionally Independent Outputs / A. Morosov, V. V. Sapozhnikov, Vl. V. Sapozhnikov, M. Göessel // VLSI Design. – 1998. – Vol. 5, issue 4. – P. 333–345.

27. Аксёнова Г. П. Необходимые и достаточные условия построения полностью проверяемых схем свертки по модулю 2 / Г. П. Аксёнова // Автоматика и телемеханика. – 1979. – № 9. – С. 126–135.

28. Сапожников В. В. Метод логического дополнения на основе равновесного кода «1 из 4» для построения полностью самопроверяемых структур систем функционального контроля / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов, Д. В. Пивоваров // Электронное моделирование. – 2017. – Т. 39, № 2. – С. 15–34.

## References

1. Sogomyan Y. S. & Slabakov Y. V. *Samoproveryayemye ustroystva i otkazoustoychivyye systemy* [Self-

- testing checkers and fault-tolerant systems*]. Moscow, Radio and communications Publ., 1989, 207 p. (In Russian)
2. Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov VI.V., Chrystov K.A. & Gavzov D.V. *Metody postroyeniya bezopasnykh mikroelektronnykh system zheleznodorozhnoy avtomatyky [Methods of designing safe micro-electronic systems of railroad automatics]*. Moscow, Transport Publ., 1995, 272 p. (In Russian)
  3. Ubar R., Raik J. & Vierhaus H.-T. *Design and Test Technology for Dependable Systems-on-Chip (Premier Reference Source). Information Science Reference*. Hershey, New York, IGI Global Publ., 2011, 578 p.
  4. Parkhomenko P.P. & Sogomyan Y.S. *Osnovy tekhnicheskoy diagnostiky (optymyzatsiya algoritmov diagnostirovaniya, apparaturnye sredstva) [Technical diagnostics' fundamentals (diagnosing algorithms' optimization)]*. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1981, 320 p. (In Russian)
  5. Nicolaidis M. & Zorian Y. On-Line Testing for VLSI – A Compendium of Approaches. *Journal of Electronic Testing: Theory and Applications*, 1998, vol. 12, issue 1–2, pp. 7–20.
  6. Mitra S. & McCluskey E. J. Which Concurrent Error Detection Scheme to Choose? *Proceedings of International Test Conference*, 2000, 03–05 October 2000, pp. 985–994.
  7. Fujiwara E. *Code Design for Dependable Systems: Theory and Practical Applications*. New York, London et al., John Wiley & Sons Publ., 2006, 720 p.
  8. Piestrak S.J. *Design of Self-Testing Checkers for Unidirectional Error Detecting Codes*. Wrocław, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej Publ., 1995, 111 p.
  9. Drozd A. V., Kharchenko V.S., Antoshuk S.G., Drozd M.A. & Sulyma Y.Y. *Rabocheye diagnostirovaniye bezopasnykh informatsionno-upravlyayushykh system [Operational diagnostics of safe information management systems]*. Khar'kov, Zhukovsky N.Y. National Aerospace University Publ., 2012, 614 p. (In Russian)
  10. Kharchenko V., Kondratenko Yu. & Kacprzyk J. Green IT Engineering: Concepts, Models, complex systems architectures. *Springer Book series "Studies in Systems, Decision and Control"*, 2017, vol. 74, 305 p.
  11. Efanov D. V., Sapozhnikov V.V. & Sapozhnikov VI.V. O svoistvakh koda s summyrovaniyem v skhemakh funktsionalnogo kontrolya [On summation code properties in concurrent error detection circuits]. *Automatics and telemechanics*, 2010, no. 6, pp. 155–162. (In Russian)
  12. Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov VI.V., Dmytriyev A. V., Morozov A. V. & Gessel M. Organizatsiya funktsionalnogo kontrolya kombynatsionnykh skhem metodom logicheskogo dopolneniya [Concurrent error detection of combinational circuits organizing by means of Boolean complement method]. *Electronic simulation*, 2002, vol. 24, no. 6, pp. 51–66. (In Russian)
  13. Gorshe S.S. & Bose B. A Self-Checking ALU Design with Efficient Codes. *Proceedings of 14<sup>th</sup> VLSI Test Symposium*. Princeton, USA, 1996, pp. 157–161.
  14. Das D. & Touba N.A. Weight-Based Codes and Their Application to Concurrent Error Detection of Multilevel Circuits. *Proceedings of the 17<sup>th</sup> IEEE VLSI Test Symposium*, USA, CA, Dana Point, April 25–29, 1999, pp. 370–376.
  15. Gessel M., Morozov A. V., Sapozhnikov V.V. & Sapozhnikov VI.V. Logicheskoye dopolneniye – noviy metod kontrolya kombynatsionnykh skhem [Boolean complement – the new method of checking combinational circuits]. *Automatics and telemechanics*, 2003, no. 1, pp. 167–176. (In Russian)
  16. Gessel M., Morozov A. V., Sapozhnikov V.V. & Sapozhnikov VI.V. Kontrol kombinatsionnykh skhem metodom logicheskogo dopolneniya [Combinational circuits' check by means of Boolean component method]. *Automatics and telemechanics*, 2005, no. 8, pp. 161–172. (In Russian)
  17. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov VI.V. & Efanov D. V. Postroyeniye samoproveryayemykh struktur system funktsionalnogo kontrolya na osnove ravnovesnogo koda "2 iz 4" [Self-checking concurrent error detection systems' construction by use of a 2-out-of-4 code]. *Problemy upravleniya [Control issues]*, 2017, no. 1, pp. 57–64. (In Russian)
  18. Göessel M., Saposhnikov VI., Saposhnikov V. & Dmitriev A. A New Method for Concurrent Checking by Use of a 1-out-of-4 Code. *Proceedings of the 6<sup>th</sup> IEEE International On-line Testing Workshop*, 3–5 July 2000. Palma de Mallorca, Spain, 2000, pp. 147–152.

19. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. V., Morozov A., Osadtchi G. & Gössel M. Design of Totally Self-Checking Combinational Circuits by Use of Complementary Circuits. *Proceedings of East-West Design & Test Workshop*. Yalta, Ukraine, 2004, pp. 83–87.
20. Gössel M., Ocheretny V., Sogomonyan E. & Marienfeld D. *New Methods of Concurrent Checking*. Ed. 1. Dordrecht, Springer Science+Business Media B. V. Publ., 2008, 184 p.
21. Das D. K., Roy S. S., Dmitiriev A., Morozov A. & Gössel M. Constraint Doesn't Care for Optimizing Designs for Concurrent Checking by 1-out-of-3 Codes. *Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Workshops on Boolean Problems*. Freiberg, Germany, September, 2012, pp. 33–40.
22. Efanov D., Sapozhnikov V. V. & Sapozhnikov V. V. Methods of Organization of Totally Self-Checking Concurrent Error Detection System on the Basis of Constant-Weight «1-out-of-3»-Code. *Proceedings of 14<sup>th</sup> IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2016)*. Yerevan, Armenia, October 14–17, 2016, pp. 117–125.
23. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. V. & Efanov D. V. Metod funktsionalnogo kontrolya kombinatsionnykh logicheskikh ustroystv na osnove koda «2 iz 4» [Concurrent error detection method of combinational logical units by use of 1-out-of-4 code]. *News of higher educational institutions. Instrument engineering*, 2016, vol. 59, no. 7, pp. 524–533. (In Russian)
24. Sapozhnikov V. V. & Rabara V. Universalnyi algoritm synteza 1/n-testerov [Universal algorithm for 1/n-testers synthesis]. *Problemy peredachy informatsii [The issues of information transmission]*, 1982, vol. 18, no. 3, pp. 62–73. (In Russian)
25. Huches J. L. A., McCluskey E. J. & Lu D. J. Design of Totally Self-Checking Comparators with an Arbitrary Number of Inputs. *IEEE Transactions on Computers*, 1984, vol. C-33, no. 6, pp. 546–550.
26. Morosov A., Sapozhnikov V., Sapozhnikov V. & Gössel M. Self-checking combinational circuits with unidirectionally independent outputs. *VLSI Design*, 1998, vol. 5, issue 4, pp. 333–345.
27. Aksyenova G. P. Neobkhodymiye i dostatochniye usloviya postroyeniya polnostju proveryayemykh skhem svertky po modulyu 2 [The necessary and sufficient conditions for constructing totally self-checking convolution by modulo 2]. *Automatics and telemechanics*, 1979, no. 9, pp. 126–135. (In Russian)
28. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. V. & Efanov D. V. & Pyvovarov D. V. Metod logicheskogo dopolneniya na osnove ravnovesnogo koda «1 iz 4» dlya postroyeniya polnostju samoproveryemykh struktur system funktsionalnogo kontrolya [Method of Boolean complement on the basis of 1-out of-4 equilibrium code for fully self-checking structures of concurrent error detection systems construction]. *Electronic simulation*, 2017, vol. 39, no. 2, pp. 15–34. (In Russian)

САПОЖНИКОВ Валерий Владимирович – доктор техн. наук, профессор, port.at.pgups1@gmail.com; САПОЖНИКОВ Владимир Владимирович – доктор техн. наук, профессор, at.pgups@gmail.com; \*ЕФАНОВ Дмитрий Викторович – канд. техн. наук, доцент, TrES-4b@yandex.ru; ПИВОВАРОВ Дмитрий Вячеславович – аспирант, pivovarov.d.v.spb@gmail.com (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 004.896+656:25

**Д. В. Седых, С. В. Белоусов, М. Н. Василенко****АВТОМАТИЗАЦИЯ СОСТАВЛЕНИЯ ИНСТРУКЦИЙ  
ПО ПОЛЬЗОВАНИЮ УСТРОЙСТВАМИ СИГНАЛИЗАЦИИ,  
ЦЕНТРАЛИЗАЦИИ И БЛОКИРОВКИ**

Дата поступления: 25.03.2017

Решение о публикации: 24.04.2017

**Аннотация**

**Цель:** Исследование формирования инструкций по пользованию устройствами и методов его автоматизации. **Методы:** Применяются методы теории информации, а также теории графов для представления технической документации в электронном виде. **Результаты:** Проанализирована текущая практика формирования инструкций по пользованию устройствами сигнализации, централизации и блокировки (СЦБ). Рассмотрены основные этапы разработки новых инструкций, а также особенности порядка согласования инструкций по пользованию устройствами СЦБ для отдельных видов станций. Описаны причины возникновения ошибок при создании инструкций. Проанализированы предпосылки к автоматизации процесса формирования инструкций. Отдельно обсужден вопрос доступа к информации из документации в отраслевом формате. Разработаны алгоритмы автоматизированного построения инструкций по пользованию устройствами СЦБ. Охарактеризована работа модуля автоматизации формирования инструкций. **Практическая значимость:** Применение предложенного модуля позволяет решить существующие проблемы ручного формирования инструкций и снизить затраты на содержание технической документации устройств СЦБ. Описаны проблемы текущего подхода к формированию инструкций по пользованию устройствами СЦБ. Предложены методы их автоматизации, которые комплексно позволят выйти на новый уровень безопасности применения современных подходов к проектированию и ведению технической документации.

**Ключевые слова:** Электронный документооборот, ОФ-ТД, КЗ АРМ-ВТД, техническая документация.

\* **Dmitriy V. Sedykh**, engineer, sedyhdmitriy@gmail.com; **Sergey V. Belousov**, postgraduate student, bsv992@gmail.com; **Mikhail N. Vasilenko**, D. Sci., professor, vasilenko.m.n@gmail.com (Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University) AUTOMATION OF INSTRUCTION SHEETS ON ATTENTION DEVICES AND SIGNALING CIRCUITS COMPILATION

**Summary**

**Objective:** To study the compilation of instruction sheets on devices and methods of its automation. **Methods:** Methods of information theory were applied, as well as graph theory in order to present technical documentation in electronic form. **Results:** Current experience of compiling instruction sheets on attention devices and signaling circuits (ADSC) was analyzed. The main steps of new instructions elaboration were considered, as well as the specificities of approval procedure of instruction sheets on ADSC devices. The causes of error occurrence in the process of instruction sheets compilation were described in the article. Prerequisites for automation of instructions compiling process were analyzed. The issue of access to documentation data in branch format was discussed separately. Algorithms of automated compilation of instruction sheets on ADSC devices were developed. The functioning of automation module of instructions' compilation was described. **Practical importance:** Application of the

module proposed in the article allows for the solution of manual instructions' compilation problems and the reduction of expenses on technical documentation maintenance of ADSC devices. The problems of current approach to compilation of instruction sheets on ADSC devices were described. The automation methods were suggested, the former will make it possible to move to a new level of application safety of modern approaches to planning and maintaining of technical documentation.

**Keywords:** Electronic document management, branch format of technical documentation (OF-TD), task complex on automated work place- technical documentation management (KZ ARM-VTD), technical documentation

## Введение

В соответствии с требованиями Правил технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации дистанции сигнализации, централизации и блокировки (СЦБ) должны иметь техническую документацию на эксплуатируемые устройства СЦБ, устройства механизации и автоматизации сортировочных горок и другие обслуживаемые устройства. Отделы технической документации дистанций, а также проектные организации и службы железных дорог применяют комплекс задач автоматизированного рабочего места ведения технической документации (КЗ АРМ-ВТД). КЗ АРМ-ВТД предназначается для формирования и ведения баз данных технической документации [1–5]. Документация может быть взята в электронном виде или получена методами распознавания технической документации [6–8], а также после интеллектуальной корректировки распознавания [9].

Разработка инструкций о порядке пользования устройствами и системами СЦБ яв-

ляется основной из работ по содержанию технической документации с применением АРМ-ВТД [10]. Инструкция о порядке пользования устройствами СЦБ (далее Инструкция) служит приложением к техническо-распорядительному акту и руководством для действия работников, связанных с обслуживанием и использованием СЦБ.

## Анализ существующей практики формирования Инструкции по пользованию устройствами СЦБ

Разработка Инструкции состоит из следующих этапов (рис. 1):

- 1) сбор информации;
- 2) оформление содержательной части;
- 3) утверждение Инструкции.

Сложность этапа сбора информации заключается в подборке информации, привязанной к конкретному объекту (схематический план, двухниточный план, таблица взаимозависимости и т. д.), например уточнение описания

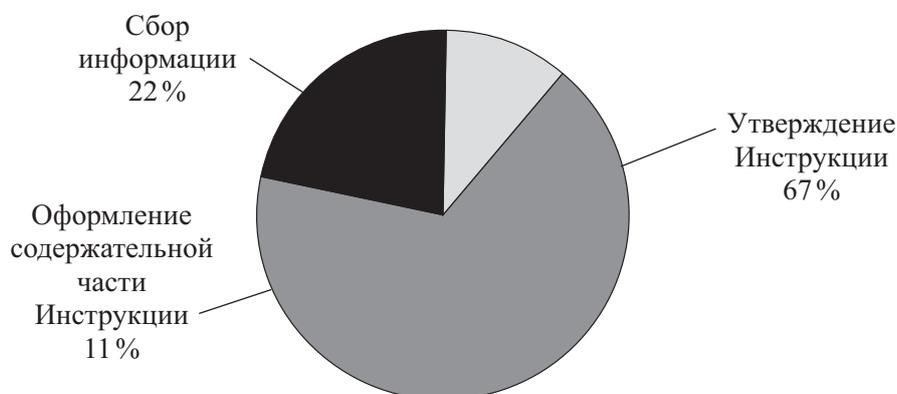


Рис. 1. Диаграмма процентного соотношения затрат времени на составление Инструкции

кнопок, коммутаторов, средств визуального и звукового контроля аппарата управления, наименований и обозначений на пульт-табло и пультах-манипуляторах, ординат светофоров и стрелок, алгоритмов действия дежурного по станции (ДСП), учет соответствия всем нормативным документам и др. Время на сбор информации составляет около 1 месяца.

Содержательная часть Инструкции оформляется в виде интерактивного электронного

документа. Сложность заключается в правильном описании (построении фраз) и анализе нюансов. Время на оформление содержательной части составляет около 2 недель.

Утверждение Инструкции занимает большой промежуток времени (до 2–3 месяцев), так как состоит из нескольких этапов. На каждом этапе Инструкция согласовывается и утверждается. Схемы согласования и утверждения приведены на рис. 2 и 3.



Рис. 2. Схема согласования и утверждения документов типа «Инструкция по пользованию устройствами автоматики и телемеханики для сортировочных, участковых, пассажирских и грузовых станций»

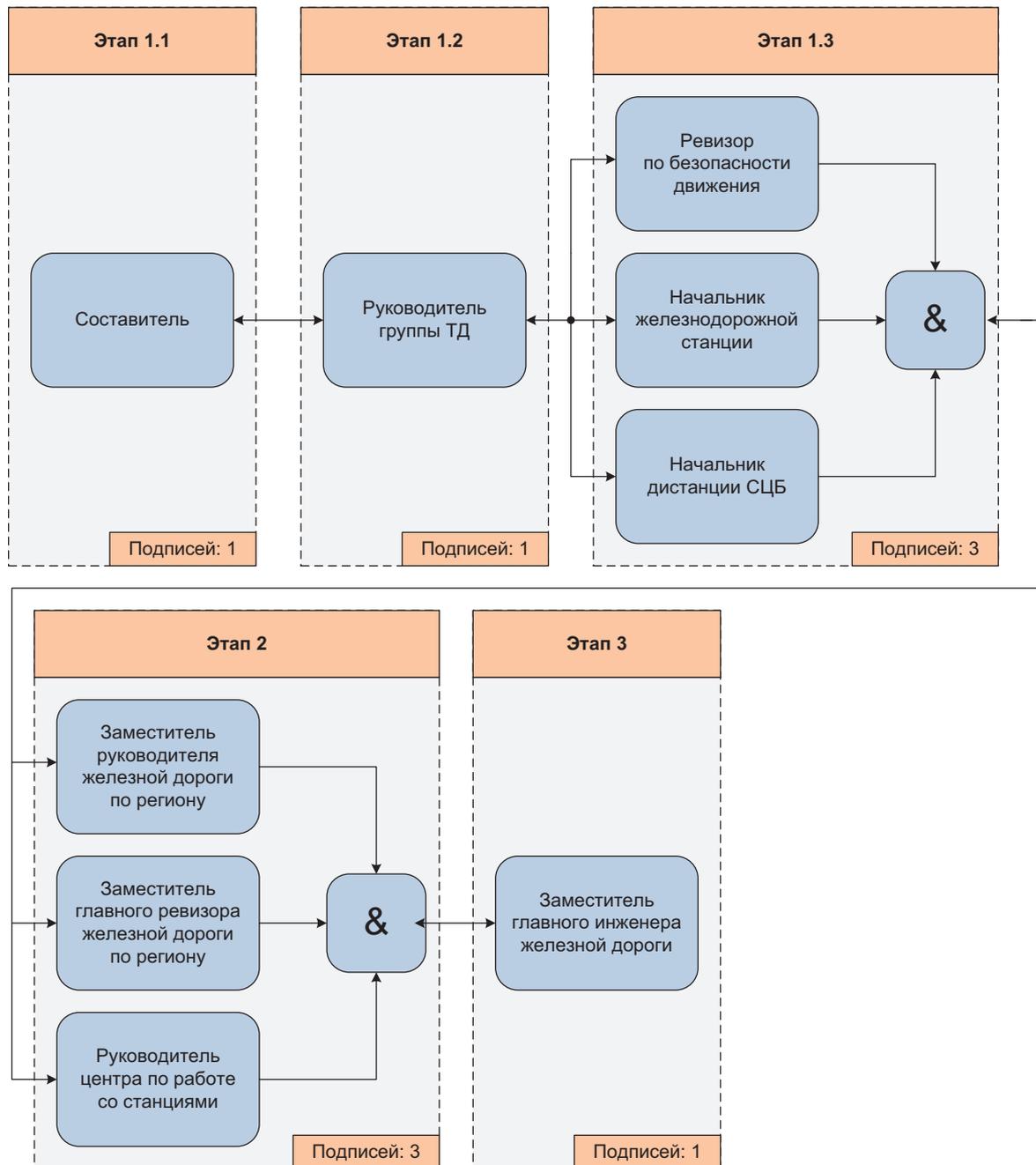


Рис. 3. Схема согласования и утверждения документов типа «Инструкция по пользованию устройствами автоматики и телемеханики»

**Автоматизация формирования Инструкции по пользованию устройствами СЦБ с помощью КЗ АРМ-ВТД**

Принципы составления инструкций по пользованию устройствами СЦБ позволяют в

значительной степени автоматизировать формирование инструкций. В настоящее время инструкции по пользованию устройствами СЦБ формируются вручную средствами MS Office. Ввиду большого объема инструкций составитель тратит значительное время на ввод однотипного содержимого для каждой ин-

струкции, что приводит к большим временным затратам. Часто составитель имеет набор уже составленных инструкций и с целью сокращения времени переносит часть содержимого в формируемую инструкцию из ранее составленной. Такое действие влечет возможность «по неосторожности» допустить ошибки. Полученная инструкция, как правило, хранится в неформализованном формате MS Office, что делает невозможным ее использование в различных системах автоматизации.

Другой важнейшей предпосылкой автоматизации является наличие на дорогах документации в формате отраслевого формата технической документации (ОФ-ТД) СЦБ [11–13]. Документация в ОФ-ТД СЦБ имеет формализованное представление [14, 15], что позволит максимально автоматизировать составление инструкций.

КЗ АРМ-ВТД дает возможность иметь полный доступ к документации в ОФ-ТД СЦБ и с помощью созданных локальных баз данных выводить информацию из свойств элементов схематического плана и двухниточного плана станции для формализации Инструкции. Из схематического плана станции выбирается следующая информация:

- о светофорах;
- о стрелках;
- о переездах.

Двухниточный план станции [16, 17] является основным документом по оборудованию станции рельсовыми цепями и размещению путевого оборудования электрической централизации. Из двухниточного плана станции выбирается информация:

- о рельсовых цепях;
- о роде тока и используемой частоте;
- о расположении и принципе действия устройств.

Алгоритмическое описание Инструкции по пользованию устройств СЦБ создается для реализации прикладной программы формализации Инструкции [18]. В основу разработки алгоритмов положен системный принцип «сверху вниз», т. е. от общих про-

блем к конкретным деталям. Это объясняется тем, что даже для относительно простых станций и перегонов трудно составить алгоритм, охватывающий все детали Инструкции по пользованию СЦБ. При разработке алгоритма автоматизации составления Инструкции можно выделить два основных уровня детализации: концептуальный и функциональный.

В блок-схеме алгоритма все операции подразделяются на функциональные и логические. Функциональные операторы <ФО> осуществляют непосредственное преобразование информации, логические операторы <ЛО> определяют направление выполнения операторов алгоритма. На схеме <ФО> изображается в виде прямоугольника, <ЛО> – в виде ромба.

Концептуальная блок-схема алгоритма содержит общие положения (требования), показывающие, что именно должно выводиться. Она разработана как связанный набор крупных модулей, определяющих последовательность и содержание данных.

Концептуальная блок-схема алгоритма составления Инструкции предусматривает обращение к базе данных. При этом определяются станция <ФО2>, общие сведения об устройствах <ФО3>, аппарате управления и контроля <ФО4>, действиях по приему, отправлению, маневровой работе <ФО4> и т. д.

Функциональная блок-схема алгоритма показывает подробный вывод информации. Она представляет собой детализацию модулей концептуальной схемы (рис. 4).

Пример фрагмента создания функциональной блок-схемы алгоритма для определения объекта и электрической централизации на станции представлен на рис. 5.

В процессе реализации алгоритма выводится наименование станции <ФО2>, выбираются система электрической централизации <ФО3> и типовая альбома электрической централизации <ФО4> из баз коллективного пользования. Для выбора элементной базы создается локальная база данных.

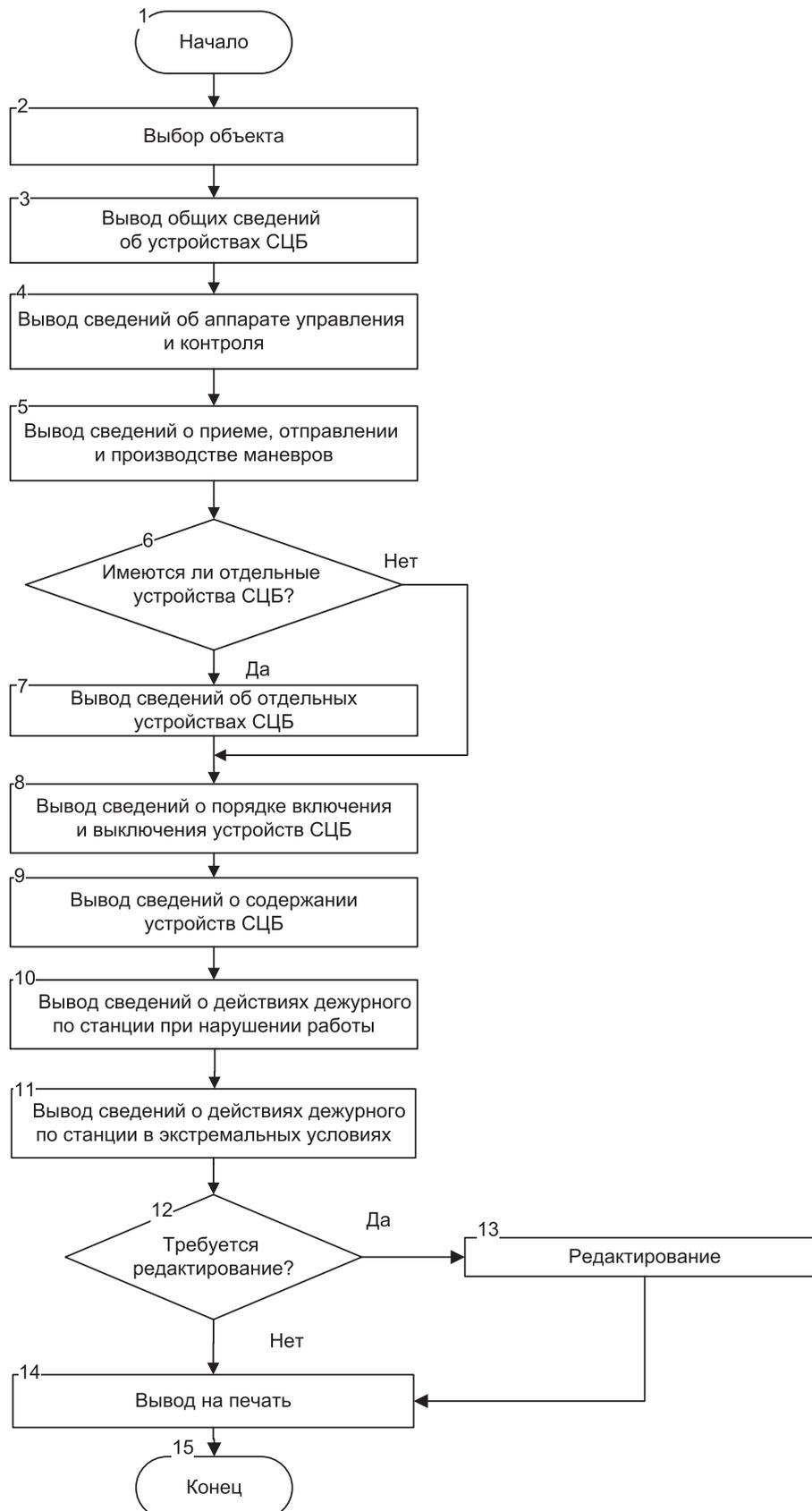


Рис. 4. Концептуальная блок-схема создания алгоритма

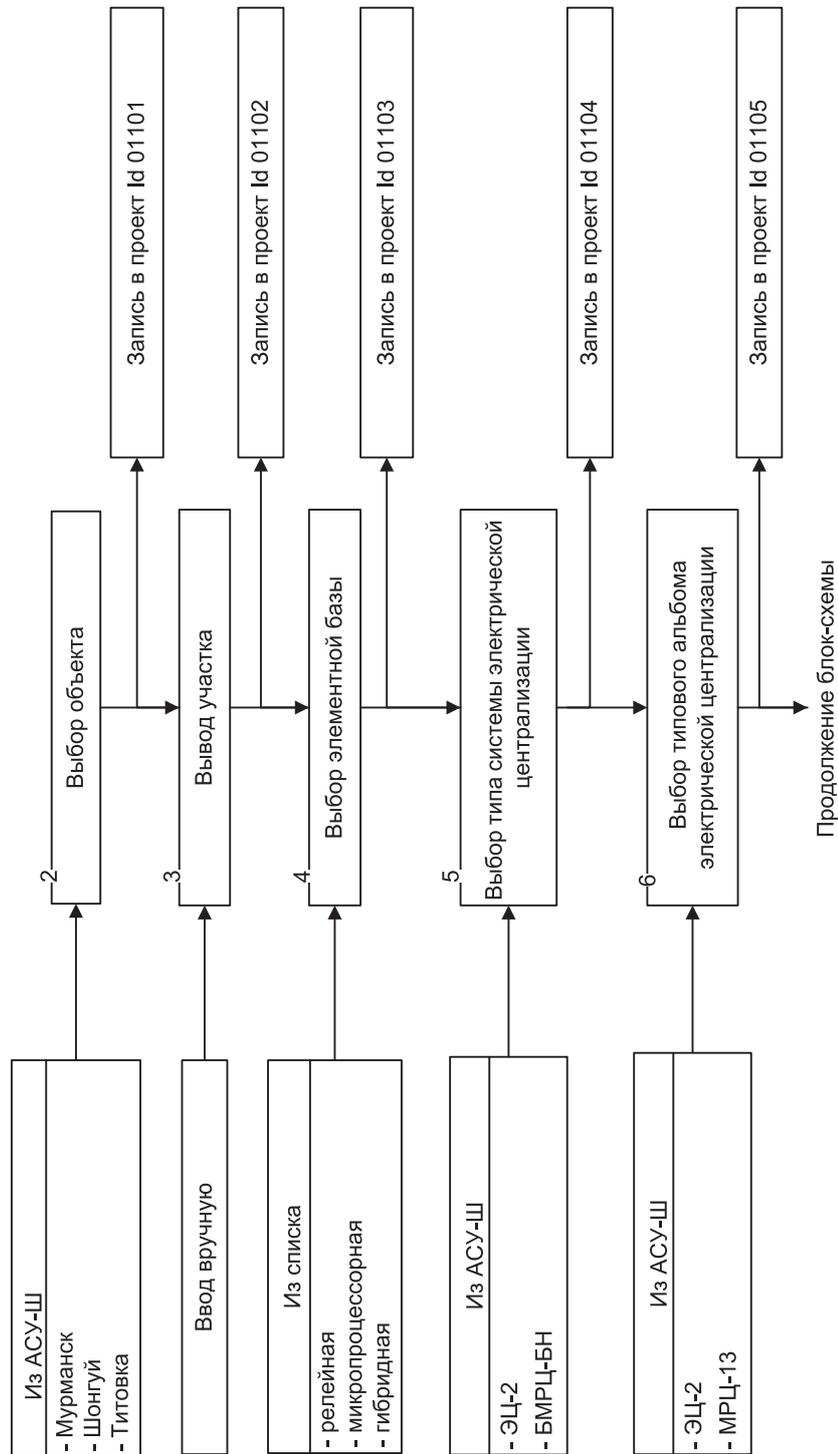


Рис. 5. Фрагмент создания функциональной блок-схемы алгоритма для определения объекта и электрической централизации

## **Модуль формирования инструкций по пользованию устройствами СЦБ**

Модуль формирования инструкций обеспечивает работу пользователя в следующих режимах.

### ***Формирование шаблонов инструкций***

В интерактивной среде составления шаблонов пользователь вводит все необходимые статические и динамические поля инструкции. Статические поля инструкции представляют собой текст, который будет автоматически добавляться в соответствующие места выходной формы при формировании инструкции. Динамические поля предоставят пользователю возможность выбрать содержимое из списка, указанного при составлении шаблона. При формировании полей у пользователя есть возможность указать статус поля (обязательное, не обязательное). Построенный шаблон преобразуется в специализированный формат инструкции и сохраняется в виде файла на диске.

### ***Дерево шаблонов***

При заходе пользователя в режим «Дерево шаблонов» (рис. 6) пользователь может выбрать интересующий его шаблон из расклассифицированного списка шаблонов. Дерево шаблонов поддерживает функции поиска шаблона по имени, классу шаблона и содержащемуся в шаблоне текстовому фрагменту. В результате выбора шаблона пользователь переходит в режим заполнения.

### ***Режим заполнения шаблона***

После выбора подходящего шаблона пользователь может просмотреть текст инструкции, одновременно выбирая необходимые данные из динамически сформированных при составлении шаблона списков. После заполнения всех необходимых полей пользователь

должен выбрать функцию «Сформировать инструкцию». Инструкция формируется одновременно в формате MS Word и в специализированном формате хранения инструкций. Пользователь должен выбрать путь сохранения на диск как выходной формы, так и специализированного файла.

### ***Режим автоматизированного заполнения шаблона***

При наличии технической документации в электронном виде в отраслевом формате ОФТД СЦБ система КЗ АРМ-ВТД может открыть документацию, проверить ее на корректность [19, 20], найти необходимые для заполнения данные и автоматически добавить их в соответствующие поля инструкции. Список формируемых автоматически данных зависит от конкретной инструкции и документации в отраслевом формате. Следующие данные автоматически выбираются из документации по полному оборудованию: светофоры, пути, переезды, маршруты [21], рельсовые цепи, стрелки различного вида, парк и т. д. После этого пользователю цветом указываются незаполненные поля. После полного заполнения шаблона запускается режим формирования выходной формы.

### ***Режим проверки корректности заполнения шаблона***

В этом режиме пользователь выбирает заполненную инструкцию и шаблон к ней. Система проверяет соответствие инструкции шаблону, и в случае несоответствия модуль указывает те места инструкции, которые необходимо скорректировать (рис. 7).

## **Заключение**

Основными предпосылками возникновения потребности в автоматизации составления инструкций по пользованию устройствами СЦБ являются:

<p>Общие данные</p> <p>Введение</p> <p>Общие сведения об устройствах СЦБ на станции</p> <p>Аппараты управления и контроля</p> <p>Прием и отправление поездов, производство маневров</p> <p>Порядок пользования отдельными устройствами СЦБ на станции</p> <p>Порядок выключения и включения устройств СЦБ</p> <p>Содержание устройств СЦБ</p> <p>Действия дежурного по станции при нарушении нормал. работы устр-ств СЦБ</p> <p>Действия дежурного по станции в экстремальных условиях</p>	<p><b>Порядок пользования отдельными устройствами СЦБ на станции</b></p> <p>Двойное управление стрелками</p> <p>Дистанционное ограждение составов</p> <p>Системы автоматического управления торможением поезда (САУТ)</p> <p>Автоматическое извещение о приближении поезда</p> <p>Устройства закрепления составов (УТС)</p> <p>Устройства контроля схода подвижного состава (УКСПС)</p> <p>Контрольно-габаритные устройства (КГУ)</p> <p>Устр-ва для предупр. самопр. выхода подв. состава на маршруты</p> <p>Устройства диспетчерского контроля за движением поездов</p> <p>Пневмопочта</p> <p>Увязка с горочными устройствами</p> <p>Увязка с ДЦ и передача станции на диспетчерское управление</p> <p>Увязка с переключ. рода тока секций контактной сети на станции стыкования</p> <p>Увязка с тоннельной и мостовой сигнализацией</p>
--	--

Рис. 6. Пример работы в режиме «Дерево шаблонов»

Наименование раздела	Обнаруженные ошибки
Введение	
Общие сведения об устройствах СЦБ на станции	Заполнены не все подразделы
Общие сведения об устройствах СЦБ	Раздел не заполнен
Состав устройств СЦБ на станции	Раздел не заполнен
Рельсовые цепи	
Стрелки электрической централизации	
Светофоры и маршрутные указатели	
Устройства СЦБ на прилегающих перегонах	Раздел не заполнен
Путевые устройства локомотивной сигнализации	
Электроснабжение	Раздел не заполнен
Местное управление	Раздел не заполнен
Аппараты управления и контроля	Раздел не заполнен
Прием и отправление поездов, производство маневров	Заполнены не все подразделы
Эксплуатационные ограничения	Раздел не заполнен
Таблица маршрута	Раздел не заполнен
Приём и отправление поездов	Раздел не заполнен
Смена направления движения на перегонах	Раздел не заполнен
Производство манёвров	Раздел не заполнен
Отмена маршрута	Раздел не заполнен
Отправление и приём поезда с ключом-жезлом	Раздел не заполнен
Порядок пользования отдельными устройствами СЦБ на станции	Заполнены не все подразделы
Двойное управление стрелками	Раздел не заполнен
Дистанционное ограждение составов	Раздел не заполнен
Устройства автоматики на станционных переездах	Раздел не заполнен
Автоматическое извещение о приближении поезда	Раздел не заполнен
Устройства закрепления составов (УТС)	Раздел не заполнен
Устройства контроля схода подвижного состава (УКСПС)	Раздел не заполнен
Контрольно-габаритные устройства (КГУ)	Раздел не заполнен
Устройства для предупреждения самопроизвольного выхода подвижного состава на маршруты следования поезда	Раздел не заполнен
Устройства диспетчерского контроля за движением поездов	Раздел не заполнен
Пневмопочта	Раздел не заполнен
Увязка с горочными устройствами	Раздел не заполнен
Увязка с ДЦ и передача станции на диспетчерское управление	Раздел не заполнен
Пневмообдувка, электрообогрев стрелочных переводов	Раздел не заполнен
Выключение и включение устройств СЦБ	Раздел не заполнен
Содержание устройств СЦБ	Раздел не заполнен
Действия дежурного по станции при нарушении нормальной работы устройств СЦБ	Раздел не заполнен
Действия дежурного по станции в экстремальных условиях	Раздел не заполнен

Рис. 7. Форма проверки корректности заполнения проекта инструкции

- существенные затраты времени на составление инструкций по пользованию устройствами СЦБ;
  - отсутствие автоматизированной проверки на корректность составленной инструкции;
  - отсутствие специализированного формата хранения инструкций, позволяющего использовать его в других модулях (в частности, в КЗ АРМ-ВТД);
  - возможность построения автоматизированной системы по составлению инструкций;
  - отсутствие системы учета инструкций.
- Автоматизация формирования инструкции по пользованию устройствами СЦБ с помощью КЗ АРМ-ВТД позволяет решить суще-

ствующие проблемы ручного формирования инструкций и снизить затраты на содержание технической документации устройств СЦБ.

### Библиографический список

1. Василенко М. Н. Принципы организации электронного документооборота технической документации / М. Н. Василенко, Б. П. Денисов, П. Е. Булавский, Д. В. Седых // Транспорт Российской Федерации. – 2006. – № 7. – С. 31–35.
2. Василенко М. Н. Система информационного обеспечения на основе баз данных / М. Н. Василенко, Б. П. Денисов, П. Е. Булавский, Д. В. Се-

- дых // Автоматика. Связь. Информатика. – 2006. – № 11. – С. 47–48.
3. Василенко М. Н. Автоматизированная система экспертизы схемных решений железнодорожной автоматики и телемеханики / М. Н. Василенко, А. М. Горбачев, Д. В. Зуев, Е. В. Григорьев // Транспорт Российской Федерации. – 2011. – № 5 (36). – С. 64–67.
4. Тележенко Т. А. Автоматизированная система экспертизы схемных решений / Т. А. Тележенко // Автоматика. Связь. Информатика. – 2009. – № 5. – С. 24–26.
5. Василенко М. Н. Согласование и утверждение технической документации с использованием электронной цифровой подписи / М. Н. Василенко, П. Е. Булавский, Б. П. Денисов, Д. А. Имануилов // Наука и техника транспорта. – 2010. – № 1. – С. 18–23.
6. Матушев А. А. Распознавание структуры монтажных схем ЖАТ / А. А. Матушев, Д. В. Седых // Автоматика. Связь. Информатика. – 2015. – № 10. – С. 4–7.
7. Василенко М. Н. Метод выделения структуры принципиальной электрической схемы железнодорожной автоматики и телемеханики при распознавании печатной документации / М. Н. Василенко, Р. А. Ковалев // Автоматика на транспорте. – 2017. – Т. 3, № 1. – С. 88–97.
8. Василенко М. Н. Методы выделения текстовых выражений принципиальных электрических схем железнодорожной автоматики и телемеханики / М. Н. Василенко, Р. А. Ковалев // Автоматика на транспорте. – 2016. – Т. 2, № 4. – С. 540–551.
9. Матушев А. А. Разработка обобщенной модели принципиальных электрических и монтажных схем для экспертизы и интеллектуальной корректировки / А. А. Матушев, Д. В. Седых, И. С. Ушаков // Региональная информатика «РИ-2016»: материалы конференции. – СПб. : ПГУПС, 2016. – С. 305.
10. Булавский П. Е. Методика оценки временных характеристик процессов электронного документооборота технической документации / П. Е. Булавский, Д. С. Марков // Автоматика на транспорте. – 2016. – Т. 2, № 1. – С. 81–94.
11. Седых Д. В. Применение отраслевого формата технической документации на устройства железнодорожной автоматики и телемеханики для интеграции приложений / Д. В. Седых, С. А. Суханов // Изв. Петерб. гос. ун-та путей сообщения. – 2005. – Вып. 3. – С. 74–79.
12. Седых Д. В. Учет работы приборов с помощью АРМ-УРП / Д. В. Седых // Автоматика. Связь. Информатика. – 2007. – № 3. – С. 7–8.
13. Седых Д. В. Отраслевой формат технической документации на устройства железнодорожной автоматики и телемеханики. Ч. 1. Концепция создания / Д. В. Седых, Д. В. Зуев, М. А. Гордон // Автоматика на транспорте. – 2017. – Т. 3, № 1. – С. 112–128.
14. Василенко М. Н. Сверка технической документации ЖАТ / М. Н. Василенко, А. М. Горбачев, Р. Т. Мустафаев // Автоматика. Связь. Информатика. – 2013. – № 4. – С. 11–13.
15. Горбачев А. М. Автоматизация анализа, экспертизы и сверки технической документации системы железнодорожной автоматики и телемеханики / А. М. Горбачев // Изв. Петерб. гос. ун-та путей сообщения. – 2012. – Вып. 4. – С. 73–78.
16. Седых Д. В. Методы сверки чертежей напольного технологического оборудования железнодорожной автоматики и телемеханики / Д. В. Седых // Региональная информатика «РИ-2016»: материалы конференции. – СПб. : ПГУПС, 2016. – С. 316–317.
17. Седых Д. В. Идентификация топологий рельсовых цепей в отраслевом формате технической документации на устройства СЦБ / Д. В. Седых // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. – 2016. – Т. 13, Вып. 3 (48). – С. 377–387.
18. Булавский П. Е. Формализация алгоритмического описания систем обеспечения жизненного цикла железнодорожной автоматики и телемеханики / П. Е. Булавский, Д. С. Марков, В. Б. Соколов, Т. Ю. Константинова // Автоматика на транспорте. – 2015. – Т. 1, № 4. – С. 418–432.
19. Безродный Б. Ф. Автоматизация проверки проектов на основе АРМ-ТЕСТ / Б. Ф. Безродный, М. Н. Василенко, Б. П. Денисов, Д. В. Седых // Автоматика. Связь. Информатика. – 2008. – № 3. – С. 22–24.
20. Василенко М. Н. Автоматизированная система экспертизы схемных решений железнодорожной автоматики и телемеханики / М. Н. Василенко, А. М. Горбачев, Д. В. Зуев, Е. В. Григорьев // Транс-

порт Российской Федерации. – 2011. – № 5 (36). – С. 64–67.

21. Гордон М. А. Технология автоматизированного синтеза таблицы зависимости положения стрелок и показаний светофоров / М. А. Гордон, Р. А. Ковалев, Д. В. Седых // Транспортные интеллектуальные системы 2017 / под ред. Вал. В. Сапожникова, Д. В. Ефанова. – СПб. : ПГУПС, 2017. – С. 261–268.

## References

1. Vasilenko M. N., Denisov B. P., Bulavskiy P. Y. & Sedykh D. V. Printsipy organizatsii elektronogo dokumentooborota tekhnicheskoy dokumentatsii [Organization principles of electronic documentation management of technical documentation]. *Transport of the Russian Federation*, 2006, no. 7, pp. 31–35. (In Russian)

2. Vasilenko M. N., Denisov B. P., Bulavskiy P. Y. & Sedykh D. V. Sistema informatzionnogo obespechenia na osnove bas dannikh [Dataware system on the basis of data bases]. *Automation. Connection. Information technology*, 2006, no. 11, pp. 47–48. (In Russian)

3. Vasilenko M. N., Gorbachev A. M., Zuyev D. V. & Grygoriyev Y. V. Avtomatizirovannaya sistema ekspertizy skhemnykh resheniy zheleznodorozhnoy avtomatyky i telemekhaniky [Automation system of examination of railway automatics and telemechanics]. *Transport of the Russian Federation*, 2011, no. 5 (36), pp. 64–67. (In Russian)

4. Telezhenko T. A. Avtomatizirovannaya sistema ekspertizy skhemnykh resheniy [Automated system of examination of circuit design]. *Automation. Connection. Information technology*, 2009, no. 5, pp. 24–26. (In Russian)

5. Vasilenko M. N., Bulavskiy P. Y., Denisov B. P. & Imanuilov D. A. Soglasovaniye i utverzhdeniye tekhnicheskoy dokumentatsii s ispolzovaniyemelektronnoy tsifrovoy podpisy [Finalization and approval of technical documentation using electronic digital signature]. *Science and transport engineering*, 2010, no. 1, pp. 18–23. (In Russian)

6. Matushev A. A. & Sedykh D. V. Raspoznavaniye struktury montazhnykh skhem ZhAT [Structural recognition of RAT (railway automatics and telemechanics)

wire diagrams]. *Automation. Connection. Information technology*, 2015, no. 10, pp. 4–7. (In Russian)

7. Vasilenko M. N. & Kovalev R. A. Metod vydeleniya struktury pryntsiipalnoy elektricheskoy skhemy zheleznodorozhnoy avtomatyky i telemekhaniky pry raspoznavanii pechatnoy dokumentatsii [Differentiation method of electrical schematic diagram structure of railway automatics and telemechanics when identifying hardcopy documentation]. *Transport automatics*, 2017, vol. 3, no. 1, pp. 88–97. (In Russian)

8. Vasilenko M. N. & Kovalev R. A. Metod vydeleniya tekstovykh vyrazheniy printsipialnykh elektricheskikh skhem zheleznodorozhnoy avtomatyky i telemekhaniky [Differentiation method of electrical schematic diagrams' textual expressions of railway automatics and telemechanics]. *Transport automatics*, 2016, vol. 2, no. 4, pp. 540–551. (In Russian)

9. Matushev A. A., Sedykh D. V. & Ushakov I. S. Razrabotka oboshennoy modeli printsipialnykh elektricheskikh i montazhnykh skhem dlya ekspertizy i intellektualnoy korrektyrovky [The development of electrical schematic and circuit diagrams' generalized model for examination and intellectual correction]. *Regionalnaya informatika "RI-2016". Materialy konferentsii [Branch informational technology "RI-2016". Materials of a conference]*. Saint Petersburg, Saint Petersburg State Transport University Publ., 2016, 305 p. (In Russian)

10. Bulavskiy P. Y. & Markov D. S. Metodyka otsenki vremennykh kharakteristik protsessov elektronogo dokumentooborota tekhnicheskoy dokumentatsii [Timing data estimation technique of technical documentation electronic document management]. *Transport automatics*, 2016, vol. 2, no. 1, pp. 81–94. (In Russian)

11. Sedykh D. V. & Sukhanov S. A. Prymeneniye otraslevogo formata tekhnicheskoy dokumentatsii na ustroystva zheleznodorozhnoy avtomatyky i telemekhaniky dlya integratsii prylozheniy [Technical documentation branch format usage on railway automatics and telemechanics' devices for integration of applications]. *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2005, issue 3, pp. 74–79. (In Russian)

12. Sedykh D. V. Uchet raboty pryborov s pomoshju ARM-URP [device functioning account on the basis of ARM-URP]. *Transport automatics*, 2007, no. 3, pp. 7–8. (In Russian)

13. Sedykh D. V., Zuyev D. V. & Gordon M. A. Otrasevyy format tekhnicheskoy dokumentatsii na ustroystva zheleznodorozhnoy avtomatyky i telemekkhanyky. Ch. 1. Kontseptsiya sozdaniya [Technical documentation branch format on railway automatics and telemechanics' devices. Pt 1. Formation concept]. *Transport automatics*, 2017, vol. 3, no. 1, pp. 112–128. (In Russian)
14. Vasylenko M. N., Gorbachev A. M. & Mustafayev R. T. Sverka tekhnicheskoy dokumentatsii ZhAT [RAT (railway automatics and telemechanics) technical documentation revision]. *Transport automatics*, 2013, no. 4, pp. 11–13. (In Russian)
15. Gorbachev A. M. Avtomatizatsiya analiza, ekspertyzy i sverky tekhnicheskoy dokumentatsii systemy zheleznodorozhnoy avtomatyky i telemekkhanyky [Automation of analysis, expertise and revision of technical documentation of railway automatics and telemechanics system]. *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2012, issue 4, pp. 73–78. (In Russian)
16. Sedykh D. V. Metody sverky chertezhey napolnogotekhnologicheskogo oborudovaniya zheleznodorozhnoy avtomatyky i telemekkhanyky [Revision methods of processing floor equipment drawings of railway automatics and telemechanics]. *Regionalnaya informatika "RI-2016". Materialy konferentsii [Branch informational technology "RI-2016". Materials of a conference]*. Saint Petersburg, Saint Petersburg State Transport University Publ., 2016, pp. 316–317. (In Russian)
17. Sedykh D. V. Identifikatsiya topologiy relsovykh tsepey v otrasevom formate tekhnicheskoy dokumentatsii na ustroystva STsB [Identification of track circuits' topology in branch format of technical documentation on STsB (signaling arrangement)]. *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2016, vol. 13, issue 3 (48), pp. 377–387. (In Russian)
18. Bulavskiy P. Y., Markov D. S., Sokolov V. B. & Konstantinova T. Yu. Formalizatsiya algoritmycheskogo opysaniya system obespecheniya zhiznennogo tsikla zheleznodorozhnoy avtomatyky i telemekkhanyky [Formalization of life cycle supporting systems' algorithmic description of railway automatics and telemechanics]. *Transport automatics*, 2015, vol. 1, no. 4, pp. 418–432. (In Russian)
19. Bezrodniy B. F., Vasilenko M. N., Denisov B. P. & Sedykh D. V. Avtomatyzatsiya proverky proyektov na osnove ARM-TEST [Projects' testing automation based on ARM-TEST]. *Automation. Connection. Information technology*, 2008, no. 3, pp. 22–24. (In Russian)
20. Vasylenko M. N., Gorbachev A. M., Zuyev D. V. & Grygoriyev Y. V. Avtomatyzirovannay sistema ekspertyzy skhemnykh resheniy zheleznodorozhnoy avtomatyky i telemekkhanyky [Automation system of examination of railway automatics and telemechanics]. *Transport of the Russian Federation*, 2011, no. 5 (36), pp. 64–67. (In Russian)
21. Gordon M. A., Kovalev R. A. & Sedykh D. V. Tekhnologiya avtomatyzirovannogo synteza tablytsy zavisimosti polozheniya strelok i pokazaniy svetoforov [Technology of automated synthesis of dependency table of position of points and light-signal aspects]. *Transportniye intellektualniye systemy [Transport intelligence systems]*. Eds V. V. Sapozhnikov, D. V. Yefanov. Saint Petersburg, Saint Petersburg State Transport University Publ., 2017, pp. 261–268. (In Russian)

\* СЕДЫХ Дмитрий Владимирович – инженер, sedyhdmitriy@gmail.com; БЕЛОУСОВ Сергей Владимирович – аспирант, bsv992@gmail.com; ВАСИЛЕНКО Михаил Николаевич – доктор техн. наук, профессор, vasilenko.m.n@gmail.com (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 629.463.62

**А. Д. Чепурной, А. В. Додонов, А. Е. Афанасьев,  
А. К. Шевченко, Р. И. Шейченко**

## **ПОСТАНОВКА НА ПРОИЗВОДСТВО НОВОГО СЕМЕЙСТВА ВАГОНОВ-ПЛАТФОРМ**

Дата поступления: 09.03.2017

Решение о публикации: 24.04.2017

### **Аннотация**

**Цель:** Проанализированы особенности постановки на производство вагонов, которые объединяет ряд основных параметров. Приведены примеры разработанных ранее семейств вагонов различных производителей. Изложены основные принципы, использованные при постановке на производство семейства вагонов-платформ, предложенных ООО УК «РэйлТрансХолдинг». **Методы:** Представлено описание ООО УК «РэйлТрансХолдинг» вагонов-платформ моделей 13-9599, 13-9599-01, 13-9599-02, с указанием особенностей каждой модели. На этапе проектирования выполнен комплекс расчетных исследований, подтверждающих соответствие нормируемых показателей требованиям действующих в Российской Федерации нормативных документов. Проиллюстрировано напряженно-деформированное состояние вагонов при имитации соударений вагонов с силой 3,0 МН. Проведен анализ нормируемых показателей, характеризующих динамические качества вагонов, а также выполнена оценка нагруженности рам вагонов путем сравнения максимальных изгибающих моментов, возникающих при различных схемах загрузки вагонов. **Результаты:** На основании анализа показателей качества хода и изгибающих моментов обоснован и рекомендован минимально необходимый объем экспериментальных исследований. Отдельные виды испытаний были выполнены только на одном типичном представителе описываемого семейства вагонов, другие – на другой модели вагонов. Полученные результаты испытаний зачтены для подтверждения соответствия показателей остальных моделей вагонов. **Практическая значимость:** Таким образом, объем рекомендуемых экспериментов позволил установить соответствие всех рассмотренных моделей вагонов при безусловном выполнении требований безопасности и сократить объем испытаний. Приведены основные результаты, позволяющие уменьшить время и материальные затраты, необходимые для постановки на производство ряда вагонов.

**Ключевые слова:** Семейство вагонов, модельный ряд, грузовой вагон, вагон-платформа, постановка на производство, расчеты, испытания.

**Anatoliy D. Chepurnoy**, D. Sci., professor, member of international engineering Academy, mechanical engineer, deputy director general – head of scientific and technical development, chepurnoy@ukrth.ru (LLC Management Company “RailTransHolding”); **Alexander V. Dodonov**, Cand. Sci., deputy manager, a.dodonov@engcenter.ru; \***Alexander Y. Afanasyev**, Cand. Sci, deputy director, aae@engcenter.ru (LLC “RSEC” (Rolling Stock Engineering Centre)); **Aleksey K. Shevchenko**, mechanical engineer, project manager, niz.office@ukrth.com; **Roman I. Sheichenko**, design manager of tank-car project, r\_sheychenko@mail.ru (LLC “Engineering research centre Management Company “RTH”) FLAT CAR NEW LINE LAUNCHING

### **Summary**

**Objective:** The specificities of car launching, which are united by a number of key parameters, were analyzed. Examples of car lines, developed earlier by different manufacturers, were given. The first

principles, used in launching a flat car line suggested by LLC Management Company “RailTransHolding”, were stated. **Methods:** The description of LLC Management Company “RailTransHolding” 13-9599, 13-9599-01, 13-9599-02 models of flat cars was presented with peculiarities of each model being pointed out. A complex of research calculations was fulfilled at the stage of designing, corroborating the correspondence of specified parameters and regulatory requirements valid in the Russian Federation. Cars’ deflected mode in the process of 3MHz cars’ collision imitation is illustrated. The analysis of specified parameters characterizing dynamic qualities of cars was conducted, as well as the assessment of car frames’ loading is fulfilled by means of peak bending moments’ comparison occurring in different carload patterns. **Results:** On the basis of analysis of car motion and bending moments’ quality indices, the minimum necessary volume of experimental research was justified and recommended. Separate test categories were conducted only on one typical representative of the car line in question, others-on another model of cars. The obtained testing results were credited for corroboration of the rest of car models indices’ conformity. **Practical importance:** Thus, the volume of recommended experiments made it possible to establish the conformity of all car models under consideration with unconditional fulfillment of safety requirements and reduce the volume of testing. The primary results were given, allowing for the reduction in time and material costs necessary for a number of cars’ launching.

**Keywords:** Car line, family, freight car, flat car, launching, calculations, testing.

Важным и строго регламентированным, согласно требованиям межгосударственного стандарта ГОСТ 15.902–2014, этапом в жизненном цикле грузового вагона является его постановка на производство. Данный этап включает в себя разработку технического задания, эскизного и технического проектов, рабочей конструкторской документации, изготовление и предварительные испытания опытных образцов продукции, приемочные испытания, подготовку к серийному производству и проведение квалификационных испытаний. Только после выполнения многоступенчатой процедуры, включающей все указанные этапы, начинается промышленное производство продукции.

При этом в грузовом вагоностроении часто возникает ситуация, когда одновременно осуществляется постановка на производство целого семейства (модификаций) одного вагона. Когда на основе базовой модели, объединяющей ряд основных параметров: тип, осьность, конструкционная скорость, линейные и присоединительные размеры, габарит вагона и др., одновременно создаются модификации, которые отличаются от базовой модели назначением, номенклатурой перевозимых грузов, грузоподъемностью, объемом и, как следствие, массой тары.

Например, Крюковским вагоностроительным заводом [1] и АО «Алтайвагон» [2] разработаны модельные ряды вагонов-платформ на базе модели 13-401 и 13-2114 соответственно, которые позволяют перевозить широкую номенклатуру грузов и могут оборудоваться бортами, лесными стойками, упорами для крепления контейнеров и др. Брянским машиностроительным заводом [3] создано семейство вагонов-хопперов на базе модели 19-3054, которые отличаются конструкцией механизма разгрузки, грузоподъемностью, объемом кузова, типом лакокрасочного покрытия внутренней поверхности кузова. Научно-производственная корпорация «Уралвагонзавод» [4] разработала ряд вагонов-цистерн на базе модели 15-150, которые отличаются не только назначением, но и размерами котлов и применяемой арматурой.

В настоящее время ООО УК «РэйлТрансХолдинг» (г. Москва) [5] предложил модельный ряд 40-футовых специализированных вагонов-платформ, основной отличительной особенностью которых является единая конструкция рамы, ходовых частей, автосцепного устройства, тормозного оборудования и др. При этом на базовом вагоне имеется возможность установки устройства для крепления контейнеров, съемных ложементов для уклад-

ки рулонов листовой стали и колпака-укрытия для их защиты от воздействия атмосферных осадков. Базовым вагоном служит вагон-платформа модели 13-9599 (рис. 1, *а*), предназначенный для перевозки крупнотоннажных контейнеров. При установке на базовый вагон съемных ложементов, которые имеются у модели 13-9599-01 (рис. 1, *б*), на вагон-платформе осуществляется перевозка стали в рулонах без укрытия от атмосферных осадков. В случае необходимости защиты перевозимой на вагоне стали от воздействия атмосферных осадков вагон оборудуется съемным колпаком-укрытием. Такому вагону присвоена модель 13-9599-02 (рис. 1, *в*).

Основные параметры и технические характеристики разработанного модельного ряда указанных вагонов-платформ представлены в табл. 1.

Построенные вагоны состоят из следующих сборочных единиц: рамы с упорами для крепления контейнеров, настила пола, двух двухосных тележек, двух автосцепных устройств с автосцепкой и поглощающими аппаратами, тормозной системы с отдельным приводом на каждую тележку, тормоза стояночного, подножек и поручней.

Рама вагонов-платформ представляет собой сварную цельнометаллическую конструкцию с несущими хребтовой и боковыми балками

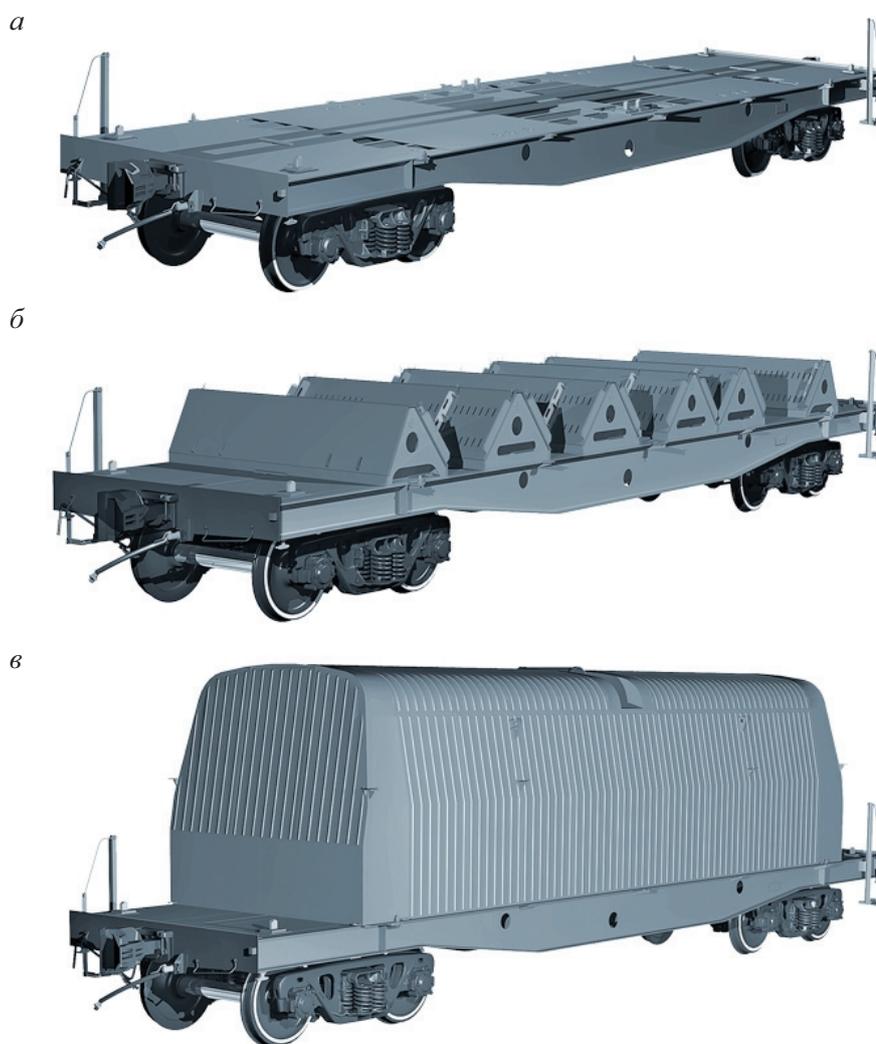


Рис. 1. Общий вид вагонов-платформ:  
*а* – модель 13-9599; *б* – модель 13-9599-01; *в* – модель 13-9599-02

ТАБЛИЦА 1. Показатели модельного ряда вагонов-платформ

Параметры и характеристики	Значение для модели		
	13-9599	13-9599-01	13-9599-02
Грузоподъемность, т	74,0	69,0	66,7
Масса тары, не более, т	19,7±0,3	24,7±0,3	27,0±0,3
Расчетная нагрузка от колесной пары на рельсы, кН (тс)	230,5 (23,5)		
Длина по осям сцепления автосцепок, мм	14 220		
Длина рамы по концевым балкам, мм	13 000		
База вагона, мм	9300		
Ширина вагона, мм	3100		
Количество упоров для крепления контейнеров, шт.	8	–	–
Номенклатура перевозимых контейнеров по ГОСТ Р 51876–2008 (ИСО 1496-1:1990) [6]	1AA, 1A, 1AX, 1CC, 1C, 1CX	–	–
Диаметры перевозимых рулонов, мм	–	От 800 до 2400	
Модель тележки	18-100 или аналоги		
Конструкционная скорость, м/с (км/ч)	33,3 (120)		
Габарит вагона по ГОСТ 9238–2013 [7]	0-ВМ		

двухавровой конструкции с переменным по длине поперечным сечением. Общее количество фитинговых упоров – восемь. Четыре упора – стационарные одинарные, расположенные по два в консольной части рамы в районе балок лобовых, а четыре находятся в средней части рамы – откидные сдвоенные. На четыре стационарных упора устанавливается один 40-футовый контейнер. Для установки двух 20-футовых контейнеров используются все 8 упоров.

Вагоны-платформы моделей 13-9599-01 и 13-9599-02 дополнительно оборудованы съемными ложементами (опорами) для размещения рулонов листовой стали, а вагон-платформа модели 13-9599-02 для защиты рулонов от воздействия атмосферных осадков и ограничения доступа посторонних лиц дополнительно оборудован колпаком-укрытием. Общее количество ложементов 6, два из них могут перемещаться при укладке рулонов вдоль платформы

для размещения рулонов различного диаметра (от 800 до 2400 мм).

Укрытие представляет собой сварной металлический колпак, надеваемый сверху на все пять ячеек с рулонами, уложенными на платформу. С целью экономии места при хранении колпаков для укрытия рулонов предусмотрена возможность их многоярусного складирования, что является одним из преимуществ разрабатываемых вагонов. Таким образом, можно складировать съемные устройства (защитные колпаки) в несколько ярусов.

Сейчас перевозка грузов в контейнерах – наиболее быстрый и выгодный способ доставки [8, 9]. Потому более 90% мировых перевозок грузов осуществляется в контейнерах, при этом доля таких перевозок постоянно растет. Особенно стремительно увеличивается мировой парк контейнеров-цистерн (танк-контейнеров). Максимальная масса брутто современных танк-контейнеров достигает

36 т, наиболее массовым типом является 20-футовый контейнер. Учитывая грузоподъемность современных вагонов колеи 1520 мм с осевой нагрузкой 23,5 тс, для перевозки полностью загруженных танк-контейнеров массой брутто 36 т необходим вагон-платформа погрузочной длиной 40 футов.

Вместе с тем в России по ряду причин в настоящее время объем перевозок железнодорожным транспортом и, как следствие, спрос на новый подвижной состав понижаются. Таким образом, минимизация затрат вагоностроителей для постановки на производство и освоение производства новых моделей грузовых вагонов особенно актуальна.

Одним из возможных путей снижения стоимости разработки, постановки на производство, сертификации и изготовления нового подвижного состава является разработка семейства вагонов для перевозки разнообразных грузов на базе одного вагона. При этом

перепрофилирование вагона под различные виды грузов осуществляется путем установки дополнительного оборудования на базовый вагон [10–14].

На этапе проектирования вагонов-платформ, разработанных ООО УК «РэйлТранс-Холдинг», возможность использования одной рамы для всех моделей подтверждена результатами расчетов. Выполненный комплекс расчетов показал, что оцениваемые показатели соответствуют требованиям действующих нормативных документов [15, 16]. Анализ результатов расчетов прочности конструкций вагонов-платформ при загрузке контейнерами (рис. 2, *а, б*) и загрузке стали в рулонах (рис. 2, *в, г*) при действии ударной нагрузки в автоцепку силой 3,0 МН показал, что эквивалентные напряжения во всех элементах конструкции не превышают допустимых значений. При этом расчет прочности вагона-платформы без укрытия также распространяется на вагон-

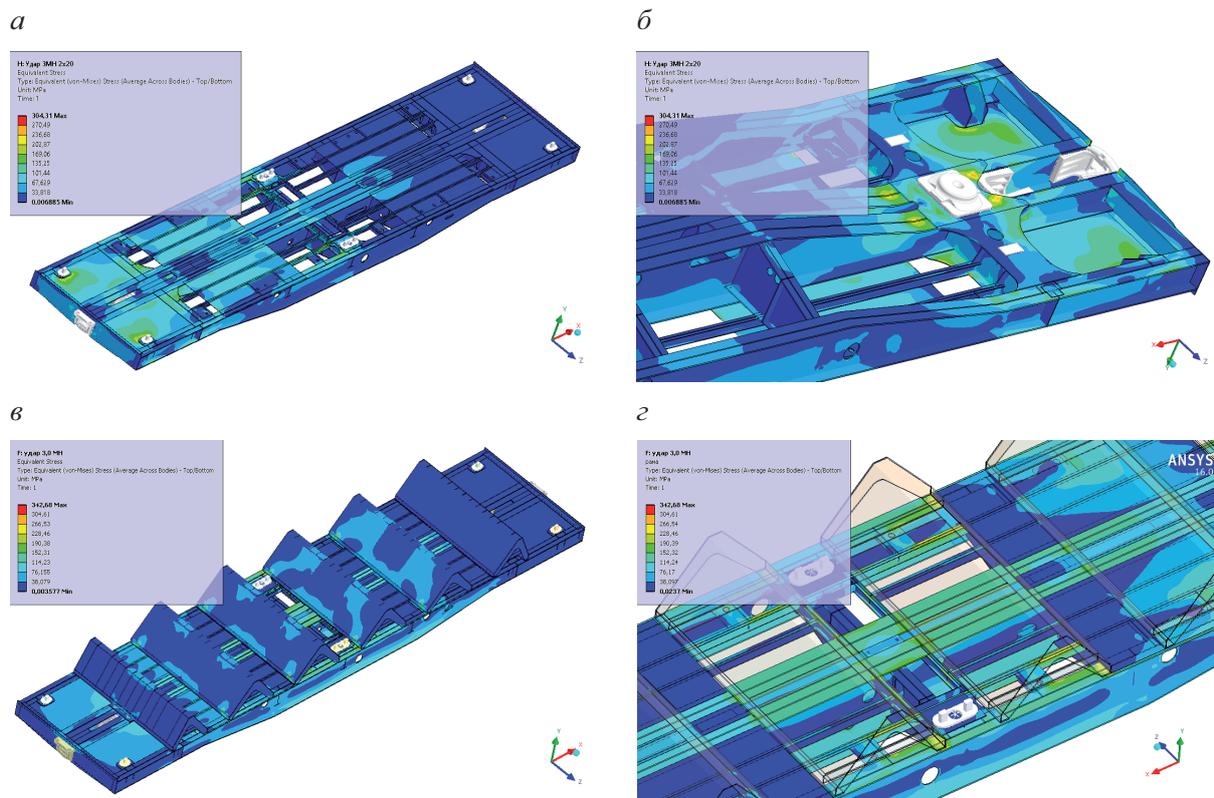


Рис. 2. Напряженно-деформированное состояние вагонов при соударении с силой 3,0 МН:  
*а* – модель 13-9599, вид сверху; *б* – модель 13-9599, вид снизу; *в* – модель 13-9599-01, вид сверху; *г* – модель 13-9599-01, вид под ложементами

платформу с укрытием, так как грузоподъемность у первого больше при одинаковых схемах загрузки стали в рулонах.

Кроме того, по конструкции семейства 40-футовых вагонов-платформ проведен комплекс работ по патентной чистоте изделий, что подтверждено патентами РФ.

При постановке на производство грузовых вагонов наиболее дорогостоящим этапом является проведение испытаний. Учитывая, что постановка на производство вагонов-платформ указанных выше моделей осуществлялась одновременно и вагоны имеют сходные параметры, в том числе конструкцию несущих элементов рамы, для снижения затрат на проведение испытаний ООО «ИЦПС» было раз-

работано обоснование выбора типового представителя для проведения конкретного вида испытаний. Это позволило при безусловном выполнении требований безопасности сократить объем испытаний, т. е. отдельные виды испытаний проведены на одной из моделей, а полученные результаты зачтены для подтверждения соответствия остальных моделей вагонов. В первую очередь это касалось статических испытаний на прочность и ходовых динамических испытаний.

С целью выбора типовых представителей для проведения ходовых динамических испытаний на основании результатов расчетов были проанализированы показатели ходовых качеств (табл. 2) и изгибающих моментов

ТАБЛИЦА 2. Показатели качества хода вагонов

Показатель	Режим загрузки вагона	Модель вагона		
		13-9599	13-9599-01	13-9599-02
Ордината центра массы	Порожний	0,790	0,944	<b>1,103</b>
	Груженный	<b>2,114</b>	2,044	2,061
Коэффициент вертикальной динамики: для кузова для необрессоренной рамы тележки	Порожний	0,689 0,830	0,689 0,830	0,689 0,830
	Груженный	<b>0,361</b> <b>0,548</b>	0,335 0,522	0,331 0,518
Коэффициент устойчивости колесной пары против схода с рельсов для I расчетного случая «Норм...»	Порожний	1,79	1,69	<b>1,65</b>
	Груженный	<b>2,00</b>	2,02	2,02
Коэффициент устойчивости колесной пары против схода с рельсов для II расчетного случая «Норм...»: при $h_p = 0,15$ м, установка 1 при $h_p = 0,15$ м, установка 2 при $h_p = 0$ м, установка 1 при $h_p = 0$ м, установка 2	Порожний	<b>1,562</b>	1,778	1,843
		<b>1,601</b>	1,819	1,937
		<b>1,386</b>	1,561	1,636
		<b>1,996</b>	2,273	2,381
Коэффициент устойчивости от опрокидывания: наружу кривой внутри кривой	Порожний	3,92 1,84	3,94 2,13	<b>2,31</b> <b>1,63</b>
	Груженный	<b>2,39</b> <b>1,72</b>	2,86 1,98	2,62 1,88

Примечание. Жирным шрифтом выделены наихудшие значения показателей.

(табл. 3), возникающих в раме вагона с различными вариантами загрузки вагона.

Анализ показателей ходовых качеств (см. табл. 2) показал, что наихудшие значения в гружёном режиме у вагона модели 13-9599, а в порожнем – у модели 13-9599-02. Установлено, что целесообразно провести ходовые динамические испытания не на всех разработанных моделях вагонов, а только на двух, при этом показатели модели 13-9599 необходимо подтвердить в гружёном состоянии с контейнерами, а модели 13-9599-02 – в порожнем. Полученные результаты можно распространить на остальные модели по соответствующим показателям.

Учитывая, что несущая металлоконструкция рамы для рассматриваемых платформ идентична, типовые представители вагонов для статических прочностных испытаний были определены на основании анализа изгибающих моментов, действующих на несущую конструкцию вагона-платформы при перевозке различных грузов (табл. 3).

Анализ табл. 3 показал, что максимальный изгибающий момент для шкворневого узла получен у платформы модели 13-9599 при загрузке двумя 20-футовыми контейнерами массой 37,0 т каждый, для средней части рамы платформы – у вагонов моделей 13-9599-01 и

13-9599-02 по схеме загрузки пятью рулонами массой 13,34 т каждый.

Таким образом, по результатам анализа табл. 3 целесообразно испытать вагон модели 13-9599 по схеме загрузки двумя 20-футовыми контейнерами массой 36,0 т. Учитывая, что вагон модели 13-9599-02 по сравнению с моделью 13-9599-01 оборудован колпаком для укрытия рулонов, то он был выбран для испытаний при загрузке пятью рулонами массой, равной грузоподъемности вагона. При этом для проверки крепления ложементов к раме вагона была взята схема с двумя рулонами массой 32,0 т каждый, которая обеспечивает наибольшую инерционную нагрузку при соударениях вагонов.

Комплекс испытаний проведен аккредитованным испытательным центром ООО «ИЦПС», который включал следующие виды испытаний:

- проверка габаритных и линейных размеров;
- на статическую прочность от вертикальной нагрузки;
- на статическую прочность от горизонтальной нагрузки;
- на прочность при соударении;
- стационарные тормозные;
- ходовые тормозные;

ТАБЛИЦА 3. Максимальные изгибающие моменты в раме вагонов (кН·м)

Схема погрузки	Модель вагона		
	13-9599	13-9599-01	13-9599-02
<b>Контейнеры</b>			
2×20 футов, 30,48 т каждый	200,7/473,5	–	–
2×20 футов, 37,0 т каждый	<b>243,5/574,7</b>	–	–
1×40 футов, 30,48 т	200,7/200,7	–	–
<b>Сталь в рулонах</b>			
5×13,34 т	–	<b>10/773</b>	<b>10/773</b>
2×32,0 т	–	<b>24/417</b>	<b>24/417</b>
3×23,0 т	–	17/720	17/720

Примечания. В числителе – значения для шкворневого узла, в знаменателе – для средней части платформы. Жирным шрифтом выделены наибольшие изгибающие моменты.

- ходовые динамические;
- оценка сопротивления усталости конструкции вагона;
- функциональные испытания.

Объем испытаний по моделям 13-9599, 13-9599-02, определенный по результатам вышеизложенного обоснования, приведен в табл. 4.

В настоящее время успешно завершено комплекс предварительных испытаний, результаты которых положительны и удовлетворяют действующим нормативным документам. На АО «Новозыбковский машиностроительный завод» проведена приемочная комиссия разработанного семейства вагонов, результаты которой оформлены соответствующим актом, а конструкторской и технологической документации присвоена литера О<sub>1</sub>. На опытную партию вагонов-платформ указанных выше моделей получен сертификат соответствия требованиям ТР ТС 001/2011 [17] и начата их эксплуатация.

В перспективе номенклатура грузов для перевозки в вагонах, разработанных на базе

модели 13-9599, может быть расширена. Для этого следует создать съемные устройства, в которых будет обеспечена возможность перевозки необходимого вида груза. Так, на базе вышеуказанного вагона уже разработаны универсальные вагоны-платформы моделей 13-9990 и 13-9990-02, которые могут перевозить штучные, лесные, строительные материалы, промышленное оборудование, колесную и гусеничную технику и другие грузы, в том числе сыпучие. Для перевозки сыпучих грузов вагон модели 13-9990-02 оборудуется бортами.

В результате проведенной работы был накоплен и обобщен опыт одновременной постановки на производство семейства вагонов, выполненных с применением единой несущей конструкции, а также разработаны и апробированы методические подходы по постановке на производство серии вагонов. В конечном итоге применение аналогичных подходов позволяет значительно снизить время и материальные затраты при постановке на производство грузовых вагонов.

ТАБЛИЦА 4. Объем испытаний вагонов

Вид испытаний	Модель вагона	
	13-9599	13-9599-02
На статическую прочность от вертикальной нагрузки	Два 20-футовых контейнера массой 73,2 т	1) 5 рулонов массой 66,6 т; 2) 2 рулона массой 61,0 т
На статическую прочность от горизонтальной нагрузки	Не проводятся	Проводятся
На прочность при соударении	1) порожний; 2) два 20-футовых контейнера массой 73,2 т	1) порожний; 2) 5 рулонов массой 66,6 т; 3) 2 рулона массой 61,0 т
Стационарные тормозные	Проводятся	Проводятся
Ходовые тормозные	Не проводятся	1) порожний; 2) 5 рулонов массой 66,6 т
Ходовые динамические	Два 20-футовых контейнера массой 73,2 т	1) порожний; 2) 5 рулонов массой 66,6 т
Функциональные. Оценка сопротивления усталости конструкции вагона	Два 20-футовых контейнера массой 73,2 т	1) 5 рулонов массой 66,6 т; 2) 2 рулона массой 61,0 т

**Библиографический список**

1. Сайт ПАО «Крюковский вагоностроительный завод». – URL : <http://www.kvsz.com> (дата обращения : 28.02.2017).

2. Сайт АО «Алтайвагон». – URL : <http://altaivagon.ru> (дата обращения : 28.02.2017).

3. Сайт АО «УК „Брянский машиностроительный завод“». – URL : <http://www.ukbmz.ru> (дата обращения : 28.02.2017).

4. Сайт АО «Научно-производственная корпорация „Уралвагонзавод“». – URL : <http://uralvagonzavod.ru> (дата обращения : 28.02.2017).

5. Сайт ООО УК «РэйлТрансХолдинг». – URL : <http://www.railtranholding.com> (дата обращения : 28.02.2017).

6. ГОСТ Р 51876–2008 (ИСО 1496-1:1990). «Контейнеры грузовые серии 1. Технические требования и методы испытаний. Часть 1. Контейнеры общего назначения». – М. : Стандартинформ, 2008.

7. ГОСТ 9238–2013. «Габариты железнодорожного подвижного состава и приближения строений». – М. : Стандартинформ, 2014.

8. Объемы перевозок в танк-контейнерах по сети РЖД продолжают расти // РЖД-Партнер. – 2016. – 12 апреля.

9. Обзор рынка контейнерных железнодорожных перевозок (август 2015 г.) // РЖД-Партнер. – 2015. – 25 сентября.

10. Морчиладзе И.Г. Новый вагон со съемным кузовом / И.Г. Морчиладзе // Железные дороги мира. – 2006. – № 2. – С. 32–33.

11. Даукша А.С. Совершенствование вагонов на основе использования съемных кузовов / А.С. Даукша // Материалы X Междунар. науч.-технич. конференции «Подвижной состав XXI века : Идеи, требования, проекты». – СПб. : ПГУПС, 2015. – С. 45–54.

12. Внедрение съемных кузовов вагонов на сети РЖД может быть выгодно собственнику уже на стадии закупки // РЖД-Партнер. – 2016. – 8 июля.

13. Съемные кузова снизят затраты на перевозку грузов // Гудок. – 2016. – Вып. 157 (26062). – 8 сентября.

14. Съемные кузова снизят затраты на перевозку грузов // Гудок. – 2017. – Вып. 33 (26172). – 1 марта.

15. ГОСТ 33211–2014. «Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам». – М. : Стандартинформ, 2016.

16. Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных) – М. : ГосНИИВ–ВНИИЖТ, 1996. – 317 с.

17. ТР ТС 001/2011. Технический регламент ТС. О безопасности железнодорожного подвижного состава.

**References**

1. *Sait PAO “Kryukovskiy vagonostroitelnyy zavod” [PJSC “Kryukovsky railway car building works” website].* – URL: <http://www.kvsz.com> (accessed: 28.02.2017). (In Russian)

2. *Sait AO “Altaivagon” [OJSC “Altaivagon” website].* – URL: <http://altaivagon.ru> (accessed: 28.02.2017). (In Russian)

3. *Sait AO “UK “Bryanskiy mashinostroitelnyy zavod”” [OJSC “MC “Bryansk machinery plant”” website].* – URL: <http://www.ukbmz.ru> (accessed: 28.02.2017) (In Russian)

4. *Sait AO “Nauchno-proizvodstvennaya korporatsiya “Uralvagonzavod”” [OJSC “Research and production corporation “UralVagonZavod”” website].* – URL: <http://uralvagonzavod.ru> (accessed: 28.02.2017). (In Russian)

5. *Sait ООО УК “RailTransHolding” [LLC MC “RailTransHolding”].* – URL: <http://www.railtranholding.com> (accessed: 28.02.2017). (In Russian)

6. *GOST R 51876–2008 (ISO 1496-1:1990). “Konteynery gruzoviye serii 1. Tekhnicheskiye trebovaniya i metody ispytaniy. Ch. 1. Konteynery obshchego naznacheniya” [Russian National Standard 51876–2008 (ISO 1496-1:1990). “Line 1 cargo containers. Technical requirements and testing methods. P. 1. Dry freight containers”].* Moscow, Standartinform Publ., 2008. (In Russian)

7. *GOST 9238–2013. “Gabaryty zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava i priblyzheniya stroyeniya” [State Standard 9238–2013. “Rolling stock dimensions and clearance to obstructions”].* Moscow, Standartinform Publ., 2014. (In Russian)

8. *Obyemy perevozok v tank-konteinerakh po sety RZhD prodolzhayut rasty [Traffic volume in tank*

containers continue to grow on Russian Railroads network]. *RZhD-Partner*, 2016, April, 12th. (In Russian)

9. Obzor rynka konteynernykh zheleznodorozhnykh perevozok [Container-on-flat-car market review] (August, 2015). *RZhD-Partner*, 2015, September, 25th. (In Russian)

10. Morchiladze I. G. Noviy vagon so syemnym kuzovom [New detachable body car]. *World railroads*, 2006, no. 2, pp. 32–33. (In Russian)

11. Dauksha A. S. Sovershenstvovaniye vagonov na osnove ispolzovaniya sjemnykh kuzovov [Upgrading of cars on the basis of detachable bodies' application]. *Materialy X Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Podvyzhoynoy sostav XXI veka: Idei, trebovaniya, proyekty"* [Materials of the 10<sup>th</sup> scientific and technical conference "Rolling stock of the XXIst century: Ideas, requirements, projects"]. Saint Petersburg, FGBOY VO PGUPS Publ., 2015, pp. 45–54. (In Russian)

12. Vnedreniye sjemnykh kuzovov vagonov na sety RZhd mozhet byt vygodno sobstvennyku uzhe na stadiya zakupky [Implementation of detachable bodies of cars on Russian Railroads' network might be profitable

for owner already on the stage of purchasing]. *RZhD-Partner*, 2016, July, 8th. (In Russian)

13. Sjemniye kuzova snyzyat zatraty na perevozku Грузов [Detachable bodies to reduce freight charges]. *Gudok*, 2016, issue 157 (26062), 8 September (In Russian)

14. Sjemniye kuzova snyzyat zatraty na perevozku Грузов [Detachable bodies to reduce freight charges]. *Gudok*, 2017, issue 33 (26172). (In Russian)

15. GOST 33211–2014. "Vagony gruzoviyе. Trebovaniya k prochnosti i dynamycheskym kachestvam" [State Standard 33211–2014. "Freight cars. Durability requirements and dynamic qualities"]. Moscow, Standartinform Publ., 2016. (In Russian)

16. Normy dlya rascheta i proyektirovaniya vagonov zheleznykh dorog MPS kolei 1520 mm (nesamokhodnykh) [The norms for calculation and construction of Ministry of railways railroad cars with 1520 mm gauge (non-self-propelled)]. Moscow, GosNIIV–VNI-IZhT Publ., 1996, 317 p. (In Russian)

17. TR TS 001/2011. *Tekhnicheskyy reglamnet TS. O bezopasnosti zheleznodorozhnogo podvyzhoynogo sostava* [TR MT 001/2011. Technical regulations for means of transportation. On the safety of a railway rolling stock]. (In Russian)

ЧЕПУРНОЙ Анатолий Данилович – доктор техн. наук, профессор, академик международной инженерной Академии, инженер-механик, заместитель генерального директора – директор по научно-техническому развитию, [cherurnoy@ukrth.ru](mailto:cherurnoy@ukrth.ru) (ООО УК «РэйлТрансХолдинг»); ДОДОНОВ Александр Владимирович – канд. техн. наук, заместитель директора, [a.dodonov@engcenter.ru](mailto:a.dodonov@engcenter.ru); \*АФАНАСЬЕВ Александр Евгеньевич – канд. техн. наук, заместитель руководителя отдела, [aae@engcenter.ru](mailto:aae@engcenter.ru) (ООО «ИЦПС»); ШЕВЧЕНКО Алексей Константинович – инженер-механик, главный инженер проекта, [niz.office@ukrth.com](mailto:niz.office@ukrth.com); ШЕЙЧЕНКО Роман Игоревич – главный конструктор проекта вагонов-цистерн, [r\\_sheychenko@mail.ru](mailto:r_sheychenko@mail.ru) (ООО «Научно-инженерный центр УК „РТХ“»).

УДК 624.21.093.004

**С. В. Чижов, Е. Б. Шестакова, Э. Т. Яхшиев, А. А. Антонюк****ПРИНЦИПЫ РАСЧЕТА ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НАПРЯЖЕННЫХ  
ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРОЛЕТНОГО СТРОЕНИЯ  
ПРИ ДИСПЕРСНОМ АРМИРОВАНИИ**

Дата поступления: 26.09.2016

Решение публикации: 24.04.2017

**Аннотация**

**Цель:** Определение методов расчетного обоснования дисперсно-армированных пролетных строений и научное обоснование метода возведения дисперсно-армированных железобетонных строений в условиях сухо-жаркого климата для высокоскоростных железнодорожных магистралей, выявление преимуществ, связанных с применением фибры на этапе строительства, определение способов снижения совокупных затрат при обеспечении качественных характеристик надежности пролетных строений на этапе строительства. **Методы:** Сравнительный анализ, математическое моделирование. **Результаты:** Определены принципы расчета дисперсно-армированных элементов пролетных строений мостов. Работа нацелена на решение прикладной задачи применительно к условиям Узбекистана и определяет параметры дисперсно-армированного железобетонного пролетного строения  $L_p = 66$  м, обусловленные техническим заданием на научное исследование с целью возведения мостового сооружения для высокоскоростной железнодорожной магистрали. **Практическая значимость:** Заключается в разработке методической основы для расчета пролетных строений из дисперсно-армированного железобетона.

**Ключевые слова:** Расчетное сопротивление, дисперсно-армированное пролетное строение, фибра, высокоскоростная магистраль, трещиностойкость, нагрузка, микростержневые элементы, сталефибробетон.

**Sergey V. Chyzhov**, Cand. Sci., associate professor, sergchizh@yandex.ru; **\*Yekaterina B. Shestakova**, associate professor, pvs@spbsmt.ru; **Elbek T. Yakhshiyev**, postgraduate student, elbek-8420@mail.ru; **\*Anatoliy A. Antonyuk**, postgraduate student, aaa.12.03.1992@mail.ru (Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University) DESIGN PRINCIPLES OF PRESTRESSED CONCRETE SPAN COPONENTS IN THE PROCESS OF DESPERSED REINFORCEMENT

**Summary**

**Objective:** To determine the calculating justification methods of fibre-reinforced spans and scientific evidence of the structural method of dispersed reinforced concrete constructions in drily-hot climate for high-speed mainline railroads, to reveal advantages connected with fibre application in the process of construction, to determine the ways of total costs reduction while providing qualitative reliability characteristics of spans under construction. **Methods:** Comparative analysis, mathematical modeling. **Results:** Calculating principles of fibre-reinforced elements of spans were specified. The study was aimed at application solving, with regard to climate in Uzbekistan, and determined the parameters of  $L_p = 66$  m fibre-reinforced concrete span, specified by the objective of scientific study concerning the bridgework for high-speed mainline railroad. **Practical importance:** Methodological foundation for fibre-reinforced concrete spans calculation was developed.

**Keywords:** Design resistance, disperse reinforced superstructure, fibre, high-speed network, crack growth resistance, load, micro bar elements, steel fibre concrete.

Известно, что основной принцип применения арматуры в сечении строительных конструкций связан с обеспечением их прочности при действии изгибающих, растягивающих нагрузок и воздействий и необходимостью усиления бетонных элементов, не обладающих достаточной структурной прочностью на растяжение и изгиб. В зависимости от назначения и особенностей работы строительных конструкций различают разные виды арматуры и способы усиления элементов.

Конструкция дисперсно-армированного предварительно напряженного железобетонного пролетного строения является сложной системой, предполагающей наличие и взаимообусловленный характер работы трех видов арматуры и связанных с ними способов армирования.

*Первый вид* – обычная горячекатаная стержневая арматура в виде стержней периодического или гладкого профиля, позволяющая провести усиление локальных участков конструкции в определенных местах, характеризующихся возникновением напряженного состояния элементов, не свойственных эффективной работе бетона. Недостаток вида армирования – локальный характер усиления, предполагающий неоднородность свойств конструкции и возможность образования трещин конструктивных трещин при действии знакопеременных нагрузок.

*Второй вид* – предварительно напряженная на бетон или упоры арматура, применяемая, как правило, в виде многопрядевых проволочных канатов, служит для создания поля компенсаторных сжимающих напряжений, обеспечивающих восприятие эксплуатационных нагрузок и воздействий и уменьшение или устранение вызванных ими изгибающих и растягивающих напряжений. Несмотря на преимущества способа, обуславливающего эффективность работы всей конструкции под действием постоянных и временных нагрузок, предварительное напряжение не обеспечивает однородности свойств конструкции и может привести к появлению конструктивных трещин в локальных зо-

нах передачи нагрузки и расположения элементов.

*Третий вид* – армирующие микростержневые элементы, сопоставимые с макроструктурой бетона, равномерно расположенные по всему объему конструкции, повышающие структурную прочность и однородность материала, обеспечивающие в установленных пределах восприятие изгибающих и растягивающих нагрузок и воздействий.

При проектировании дисперсно-армированного предварительно напряженного железобетонного пролетного строения необходимо предусмотреть эффективную совместную работу различных видов арматуры путем определения параметров, ее количества, расположения, обеспечивающую снижение вероятности образования конструктивных трещин. Основные исходные расчетные параметры подбора арматуры приведены в табл. 1.

Принципы расчета предварительно напряженных железобетонных элементов пролетного строения при дисперсном армировании методами предельных состояний первой и второй групп связаны с учетом особенностей, обусловленных применением металлической фибры и обеспечивающим ее преимуществами в части совершенствования свойств материала. Такими особенностями являются:

1) приведение хаотичного расположения фибры к направленному расположению путем использования системы вероятностных коэффициентов;

2) обоснованное применение расчетного сопротивления растяжению:

$$R_{fbt} = \lambda_{red} R_f \mu_f;$$

3) обоснованное использование расчетного сопротивления сжатию:

$$R_{fb} = R_b + \lambda_{red}^1 \varphi_f \mu_f R_f,$$

где  $\varphi_f$  – коэффициент эффективности косвенного армирования фибрами;  $\lambda_{red}^1$  – коэффициент приведения фибровой арматуры, вос-

ТАБЛИЦА 1. Основные исходные расчетные параметры подбора арматуры

Параметры	Ед. изм.	Значение
Расчетная длина пролета, $l_p$	м	66
Высота балки, $h$	м	3,75
Площадь сечения ПС, $A$	м <sup>2</sup>	6,133
Ширина дорожного покрытия, $B$	м	6
Толщина плиты, $h_{\text{п}}$	м	0,25
Толщина дорожного покрытия, $h_{\text{дп}}$	м	0,15
Удельный вес железобетона, $\gamma_{\text{жб}}$	т/м <sup>3</sup>	2,5
Удельный вес дорожного покрытия, $\gamma_{\text{дп}}$	т/м <sup>3</sup>	2,5
$\nu = 3,2728$ – эквивалентная нагрузка по схеме А2, модель <i>HSLM</i> , $\nu$ ( $a = 0,5$ )	т/м	3,2728
Эквивалентная нагрузка по схеме А2, модель <i>HSLM</i> , $\nu_0$ ( $a = 0,0$ )	т/м	3,574
Динамический коэффициент, $\mu = 1 + \varphi + \mu_2$		1,209
Расчетный момент постоянных нагрузок, $M_c$	тм	$1,082 \cdot 10^4$
Расчетный момент временной нагрузки, $M_v$	тм	$5,686 \cdot 10^3$
Полный расчетный момент $M = M_c + M_v$	тм	$1,651 \cdot 10^4$
Перерезывающая расчетная сила в опорном сечении от постоянных нагрузок, $Q_c$	тм	655,966
Перерезывающая расчетная сила в опорном сечении от постоянных нагрузок, $Q_v$	тм	376,323
Полная перерезывающая сила, $Q = Q_c + Q_v$	тм	$1,032 \cdot 10^3$
Прогиб максимальный, $l/2583$	м	0,026
Расчетное сопротивление фибробетона сжатию, $R_f$ , при $R_b = 20$ , $k_n = 0,470$ , $\mu_f = 0,025$	МПа	500,000
Расчетное сопротивление фибробетона растяжению, $R_{f\text{tser}}$	МПа	3,946
Модуль упругости арматуры, $E_s$	МПа	$2,100 \cdot 10^5$
Модуль упругости бетона В40, $E_b$	МПа	$36,000 \cdot 10^5$
Коэффициент приведения арматуры к бетону		65,833
Площадь сечения бетона, $A' = A$	м <sup>2</sup>	6,133
Момент инерции бетона, $I = I_b$	м <sup>4</sup>	13,990
Координата центра тяжести приведенного сечения, $y_{\text{cred}}$	м <sup>3</sup>	2,206
Статический момент площади приведенного сечения относительно наиболее растянутого волокна, $S_{\text{tred}}$	м <sup>3</sup>	4,123

принимаяющей сжимающие усилия;  $R_f$  – расчетное сопротивление бетона сжатию;

4) оценка расчетного сопротивления фибр с волновой анкерровкой:

$$R_{fbt} = \sigma_f \omega \mu_f \lambda_{or} \lambda_p,$$

где  $\sigma_f$  – максимальное напряжение в фибрах рассматриваемого сечения;  $\omega$  – площадь эпюры напряжений в фибрах.

При определении расчетных состояний по сравнению с железобетонными пролетными строениями обычного армирования обоснованное использование математического аппарата и расчетных схем связано с корректировкой вероятностных коэффициентов, обуславливающих взаимосвязь прочностных параметров прочности на сжатие и прочность при изгибе и растяжении. Ячейка сталевидного бетона пролетного строения требует построения отличных значений коэффициентов надежности и приведения от принятых в нормативной документации корреляций.

Указанные особенности определяют расчет предварительно напряженных элементов, расчет элементов на изгиб и действие продольной силы, расчет при действии поперечной силы, расчет элементов по раскрытию трещин, характеризующих отличие принципов подбора обычной и высокопрочной напрягаемой арматуры.

В рамках методов предельных состояний первой группы расчет осуществлялся по нормальным сечениям для середины пролета. Подбор арматуры производился в соответствии с условием

$$R_p = \frac{0,95 \cdot \sigma_{0,1} \cdot m_{\text{наз}}}{\gamma_{fm}},$$

где  $\sigma_{0,1}$  – условный предел армирующих элементов [1];  $\gamma_{fm} = 1,2$  – коэффициент надежности по материалу [2];  $m_{\text{наз}} = 0,9$  – коэффициент условий работы по назначению для железнодорожных мостов; 0,95 – коэффициент к условному пределу текучести.

Состояния конструкции пролетного строения находили исходя из фактических характе-

ристик принятой к расчету фибры. При этом фактическое расчетное сопротивление сжатию материала, являющегося наиболее показательным случаем зависимости свойств материала конструкции от свойств фибры, равно

$$R_{fb} = R_b + (\lambda_{red}^i \cdot \varphi_f \cdot \mu_f \cdot R_f),$$

здесь  $R_b = 20$  МПа – расчетное сопротивление бетону;  $R_f = 500$  МПа – расчетное сопротивление фибры;  $\lambda_{red}^i = 1,0$  – коэффициент приведения фибровой арматуры, воспринимающей сжимающие усилия;  $\mu_f = 0,025$  – коэффициент армирования;  $\varphi_f = 1,9$  – коэффициент эффективности косвенного армирования фибрами.

Расчетные положения наглядно демонстрируют зависимость прочностных свойств материала от характеристик дисперсного армирования, определяемых количественным содержанием металлической фибры в объеме бетона, ее прочностными свойствами, геометрическими параметрами по отношению к макроструктуре бетона, расположением. Так, при расчете коэффициента косвенного армирования от размера фибры  $L_f$  зависят существенные взаимосвязи, обуславливающие возможность качественного улучшения свойств пролетного строения:

$$\varphi_f = \frac{5 + L_f}{1 + 4,5 \cdot L_f},$$

где  $\varphi_f$  – коэффициент эффективности косвенного армирования фибрами;  $L_f$  – длина фибры.

Вместе с тем наиболее эффективно свойства фибры реализуются в случае растяжения. В предельной стадии работа фибр определяет наиболее значимую долю расчетного сопротивления на растяжение. Так, при вычислении расчетного сопротивления железобетона пролетных строений расчетное сопротивление фибры имеет вид [3–5]

$$R_{fbt} = m_1 \cdot (K_l \cdot k_{or}^2 \cdot \mu_f \cdot R_f \cdot (1 - \frac{l_{fan}}{l_f}) + 0,1 \cdot R_b \cdot (0,8 - \sqrt{2 \cdot \mu_f - 0,005})),$$

где  $R_{fbt}$  – расчетное сопротивление фибробетона растяжению;  $m_1$  – коэффициент фибрового армирования по объему;  $K_l$  – коэффициент, учитывающий влияние длины фибр;  $k_{or}^2$  – коэффициент, учитывающий ориентацию фибр в объеме элемента;  $\mu_f$  – коэффициент армирования;  $l_{fan}$  – длина анкеровки фибры;  $l_f$  – длина фибры;  $R_b$  – расчетное сопротивление бетона сжатию [6].

При этом так же, как и в случае реализации расчетного сопротивления фибробетона сжатию, эффективность дисперсного армирования при растяжении зависит от параметров фибры и связанных с ней геометрических параметров ячейки железобетона, которые обеспечивают улучшение свойств конструкции:

$$S_f = \frac{\pi \cdot d_f^2}{4},$$

$$d_{fred} = 1,13 \cdot \sqrt{S_f},$$

$$l_{fan} = \frac{\eta_f \cdot d_{fred} \cdot R_{fser}}{R_{bser}},$$

здесь  $S_f$  – площадь сечения фибры;  $d_{fred}$  – приведенный диаметр используемой фибры;  $l_{fan}$  – длина анкеровки фибры;  $R_{fser}$  – расчетное сопротивление осевому сжатию фибробетона;  $R_{bser}$  – расчетное сопротивление осевому сжатию железобетона;  $d_f$  – диаметр фибры;  $\eta_f$  – коэффициент, учитывающий совместное влияние фибрового и стержневого армирования.

Как показали результаты, заданные параметры армирования обеспечивают реализацию предельного состояния первой группы для пролетного строения длиной  $L_p = 66$  м. Предельный изгибающий момент определяется по формуле

$$\begin{aligned} M_{пред} = & R_b \cdot b \cdot x \cdot (h - a_s - 0,5 \cdot x) + \\ & + (R_b \cdot b'_f - b) \cdot h'_f \cdot (h - a_s - 0,5 \cdot x \cdot h'_f) + \\ & + R'_s \cdot A'_s \cdot (h - a_s - R_p \cdot A_p \cdot (a_p - a_s)), \end{aligned}$$

$$M_{пред} \cdot 10^2 > N \cdot (y_c - a_s + e),$$

где  $M_{пред}$  – предельный изгибающий момент;  $R_p$  – расчетные сопротивления напрягаемой арматуры растяжению;  $A_p$  – площадь сечения напрягаемой арматуры;  $R'_s$  – расчетные сопротивления ненапрягаемой арматуры растяжению;  $A'_s$  – площадь сечения ненапрягаемой арматуры;  $z$  – внутренние пары сил;  $x$  – высота сжатой зоны бетона;  $h_0$  – рабочая высота сечения.

При подборе высокопрочной арматуры дисперсно-армированного предварительно напряженного пролетного строения длиной  $L_p = 66$  м было учтено снижение предварительных напряжений в стержневой арматуре из-за потерь предварительного напряжения [7, 8].

В практике проектирования предварительно напряженных конструкций обычно выделяют два вида потерь. Первый вид – технологические потери, происходящие по причине термической обработки конструкции при изготовлении или вызванные деформациями упоров и/или анкеров. Они имеют место до передачи усилия на конструкцию. Второй вид потерь – потери конструктивного характера, связанные с объемными деформациями усадки, ползучести, релаксацией напряжений арматуры. Следует отметить, что применение сталефибробетона класса *B40* позволяет сократить потери напряжения по сравнению с аналогичным классом бетона без фибры ввиду повышения прочностного фактора. Сравнительная оценка величины сокращения потерь по данным расчетного анализа приведена в табл. 2.

Полные значения потерь предварительного напряжения были получены путем определения суммы составляющих. Нахождение усилия предварительного обжатия конструкции пролетного строения  $N_p$  при учете суммарных потерь напряжений предполагал учет сжимающих напряжений в ненапрягаемой арматуре. Предполагалось, что такие напряжения эквивалентны сумме потерь деформациям ползучести и усадки дисперсно-

ТАБЛИЦА 2. Сравнительная оценка величины сокращения потерь в случае применения дисперсно-армированной конструкции по данным расчетного анализа

Вид потери	Основные расчетные зависимости	Значение, МПа		Снижение, %
		Железобетон	Сталефибробетон	
Релаксация потери напряжения	$R_{ph} = 0,95 \cdot R_{урп} = 1,568 \cdot 10^3,$ $(0,22 \cdot \frac{\sigma_p}{R_{ph}} - 0,1) \cdot \sigma_p$ $\sigma_1 = \frac{\quad}{2}$	48,672	40,225	21
Деформация анкеров у натяжных устройств	$\Delta l_1 = 0,002,$ $\Delta l_2 = 0,008,$ $f = 0,200,$ $k = 0,005 \text{ рад/пм},$ $\sigma_2 = \frac{2 \cdot (\Delta l_1 + \Delta l_2)}{d} \cdot E_p$	121,68	106,738	14
Трение арматуры	$\sigma_3 = \sigma_p \cdot \left(1 - \frac{1}{e^{\omega \cdot x + \delta \cdot \theta}}\right) = \begin{bmatrix} 0,000 \\ 32,012 \\ 62,260 \\ 91,721 \\ 121,271 \end{bmatrix}$	39,927	30,245	32
Усадка бетона при натяжении	$\sigma_4$	43,4	35	24
Ползучесть бетона	$R_{pb} = 0,8 \cdot R_b = 16,$ $\sigma_{bp} = 0,5, \sigma' = 1,0,$ $\frac{\sigma_{bp}}{R_{bp}} = 0,031,$ $\sigma_5 = \frac{150 \cdot \alpha' \cdot \sigma_{bp}}{R_{bp}}$	6,3288	4,688	35
Снижения суммарных потерь	$\sigma_p = \sigma_p - \sigma_\Sigma = \begin{bmatrix} 1,006 \cdot 10^3 \\ 1,025 \cdot 10^3 \\ 1,044 \cdot 10^3 \\ 1,021 \cdot 10^3 \\ 991 \cdot 798 \end{bmatrix},$ $\sigma_\Sigma = \begin{bmatrix} \sigma_\Sigma 0 \\ \sigma_\Sigma 17 \\ \sigma_\Sigma 33 \\ \sigma_\Sigma 50 \\ \sigma_\Sigma 67 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 186,650 \\ 167,961 \\ 148,999 \\ 171,633 \\ 201,184 \end{bmatrix}$	25,8, но не менее 100		

армированного бетона для этой арматуры [8–12].

Зона предварительного напряжения на дисперсно-армированный бетон для арматуры без устройства дополнительных анкеров может быть определена как

$$l_p = \frac{\sigma_{sp} A_s}{R_{bond} u_s},$$

где  $\sigma_{sp}$  – напряжения в напрягаемой арматуре;  $R_{bond}$  – прочность связи высокопрочной арматуры с дисперсно-армированным бетоном.

При этом предполагалось, что такой локальный участок не может быть менее  $10d_s$  и 200 мм, а в случае применения высокопрочной арматуры – не менее 300 мм:

$$R_{bond} = \eta_1 \eta_2 R_{fbt},$$

где  $R_{fbt}$  – расчетное сопротивление дисперсно-армированного бетона на растяжение;  $\eta_1$  – коэффициент шероховатости (поверхности) арматуры, равный: 1,5 – для гладких стержней, 1,8 – для холоднодеформированных стержней периодического профиля, 2,5 – для горячека-

танных, обработанных термомеханическим способом, стержней периодического профиля;  $\eta_2$  – коэффициент влияния диаметра арматуры, равный: 1,0 – для диаметра стержней  $d_s \leq 32$  мм, 0,9 – для диаметра стержней 36 и 40 мм;  $A_s, u_s$  – площадь и периметр стержня.

Расчетные параметры подбора высокопрочной арматуры принимались из условия плавной передачи нагрузки, исключающего хрупкое разрушение макроструктурных элементов дисперсно-армированной ячейки бетона [13–15]. Для решения прикладной задачи определения количества высокопрочной арматуры дисперсно-армированного предварительно напряженного железобетонного пролетного строения длиной  $L_p = 66$  м была получена зависимость потерь напряжений (рис. 1).

По результатам подбора арматуры с учетом потерь напряжения было определено требуемое количество элементов высокопрочного армирования и разработана схема их расположения в конструкции дисперсно-армированного пролетного строения.

Параметры высокопрочного армирования предполагают комплексный учет работы всех видов арматуры, используемых в конструкции

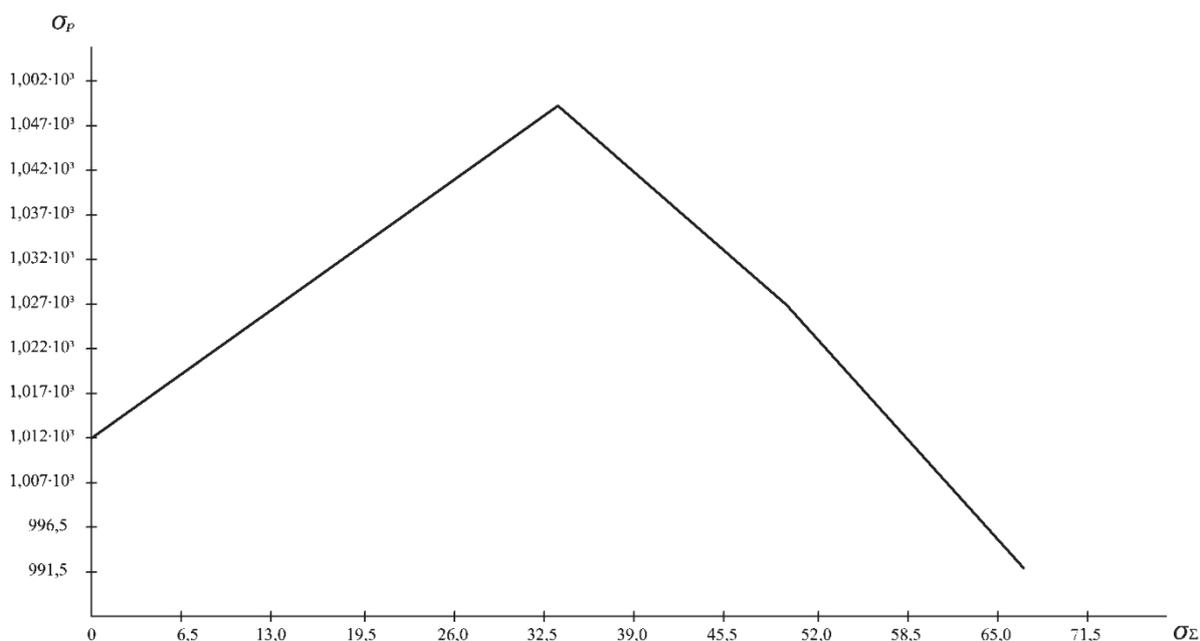


Рис. 1. Зависимость потерь напряжений для подбора высокопрочной арматуры дисперсно-армированного пролетного строения длиной  $L_p = 66$  м

дисперсно-армированного предварительно напряженного железобетонного пролетного строения.

Определенные фактические значения параметров армирования с учетом особенностей фибры, предполагаемой к использованию в дисперсно-армированном пролетном строении, были приняты во внимание в расчетных состояниях конструкции, связанных с предварительным напряжением конструкции. Так, воздействие от 6 пучков прямого очертания, расположенных в нижней плите, моделируется 6 силами (по 340 тс) на опорной диафрагме в месте их непосредственной анкеровки (рис. 2).

Воздействие от 8 полигональных пучков было задано системой вертикальных (по  $P =$

$= 53$  тс) сил, приложенных в местах анкеровки на опорных диафрагмах и местах перегиба в приливах в четвертях пролета, и горизонтальными силами (по  $N = 336$  т), приложенных в местах анкеровки на опорных диафрагмах.

Воздействие предварительного напряжения в верхней плите пролетного строения было задано сосредоточенными горизонтальными силами (по  $N = 72$  т) с шагом  $d = 4,5$  м, приложенными по торцам плиты, и равномерно распределенными по линии нагрузками интенсивностью  $q = 0,29$  тс/м (на торцах плиты),  $q = 1,15$  т/м – над стенками,  $q = 0,86$  тс/м – в середине плиты (рис. 3).

Воздействие предварительного напряжения в стенках пролетного строения от пред-

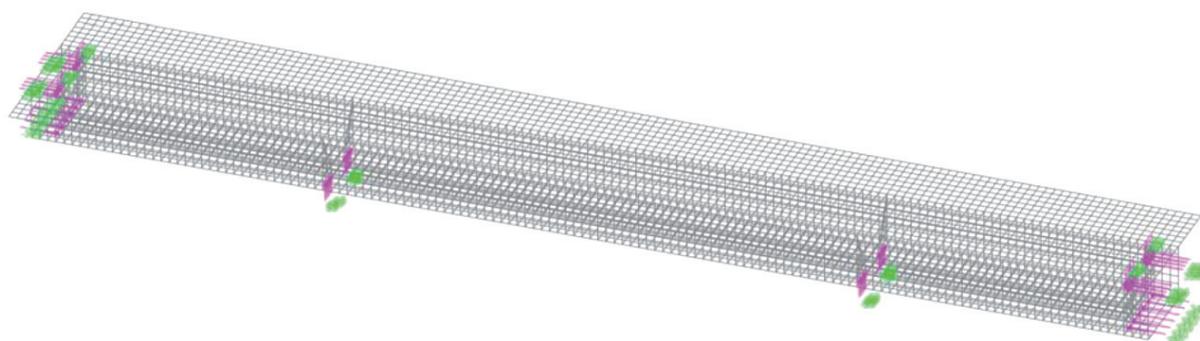


Рис. 2. Нагрузка от системы сил, эквивалентной воздействию предварительного напряжения в бетоне пролетного строения от высокопрочных прядей

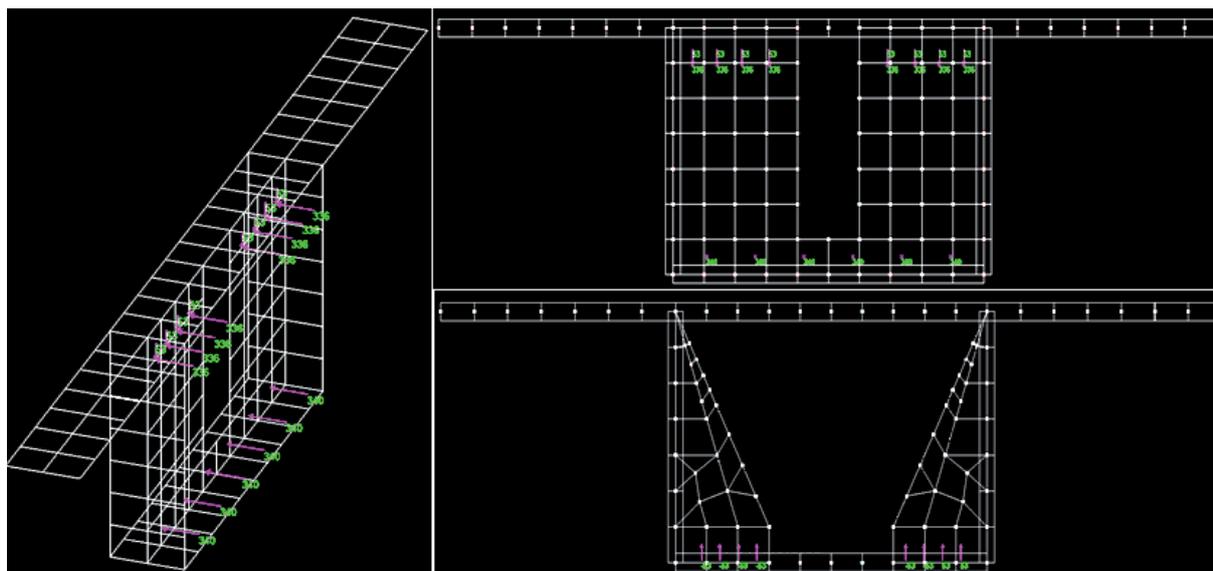


Рис. 3. Вертикальная нагрузка, приложенная в месте перегибов внешних пучков

напряженных хомутов задано вертикальными сосредоточенными силами (по  $P = 37$  тс) с шагом  $d = 2$  м, приложенными к торцам стенок.

Как показывают результаты исследования, эффективная работа дисперсно-армированного предварительно напряженного железобетонного пролетного строения длиной  $L_p = 66$  м связана с взаимообусловленными принципами определения параметров систем армирования, обычной, высокопрочной, микроармированной арматуры путем проведения расчетов предельными состояниями первой и второй групп на заданные нагрузки и воздействия.

Преимущества дисперсно-армированных пролетных строений могут быть реализованы при учете фактических характеристик фибры в расчетных состояниях элементов конструкции на изгиб, на действие продольной и поперечной сил, а также при определении величины раскрытия трещин.

Обоснованное применение математического аппарата и расчетных схем различных систем армирования связано с корректировкой вероятностных коэффициентов, обуславливающих взаимосвязь прочностных параметров на сжатие, растяжение, изгиб, закрепленных в нормативной документации для железобетонных конструкций, изготавливаемых без фибры.

Сравнительная оценка величины уменьшения потерь напряжений при использовании дисперсно-армированной конструкции по данным расчетного анализа позволяет выявить преимущества, определенные эффективностью работы высокопрочной арматуры с металлической фиброй. В этом случае суммарные потери напряжения по сравнению с предварительно напрягаемым железобетоном могут быть сокращены по данным сравнительного расчета до 25,8%.

Дальнейшее совершенствование принципов расчета аналогичных по сравнению с рассматриваемыми конструкциями пролетных строений может быть связано с уточнением математического расчетного аппарата, исхо-

дя из структурной взаимосвязи прочностных свойств дисперсно-армированной ячейки бетона и фибры, предполагающих возможность обеспечения однородности на уровне макроструктуры бетона.

### Библиографический список

1. Бычковский Н. Н. Железобетонные мосты / Н. Н. Бычковский. – Саратов : Саратов. гос. техн. ун-т, 2006. – 260 с.
2. Комохов П. Г. Бетоны повышенной трещиностойкости и морозостойкости / П. Г. Комохов. – Л. : Знание ; ЛДНТП, 1980. – 168 с.
3. Мамажанов Р. Результаты обследования и испытания железобетонных мостов, эксплуатируемых в условиях Средней Азии / Р. Мамажанов // Надежность искусственных сооружений. – М. : Транспорт, 1988. – С. 97–109.
4. СНиП 2.05.03–1984. «Мосты и трубы». – М. : Госстрой России ; ГУП ЦПП, 1998. – 214 с.
5. СП 52-104–2006. «Сталефибробетонные конструкции». – М. : НИИЖБ и ОАО НИЦ «Строительство», 2010. – 68 с.
6. Милованов А. Ф. Расчет железобетонных конструкций для условий жаркого климата / А. Ф. Милованов, Х. У. Камбаров. – Ташкент : Укитувчи, 1991. – 818 с.
7. Кудзис А. П. Оценка надежности железобетонных конструкций / А. П. Кудзис. – Вильнюс : Мокслас, 1985. – 156 с.
8. Новак Ю. В. К оценке надежности метода расчета наклонных сечений железобетонных конструкций / Ю. В. Новак // Надежность конструкций мостов и тоннелей : сб. науч. тр. – М. : МАДИ, 1986. – С. 23–26.
9. Орлов В. Г. Безбалластное мостовое полотно железнодорожных мостов / В. Г. Орлов, А. А. Дорошкевич, В. В. Батюня // Путь и путевое хозяйство. Российские железные дороги (Москва). – 2008. – № 1. – С. 25–26.
10. Осипов В. О. Содержание, реконструкция, усиление и ремонт мостов и труб / В. О. Осипов, Ю. Г. Козьмин, А. А. Кирста, Э. С. Карапетов, Ю. Г. Рузин ; под ред. В. О. Осипова, Ю. Г. Козьмина. – М. : Транспорт, 1996. – 471 с.

11. Руководство по определению грузоподъемности железобетонных пролетных строений железнодорожных мостов / МПС. – М. : Транспорт, 1989. – 127 с.

12. Смирнов В. Н. Особенности высокоскоростного движения железнодорожных экспрессов по мостам / В. Н. Смирнов. – СПб. : ПГУПС, 2015. – 57 с.

13. Честной В. М. Железобетонные мосты : температура и надежность / В. М. Честной. – М. : Транспорт, 1991. – 135 с.

14. Чижов С. В., Яхшиев Э. Т. О требованиях к мостам при высокоскоростном движении // Изв. Петерб. гос. ун-та путей сообщения. – 2014. – Вып. 4 (41). – С. 87–91.

15. Чижов С. В. Анализ системных факторов безотказной работы железобетонных пролетных строений по данным натурных обследований / С. В. Чижов, Э. Т. Яхшиев // Интернет-журн. «Наукоеведение». – 2016. – Т. 8, № 4 (35). – URL : <http://naukovedenie.ru/PDF/05TVN516.pdf> (дата обращения : 04.03.2017).

## References

1. Bychkovsky N. N. *Zhelezobetonniye mosty [Reinforced-concrete bridges]*. Saratov, Saratov State Technical University Publ., 2006, 260 p. (In Russian)

2. Komokhov P. G. *Betony povyshennoy treshynostoikosty i morozostoikosty [Advanced crack growth and freeze resistance concrete]*. Leningrad, Leningrad Science and Technical Promotion Organization Publ., 1980, 168 p. (In Russian)

3. Mamazhanov R. *Resultaty obsledovaniya i ispytaniya zhelezobetonnykh mostov, ekspluatiruyemykh v usloviyakh Sredney Azii [Survey data on scanning and testing of reinforced-concrete bridges, exploited in the conditions of Middle Asia]*. *Reliability of artificial constructions*. Moscow, Transport Publ., 1988, pp. 97–109. (In Russian)

4. SNiP 2.05.03–1984. “*Mosty i trubyy*” [BC 2.05.03–1984. “*Bridges and tubing*”]. Moscow, The Russian Federation State committee for construction, State Unitary Enterprise the centre of design products Publ., 1998, 214 p. (In Russian)

5. SP 52-104–2006. “*Stalefibrobetonnyye konstruktсии*” [BA 52-104–2006. “*Steel fibre reinforced concrete constructions*”]. Moscow, Research design-and-engineering technological institute of concrete and ferro-concrete and OJSC Research center “Building” Publ., 2010, 68 p. (In Russian)

6. Mylovanov A. F. & Kambarov K. U. *Raschet zhelezobetonnykh konstruksiy dlya usloviy zharkogo klimata [Structural calculations of reinforced concrete constructions for hot climate conditions]*. Tashkent, Ukytuvchy Publ., 1991, 818 p. (In Russian)

7. Kudzis A. P. *Otsenka nadezhnosity zhelezobetonnykh konstruksiy [Reliability estimation of reinforced concrete constructions]*. Vilnius, Mokslas Publ., 1985, 156 p. (In Russian)

8. Novak Y. V. *K otsenke nadezhnosity metoda rascheta naklonnykh secheniy zhelezobetonnykh konstruksiy [On reliability estimation of oblique sections and reinforced concrete constructions design method]*. *Nadezhnost konstruksiy mostov i tonnelley: sbornyk nauchnykh trudov [Design reliability of bridges and tunnels: coll. papers]*. Moscow, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University Publ., 1986, pp. 23–26. (In Russian)

9. Orlov V. G., Doroshkevich A. A. & Batiunya V. V. *Bezbalastnoye mostovoye polотно zheleznodorozhnykh mostov [Ballastless deck]*. *Put i putevoye khozyajstvo. Rossiyskiye zhelezniye dorogy (Moskva) [Track and track facilities. Russian railroads (Moscow)]*, 2008, no. 1, pp. 25–26. (In Russian)

10. Osypov V. O., Kozmyn Y. G., Kirsta A. A., Karapetov E. S. & Ruzin Y. G. *Soderzhaniye, rekonstruktсия, usyleniye i remont mostov i trub [Maintenance, reconstruction, reinforcement and bridges and tubing servicing]*. Moscow, Transport Publ., 1996, 471 p. (In Russian)

11. *Rukovodstvo po opredeleniju gruzopodjennosti zhelezobetonnykh proletnykh stroyeniy zheleznodorozhnykh mostov [Study guide on carrying load estimation of concrete slab spans of railway bridges]*. Moscow, Transport Publ., 1989, 127 p. (In Russian)

12. Smyrnov V. N. *Osobennosti vysokoskorostnogo dvyzheniya zheleznodorozhnykh ekspressov po mostam [The specificities of railway express trains movement on bridges]*. Saint Petersburg, Petersburg State Transport University Publ., 2015, 57 p. (In Russian)

13. Chesnoy V. M. *Zhelezobetonniye mosty: temperatura i nadezhnost [Reinforced-concrete bridges: temperature and reliability]*. Moscow, Transport Publ., 1991, 135 p. (In Russian)
14. Chyzhov S. V. & Yakhshiyev E. T. O trebovaniyakh k mostam pry vysokoskorostnom dvizhenii [On high-speed movement bridge requirements]. *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2014, no. 4 (41), pp. 87–91. (In Russian)
15. Chyzhov S. V. & Yakhshiyev E. T. Analiz sistemnykh faktorov bezotkaznoy raboty zhelezobetonnykh proletnykh stroyeniy po dannym naturnykh obsledovaniy [System factors analysis of trouble-free operation of reinforced concrete spans on the basis of on-site investigation data]. *Online-journal "Science of science"*, 2016, vol. 8, no. 4 (35). – URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/05TVN516.pdf> (accessed: 04.03.2017). (In Russian)

ЧИЖОВ Сергей Владимирович – канд. техн. наук, доцент, [sergchizh@yandex.ru](mailto:sergchizh@yandex.ru); \* ШЕСТАКОВА Екатерина Борисовна – доцент, [pvs@spbsmt.ru](mailto:pvs@spbsmt.ru); ЯХШИЕВ Элбек Толипович – аспирант, [elbek-8420@mail.ru](mailto:elbek-8420@mail.ru); \* АНТОНЮК Анатолий Анатольевич – аспирант, [aaa.12.03.1992@mail.ru](mailto:aaa.12.03.1992@mail.ru) (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 656.21

**А. С. Шепель****ДИНАМИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ПОКАЗАТЕЛЕЙ,  
ОПРЕДЕЛЯЮЩАЯ ТЕХНИЧЕСКУЮ ОСНАЩЕННОСТЬ  
ИНФРАСТРУКТУРЫ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ СТАНЦИЙ**

Дата поступления: 15.03.2017

Решение о публикации: 24.04.2017

**Аннотация**

**Цель:** Получение зависимостей между техническим оснащением инфраструктуры и пропускной способностью железнодорожной станции для определения требуемого путевого развития, а также для оценки эффективности и оптимизации эксплуатационной работы существующих станций.

**Методы:** Основаны на синтезе и анализе работы железнодорожных станций, а также используются теоретические основы имитационного моделирования транспортных систем. **Результаты:** Определены параметры, влияющие на наличную и проектную пропускную способность станции. Установлены причинно-следственные связи событий, вызывающих переход железнодорожной техники в неработоспособное состояние. Предложена динамическая система показателей, которая позволит более точно решить задачи: определения необходимого и достаточного путевого развития станции для пропуска заданных размеров движения, оценки наиболее вероятных размеров движения поездов по станции и ее загрузки. Найдены критерии между входящими и выходящими потоками по станции, задержками и простоями поездов, которые дают возможность анализировать предлагаемую техническую оснащенность и эксплуатационную работу железнодорожной станции. **Практическая значимость:** На основе полученных зависимостей возможно определять оптимальное соотношение между временем простоев поездов на станционных путях, резервом времени применения элементов путевого развития и количество реализованных маршрутов по железнодорожной станции, а также определение необходимого путевого развития станции под заданные размеры движения поездов. Результаты исследований могут быть применены при проектировании новых железнодорожных станций, а также для оптимизации эксплуатационной работы и реконструкции существующих станций.

**Ключевые слова:** Динамическая система показателей, определяющая техническую оснащенность инфраструктуры железнодорожных станций, пропускная способность, имитационное моделирование, простои, задержки, отклонения, путевое развитие.

**Alexander S. Shepel**, assistant, alexandr.wm@yandex.ru (Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University) DYNAMIC SYSTEM OF INDICES DETERMINING TECHNICAL EQUIPMENT OF RAILROAD INFRASTRUCTURE

**Summary**

**Objective:** To obtain technical equipment of infrastructure and terminal capacity relations in order to determine the necessary gridiron of tracks, as well as to assess efficiency and optimization of existing stations' functioning. **Methods:** Based on synthesis and analysis of stations' operation, as well as transport systems' simulation modeling theory. **Results:** Parameters, influencing the present and designed terminal capacity, were identified. Cause-and-effect relations of events, resulting in railway machinery being brought in non-serviceable condition, are established. Dynamic system of indices was suggested, allowing for a more precise solution of the following tasks: to identify the necessary and sufficient gridiron of

tracks for passing the specified amount of traffic, to assess the most probable amount of traffic at the station and its loading. Criteria of input and output flows of traffic at the station, as well as lay-over and trains' delays were stated, the former make it possible to analyze the suggested technical equipment and station functioning. **Practical importance:** On the basis of obtained relations it is possible to specify optimum relationship of trains' lay-over time at station yards, the reserve of gridiron of tracks' elements time in use and the number of routes being implemented at the station, as well as the necessary gridiron of tracks within the given amount of train traffic. The results of the research may be applied in designing new railway stations, as well as optimization of station functioning and reconstruction of the existing stations.

**Keywords:** Dynamic system of indices, determining technical equipment of railroad infrastructure, capacity, simulation modeling, lay-over, delays, deflections, gridiron of tracks.

## Введение

Внедрению новых промышленных мощностей сопутствует развитие схем железнодорожных станций. При проектировании могут возникать риски ошибок, не позволяющие получить желаемого результата. Применение различных методов при построении схем путевого развития происходит в рамках подходов, которые возможно и необходимо оптимизировать. Теория расчета путевого развития и пропускной способности станций описаны в работах [1–8].

Пропускная способность – одна из основных характеристик технического оснащения инфраструктуры железнодорожной станции (ЖС), точное определение которой позволяет эффективно планировать грузовые и пассажирские перевозки, использовать возможности подвижного состава и инфраструктуры. В литературе встречается большое количество формулировок о понятии пропускной способности, однако единого устоявшегося общепринятого ее определения до настоящего времени не существует. Международный союз железных дорог (UIC) в 2004 г. пришел к выводу, что однозначное определение пропускной способности давать не имеет смысла [9]. Очевидно, что данная ситуация сложилась в силу того, что пропускная способность, как нормативный параметр, устанавливается аналитически-детерминированным методом и используется для решения следующих принципиально разных типов задач:

1) определение необходимого и достаточного технического оснащения инфраструктуры ЖС;

2) оценка эффективности и оптимизация эксплуатационной работы существующих ЖС.

В общем виде пропускную способность транспортных устройств рассчитывают по формуле

$$N = \frac{A}{a} \text{ (пар поездов),}$$

в которой  $A$  – общая производительность устройства;  $a$  – производительность устройства, расходуемая на поезд (пару поездов).

На железнодорожном транспорте числитель такой формулы часто раскрывают следующим образом:

$$A = (1440 - T_{\text{техн}}) \cdot \alpha_n,$$

где  $T_{\text{техн}}$  – продолжительность свободного от поездов промежутка времени, предоставляемого в графике движения для выполнения работ по текущему содержанию пути, устройств и сооружений, мин;  $\alpha_n$  – коэффициент, учитывающий влияние отказов в работе технических устройств на наличную пропускную способность перегонов.

Таким образом, при определении пропускной способности решаются две основные проблемы: необходимость резерва суточного бюджета времени для выполнения работ по текущему содержанию пути, устройств и со-

оружений и учет перехода железнодорожной техники в неработоспособное состояние. Однако учитывать эти параметры, как предлагает Инструкция по расчету наличной пропускной способности железных дорог [10], аналитическим методом невозможно, и следует обратить внимание на другой инструмент – имитационное моделирование [11]. Но для того чтобы моделировать и, таким образом, устанавливать техническое оснащение инфраструктуры ЖС, нужно найти параметры моделирования, которые будут принимать во внимание события, связанные с переходом железнодорожной техники в неработоспособное состояние. На основании полученных параметров можно будет создать систему, которая позволит определять оптимальное техническое оснащение инфраструктуры ЖС.

### Параметры, влияющие на пропускную способность ЖС

Перед тем как обозначить параметры технического оснащения инфраструктуры ЖС, необходимо установить параметры, влияющие на пропускную способность ЖС, так как техническое оснащение характеризует пропускную способность [12]. Чтобы найти иско-

мые параметры, нужно рассмотреть события, которые вызывают переход железнодорожной техники в неработоспособное состояние.

В сфере железнодорожного транспорта существует много близких по смыслу понятий: отказ, технологическое нарушение, инцидент, задержка, отклонение, простой, издержки. Стоит понимать, что эти термины не синонимы, а находятся в жесткой иерархии (рис. 1). В соответствии с [13] наиболее общим понятием является инцидент, под которым понимают событие, вызывающее переход железнодорожной техники в неработоспособное состояние или отклонение от заданных режимов выполнения технологических процессов на инфраструктуре ОАО «РЖД», в том числе по причине внешнего воздействия, и повлекшее за собой нарушение графика движения поездов.

По видам событий, их вызвавших, различают два вида инцидентов:

- отказы в работе технических средств, если причиной нарушения графика движения поездов служит нарушение работоспособного состояния железнодорожной техники;
- технологические нарушения, если причина нарушения графика движения поездов – несоблюдение технологии перевозочного процесса.

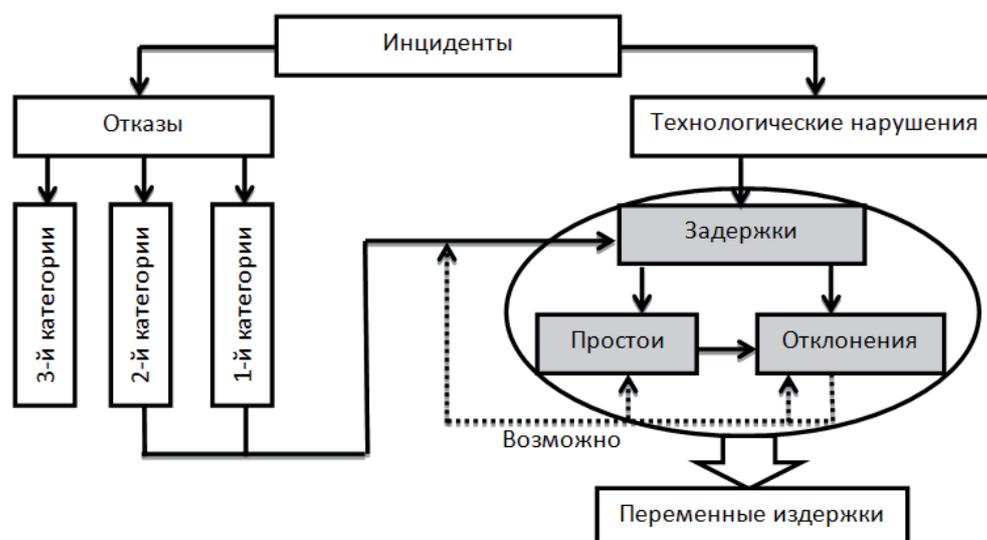


Рис. 1. Параметры, определяющие пропускную способность

Отказ в общем значении – это событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта [14]. Для каждого подразделения ОАО «РЖД» вводится свое понятие отказа. Так, для Дирекции управления движением к отказам относится: неисправность технических средств или программных ресурсов, возникшая вследствие нарушения порядка пользования ими работниками станции (на участках с диспетчерской централизацией – поездным диспетчером) и требующая для восстановления их работоспособности привлечения работников смежных хозяйств [15].

В зависимости от последствий отказов в работе технических средств вводится классификация по трем категориям. Отказы 1-й и 2-й категорий приводят к задержке поезда на перегоне или станции, а 3-й категории – не имеют последствий (учет производится первоначально в рамках автоматизированных систем управления хозяйств).

Технологическое нарушение – это действие или бездействие оперативного персонала в нарушение требований действующих нормативных актов федерального органа исполнительной власти в области железнодорожного транспорта, правил, инструкций и иных нормативных документов ОАО «РЖД», которое явилось причиной задержки поезда, при исправно действующих технических средствах [13].

Часть отказов и все технологические нарушения вызывают задержки. Задержка – это превышение времени хода поезда по перегону или стоянки на станции, установленных графиком движения поездов [13]. При этом задержки приводят к уже образовавшимся и возможным *отклонениям от технологического времени обработки или графика движения поездов* (далее отклонениям) и простоям. Простой – временная приостановка работы по причинам производственного или организационно-технического характера, следовательно, это незаконченное действие и результатом простоя будет отклонение. Таким образом, отклонение есть конечный результат перехода железнодорожной техники

в неработоспособное состояние, но при этом может влиять на дальнейшую поездную обстановку, вследствие чего могут возникать новые задержки, простои и отклонения (на рис. 1 даны пунктирными линиями).

Задержки, простои, отклонения в дальнейшем ведут к переменным издержкам, которые являются составной частью транспортных издержек и соответственно определяют себестоимость перевозок.

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

- инциденты, отказы, технологические нарушения – это события, повлекшие за собой переменные издержки;
- задержки, простои, отклонения – конкретные параметры переменных издержек;
- задержки и отклонения имеют природу причинно-следственных связей, следовательно, учитывать их как итоговые параметры для определения пропускной способности ЖС не нужно (так как они характеризуют поездопоток), но они необходимы, для того чтобы понять, в какой момент времени и из-за чего возникают сбои в работе;
- для установления пропускной способности ЖС (помимо резерва суточного бюджета времени) следует принимать во внимание параметр «простои», так как он определяет непроизводительное использование устройств ЖС.

### **Необходимые параметры (множество X) для создания динамической системы показателей технической оснащенности инфраструктуры ЖС**

Для создания искомой системы показателей требуются группы параметров, которые характеризуют:

- 1) техническое оснащение инфраструктуры ЖС;
- 2) пропускную способность;
- 3) учет причинно-следственных связей задержек поездов.

В первую группу параметров включаются «простои» и «резерв суточного бюджета времени». Во второй группе стоит сделать разделение привычного понятия пропускной способности на входящий поток (количество маршрутов прибывающих поездов на станцию), выходящий поток (количество маршрутов отправляющихся поездов со станции) и маневровый поток (количество маневровых маршрутов по станции). Это позволит оценивать пропускную способность не с точки зрения постоянной величины, а как многомерную динамическую величину, которая может изменяться не только от условий эксплуатации и технического оснащения инфраструктуры, но и от задач пропуска необходимых категорий поездов и влияния перерабатывающей способности станции. В третьей группе следует рассматривать параметр «задержки», а именно их количество и продолжительность. При этом необходимо давать комментарии, которые разъясняют, к чему в дальнейшем приводит каждая задержка поезда.

### Пример динамической системы показателей, определяющей техническую оснащенность инфраструктуры ЖС

Допустим, заданы следующие условия:

- путевое развитие ЖС;
- категории пропускаемых по станции транспортных единиц ( $k$ ):  $A, B, C, D, E$ ;
- размеры движения транспортных единиц по ЖС;
- технология работы ЖС.

Требуется:

- проверить возможность пропуска исходных категорий поездов по станции в заданном объеме;
- определить необходимую и достаточную техническую оснащенность инфраструктуры ЖС.

Решение поставленных задач будет происходить в три этапа (рис. 2).

*I этап. Имитационное моделирование.*

Данный этап должен полностью решаться средствами имитационного моделирования. Основные цели:

- расчет времени занятия станционных путей и элементов путевого развития заданными размерами движения;
- расчет продолжительности простоя на станционных путях для каждой рассчитываемой категории транспортных единиц;
- определение количества задержек поездов, установление причинно-следственных связей (цепочки событий: от возникновения задержки до отклонения).

*II этап. Вывод показателей.*

На этом этапе должен производиться расчет резерва времени использования элементов путевого развития и вывод всех параметров системы (табл. 1, 2).

Введем следующие условные обозначения:  $N_k, N'_k, N''_k$  – количество маршрутов категории  $k$ ;  $P_i$  – время простоев составов на  $i$ -м пути;  $R_i$  – резерв времени использования  $i$ -го пути;  $R'_e$  – резерв времени использования эле-

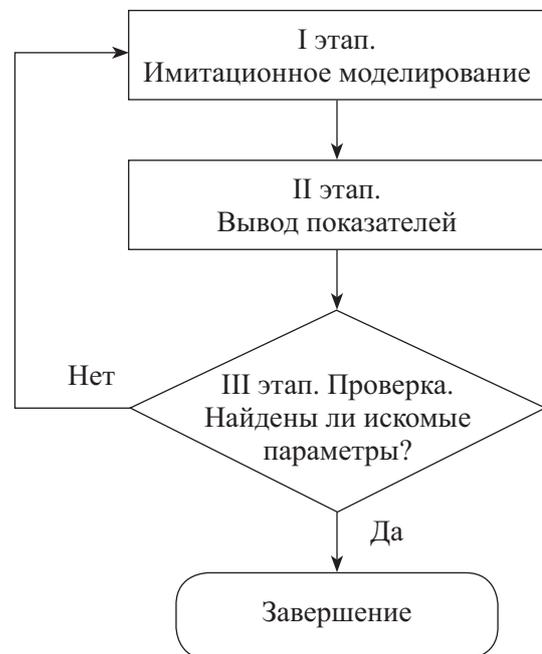


Рис. 2. Алгоритм работы составления динамической системы показателей, определяющей техническую оснащенность инфраструктуры железнодорожных станций

ТАБЛИЦА 1. Динамическая система показателей, определяющая техническую оснащенность инфраструктуры ЖС. I часть

Категория транспортных единиц	Входящий поток	Выходящий поток	Маневровый поток	Количество задержек транспортных единиц	Продолжительность задержки транспортных единиц	Причины и следствия задержек
<i>A</i>	$N_A$	$N'_A$	$N^m_A$	$F_A$	$H^1_A$	1. Задержка по прибытию поезда категории <i>A</i> на станцию. <i>Причина:</i> занят путь приема, предусмотренный по технологии. Поезд прибывает на боковой путь. Задано новое ограничение скорости по стрелочному переводу. Увеличено время прибытия с перегона на станцию 2. Задержка поезда категории <i>D</i> с пути отправления. <i>Причина:</i> занятия стрелочной горловины прибывающим поездом. Дальнейшее отправление задержано. <i>Причина:</i> прибытие поезда категории <i>C</i> с более высоким приоритетом 3. Увеличен простой поезда категории <i>D</i>
					.....	
					$H^y_A$	
					.....	
					$H^z_A$	
<i>B</i>	$N_B$	$N'_B$	$N^m_B$	$F_B$		
<i>C</i>	$N_C$	$N'_C$	$N^m_C$	$F_C$		
<i>D</i>	$N_D$	$N'_D$	$N^m_D$	$F_D$		
<i>E</i>	$N_E$	$N'_E$	$N^m_E$	$F_E$		

– раскрытие ячейки

ТАБЛИЦА 2. Динамическая система показателей, определяющая техническую оснащенность инфраструктуры ЖС. II часть

Идентификационные номера станционных путей	Продолжительность «простоев» на станционных путях	Резерв времени использования станционных путей	Идентификационные номера элементов путевого развития	Резерв времени использования элементов путевого развития
1	$P_1$	$R_1$	1	$R'_1$
2	$P_2$	$R_2$	2	$R'_2$
.....	.....	.....	.....	.....
$i$	$P_i$	$R_i$	$e$	$R'_e$
.....	.....	.....	.....	.....
$g$	$P_g$	$R_g$	$x$	$R'_x$

мента  $e$ ;  $T$  – время занятия элементов путевого развития транспортными единицами;  $t$  – время простоев поездов на станционных путях;  $i$  – порядковый номер пути на станции;  $j$  – порядковый номер маршрута;  $g$  – общее количество путей на станции;  $e$  – порядковый номер элемента путевого развития;  $x$  – общее количество элементов путевого развития;  $F_k$  – общее количество задержек категории  $k$ ;  $H_k$  – время задержки поезда категории  $k$ ;  $y$  – порядковый номер задержки поезда;  $z$  – общее количество задержек поездов.

При этом для каждого  $H$  в системе должна выводиться цепочка событий, к которым привела конкретная задержка (см. табл. 1).

Приведем примеры расчетных формул (см. табл. 2)

$$P_i = \sum_{k=A}^E \left[ \sum_{j=1}^{N_k} t_i^{A_j} + \sum_{j=1}^{N'_k} t_i^{A_j} + \sum_{j=1}^{N''_k} t_i^{A_j} \right],$$

$$R_i =$$

$$= \left( 1 - \frac{\sum_{k=A}^E \left[ \sum_{j=1}^{N_k} T_i^{A_j} + \sum_{j=1}^{N'_k} T_i^{A_j} + \sum_{j=1}^{N''_k} T_i^{A_j} \right]}{1440} \right) \times$$

$$\times 100\%,$$

$$R'_e =$$

$$= \left( 1 - \frac{\sum_{k=A}^E \left[ \sum_{j=1}^{N_k} T_e^{A_j} + \sum_{j=1}^{N'_k} T_e^{A_j} + \sum_{j=1}^{N''_k} T_e^{A_j} \right]}{1440} \right) \times$$

$$\times 100\%.$$

### III этап. Проверка.

Поиск оптимальных соотношений между:

- временем простоев поездов на станционных путях;
- резервом времени использования элементов путевого развития;
- количеством реализованных маршрутов по ЖС.

Критериями оптимальных соотношений (множество  $Y$ ) будут:

- предел роста входящего и выходящего потоков при росте простоев поездов на станционных путях;

- точка потери стабильности системы – точка, при которой на незначительном росте количества маршрутов увеличение задержек и простоев поездов происходит более мощными темпами, чем ранее, при этом не остается резерва времени использования основных элементов путевого развития;

- предел роста выходящего с ЖС потока при увеличении входящего на нее потока.

Названные критерии можно установить только опытным путем, что подтверждает необходимость рассмотрения приведенной системы показателей в динамике. При поиске оптимальных соотношений стоит вновь обратиться к имитационному моделированию, с последовательным изменением ключевых данных:

- схема путевого развития;
- система сигнализации, централизации и блокировки;
- график движения поездов;
- размеры движения поездов;
- технология обработки различных категорий поездов;
- резерв времени использования элементов путевого развития.

## Заключение

Под динамической системой показателей, определяющей техническую оснащенность инфраструктуры ЖС, стоит понимать оптимальное соотношение параметров множества  $X$ , достигнутое путем имитационного моделирования по критериям множества  $Y$ . Искомая система показателей позволит: оценить наиболее вероятные размеры движения поездов по станции и ее загрузку; определять необходимое и достаточное путевое развитие станции для пропускания заданных размеров движения.

Для того чтобы довести динамическую систему показателей, характеризующую техническую оснащенность инфраструктуры ЖС до практического применения, следует верифицировать ее на программных комплексах

по имитационному моделированию работы ЖС. Однако пока не разработан программный продукт, основанный на данной теории сбора статистической информации, это требует дополнительной научной проработки критериев такой системы после многочисленных экспериментов, проведенных путем имитационного моделирования, в связи с установлением новых возможных связей между параметрами: «входящий поток», «выходящий поток», «резерв времени использования технических средств» и «простои».

## Библиографический список

1. Козлов И. Т. Пропускная способность транспортных систем / И. Т. Козлов. – М. : Транспорт, 1985. – 214 с.
2. Козлов П. А. Расчет параметров проектируемых транспортных узлов // П. А. Козлов, В. П. Козлова // Железнодорожный транспорт. – 2008. – № 7. – С. 36–38.
3. Козлов П. А. Оценка инфраструктурных транспортных проектов методом моделирования / П. А. Козлов, А. Э. Александров // Транспорт Российской Федерации. – 2006. – № 5. – С. 43–44.
4. Левин Д. Ю. Расчет и использование пропускной способности железных дорог : монография / Д. Ю. Левин, В. Л. Павлов. – М. : ФГОУ «Учеб.-метод. центр по образованию на ж.-д. транспорте», 2011. – 364 с.
5. Иванков А. Н. Определение задержек грузовых поездов на промежуточных станциях участка / А. Н. Иванков, Л. Н. Иванкова, М. В. Фуфачева // Вестн. Иркутск. гос. техн. ун-та. – 2011. – № 2. – С. 92–96.
6. Krueger H. Parametric Modeling in Rail Capacity Planning / H. Krueger // Processing of 1999 Winter Simulation Conference, Piscataway. – New York, USA, 1999. – P. 1194–2000.
7. Четчуев М. В. Этапность развития горловин железнодорожных станций / М. В. Четчуев // Вестн. Ростов. гос. ун-та путей сообщения. – 2012. – № 1. – С. 167–176.
8. Котельников С. С. Имитационное моделирование работы станций / С. С. Котельников, А. Н. Иван-

ков // Современные проблемы транспортного комплекса России. – 2011. – № 1. – С. 82–86.

9. UIC, Capacity (UIC code 406). International Union of Railways (UIC) : 19. Paris, France, 2004. – URL : [http://tamannaei.iut.ac.ir/sites/tamannaei.iut.ac.ir/files//files\\_course/uic406\\_2004.pdf](http://tamannaei.iut.ac.ir/sites/tamannaei.iut.ac.ir/files//files_course/uic406_2004.pdf) (дата обращения : 19.05.2017).

10. Инструкция по расчету наличной пропускной способности железных дорог. – Утв. 16.11.2010. – М. : ОАО «РЖД», 2010. – 305 с.

11. Шепель А. С. Определение зависимостей между параметрами станционных горловин / А. С. Шепель // Транспорт : проблемы, идеи, перспективы : сб. тр. LXXV юбил. Всерос. науч.-технич. конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – СПб. : Петерб. гос. ун-т путей сообщения, 2015. – С. 245–251.

12. Основы проектирования, строительства и реконструкции железных дорог. – М. : ФГОУ «Учеб.-метод. центр по образованию на ж.-д. транспорте», 2009. – 448 с. – URL : <http://e.lanbook.com/book/4162> (дата обращения: 19.05.2017).

13. ОАО «РЖД». Распоряжение от 16 января 2014 г. № 47р «Об утверждении инструкции о порядке учета и классификации инцидентов, вызывающих нарушения графика движения поездов». – URL : <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc; base=EXP; n=585561#0> (дата обращения : 19.05.2017).

14. ГОСТ 27.002–89. «Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения». – URL : [https://ohranatruda.ru/ot\\_biblio/normativ/data\\_normativ/4/4737/index.php](https://ohranatruda.ru/ot_biblio/normativ/data_normativ/4/4737/index.php) (дата обращения : 19.05.2017).

15. ОАО «РЖД». Распоряжение от 23 декабря 2013 г. № 2852р «Об утверждении положения по учету, расследованию и проведению анализа случаев отказов в работе технических средств на инфраструктуре ОАО „РЖД“ с использованием автоматизированной системы КАС АНТ». – URL : <http://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/70464504/#review> (дата обращения: 19.05.2017).

## References

1. Kozlov I. T. *Propusknaya sposobnost transportnykh system* [Transport systems' capacity]. Moscow, Transport Publ., 1985, 214 p. (In Russian)

2. Kozlov P. A. & Kozlova V. P. Raschet parametrov proyektiruyemykh transportnykh uzlov [Parameters' calculation of projectable rail centers]. *Railway transport*, 2008, no. 7, pp. 36–38. (In Russian)

3. Kozlov P. A. & Alexandrov A. E. Otsenka infrastrukturykh transportnykh projektov metodom modelirovaniya [The assessment of infrastructural transport projects by means of simulation method]. *Transport of the Russian Federation*, 2006, no. 5, pp. 43–44. (In Russian)

4. Levin D. Y. & Pavlov V. L. *Raschet i ispolzovaniye propusknoy sposobnosti zheleznykh dorog* [Calculation and application of railroads' capacity]. Moscow, Learning and teaching educational centre of railway transport Publ., 2011, 364 p. (In Russian)

5. Ivankov A. N., Ivankova L. N. & Fufacheva M. V. Opredeleniye zaderzhek gruzovykh poyezdov na promezhutochnykh stantsiyakh uchastka [Identification of freight trains' delays on intermediate stations of railroad section]. *Irkutsk State Technical University Bulletin*, 2011, no. 2, pp. 92–96. (In Russian)

6. Krueger H. Parametric modeling in Rail Capacity Planning. *Processing of 1999 Winter Simulation Conference, Piscataway*. New York, USA, 1999, pp. 1194–2000.

7. Chetchuyev M. V. Etapnost razvitiya gorlovykh zheleznodorozhnykh stantsiy [Staging of yard necks' development]. *Rostov State Transport University Bulletin*, 2012, no. 1, pp. 167–176. (In Russian)

8. Kotelnikov S. S. & Ivankov A. N. Imitatsionnoye modelirovaniye raboty stantsiy [Simulation modeling of stations' functioning]. *Modern issues of transport system of Russia*, 2011, no. 1, pp. 82–86. (In Russian)

9. UIC, Capacity (UIC code 406). *Intern. Union of Railways (UIC)*: 19. Paris, France, 2004. URL: [http://tamannaei.iut.ac.ir/sites/tamannaei.iut.ac.ir/files//files\\_course/uic406\\_2004.pdf](http://tamannaei.iut.ac.ir/sites/tamannaei.iut.ac.ir/files//files_course/uic406_2004.pdf) (accessed: 19.05.2017).

10. *Instruktsiya po raschetu nalychnoy propusknoy sposobnosti zheleznykh dorog* [Instruction on calculation of railroads' present capacity]. App. 16.11.2010. Moscow, OJSC “Russian Railways” Publ., 2010, 305 p. (In Russian)

11. Shepel A. S. Opredeleniye zavisimostey mezhdu parametramy stantsionnykh gorlovykh. *Transport: problemy, idei, perspekyvy* [Identification of yard

neck parameters' relations. Transport: problems, ideas, prospects]. *Sbornyk trudov LXXV jubileynoy Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoi konferentsii studentov, aspyrantov i molodykh uchenykh* [Coll. Papers of the LXXVth anniversary all-Russian scientific and technical conference of students, graduates and young scholars]. Saint Petersburg, Petersburg State Transport University Publ., 2015, pp. 245–251. (In Russian)

12. *Osnovy proyektirovaniya, stroitelstva i rekonstruktsii zheleznykh dorog* [Theory of design, construction and reconstruction of railroads]. Moscow, Learning and teaching educational centre of railway transport Publ., 2009, 448 p. URL: <http://e.lanbook.com/book/4162> (accessed: 19.05.2017). (In Russian)

13. OAO "RZhD". *Rasporyazheniye ot 16 yanvarya 2014 g. no. 47r "Ob utverzhdenii instruktsii o poryadke i klassifikatsii intsidentov, vyzyvajushykh narusheniya grafika dvyzheniya poyezdov"* [OJSC "Russian Railways". Order N 47r, from January, 16<sup>th</sup> 2014 "On approval of instruction on accounting and classification procedure of incidents, causing

*train schedule disruption*"]. URL: <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc; base=EXP; n=585561#0> (accessed: 19.05.2017). (In Russian)

14. GOST 27.002–89. "Nadezhnost v tekhnike. Osnovniye ponyatiya. Terminy i opredeleniya" [State Standard 27.002–89. "Reliability in engineering. Basic notions. Terms and definitions"]. URL: [https://ohrana-truda.ru/ot\\_biblio/normativ/data\\_normativ/4/4737/index.php](https://ohrana-truda.ru/ot_biblio/normativ/data_normativ/4/4737/index.php) (accessed: 19.05.2017). (In Russian)

15. OAO "RZhD". *Rasporyazheniye ot 23 dekabrya 2013 g. no. 2852r "Ob utverzhdenii polozheniya po uchetu, rassledovaniju i provedeniju analiza sluchajev otkazov v rabote tekhnicheskyykh sredstv na infrastrukture OAO "RZhD" s ispolzovaniem avtomatizirovannoy systemy KAS ANT"* [OJSC "Russian Railways". Order N 2852r, from December, 23d 2013 "On approval of regulation of accounting, investigation and conducting the analysis of hardware failure cases at OJSC "Russian Railways" infrastructure using CAS ANT computer-aided system"]. URL: <http://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/70464504/#review> (accessed: 19.05.2017). (In Russian)

ШЕПЕЛЬ Александр Сергеевич – ассистент, alexandr.wm@yandex.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).



УДК 654.027

**А. В. Ануфренко, А. К. Канаев**

### **ФОРМИРОВАНИЕ ТРЕБОВАНИЙ К УЗЛУ АГРЕГАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ЕГО ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ**

Дата поступления: 10.04.2017

Решение о публикации: 25.04.2017

#### **Аннотация**

**Цель:** Создание имитационной модели узла агрегации сети связи для исследования влияния структурных, функциональных и нагрузочных параметров узла агрегации на характеристики агрегированного трафика сети связи, что позволит задавать адекватные требования к узлу агрегации в условиях соблюдения заданного уровня качества обслуживания для всех категорий трафика сети.

**Методы:** Применены законы теории массового обслуживания, теории графов, теории вероятности, фрактальная геометрия и аппарат имитационного моделирования. **Результаты:** На основе имитационного моделирования разработаны модели генераторов трафика, формирующие видео трафик, речевой трафик и трафик данных, а также принимающие во внимание самоподобный характер трафика и сочетания длительностей ON/OFF-периодов различных видов поступающей на узел агрегации нагрузки. Создана имитационная модель узла агрегации сети связи в программе «Расширенный редактор GPSS World», учитывающая структурно-функциональные параметры реального узла агрегации. Получены гистограммы зависимостей характеристик агрегированного трафика (задержки кадра данных и джиттера) от параметров узла агрегации. **Практическая значимость:** На основе построенной имитационной модели узла агрегации рассчитываются значения задержки кадров данных и джиттера агрегированного трафика с учетом реальных нагрузочных, структурных и функциональных параметров моделируемого узла агрегации. При использовании полученных расчетных данных возрастает адекватность принятия решений в процессе планирования и проектирования узла агрегации в условиях выполнения требований по уровню качества обслуживания, а также возрастает адекватность выбора наилучшего варианта узла агрегации из предлагаемых фирмами-производителями с точки зрения цена/качество.

**Ключевые слова:** Узел агрегации, телекоммуникационная сеть связи, имитационное моделирование, расширенный редактор GPSS World.

\***Alexander V. Anufrenko**, adjunct, leroi88@mail.ru (Marshal of the Soviet Union S. M. Budenny Military academy of telecommunications of Ministry of Defence of the Russian Federation); **Andrey K. Kanaev**, D. Sci, associated professor, head of a chair, kanaevak@mail.ru (Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University) **FORMATION OF REQUIREMENTS FOR AGGREGATION NODE WITH APPLICATION OF SIMULATION MODELING OF ITS FUNCTIONING PROCESS**

## Summary

**Objective:** To generate a simulation model of communication network aggregation node for the study of impact of structural, functional and load aggregation node parameters on characteristics of aggregate communications network traffic, which will make it possible to set adequate requirements for aggregation node if the given level of service quality will be observed for all categories of network traffic. **Methods:** The laws of waiting lines' theory, graph theory, probability theory, fractal geometry, as well as a simulation modeling device were applied. **Results:** On the basis of simulation modeling, models of traffic generators were designed, forming video traffic, voice traffic and data traffic, as well as, considering self-similar nature of traffic and combinations of ON/OFF duration periods of different types of load coming in an aggregation node. A simulation model of an aggregation node was designed in "Extended GPSS World editor" programme, the former takes into account structural-functional parameters of a real aggregation node. Histograms of dependences of aggregation traffic characteristics (transmission frame and jitter delays) were obtained from parameters of an aggregation node. **Practical importance:** On the basis of the developed simulation model of an aggregation node, the values of transmission frame and jitter delays of an aggregation node are calculated, considering real load, structural and functional parameters of a simulated aggregation node. When applying the obtained calculated data, the adequacy of decision-making when planning and designing an aggregation node is increasing, in case the requirements on the level of service quality are fulfilled, as well as the adequacy of selecting an optimal type of an aggregation node from those offered by producer companies from a price/quality point of view.

**Keywords:** Aggregation node, telecommunications network, simulation modeling, extended GPSS World editor.

## Введение

Анализ работ [1–5] показывает, что непрерывное развитие телекоммуникационной инфраструктуры приводит к ужесточению требований к ее параметрам и в то же время способствует «телекоммуникационному многообразию». Элементы сетей связи имеют неодинаковые структуры, функционируют посредством разных технологий, включают разнообразные протоколы, стыки, интерфейсы, обрабатывают различную нагрузку и т. д. Поэтому сложно задать четкие требования к элементам сети связи таким образом, чтобы их совокупность обеспечивала выполнение сетевых требований.

Узким местом телекоммуникационной сети являются узлы агрегации, совокупность которых образует уровень агрегирования сети связи [6] – связующее звено между транспортной сетью и сетью доступа. От их функционирования зависит работа узлов как сети доступа, так и узлов транспортной сети. Структурно-функциональные параметры узла агрегации

оказывают воздействие на параметры трафика (задержка кадров, джиттер задержки кадров, потеря кадров), влияющие на уровень качества обслуживания пользователя сети связи. Таким образом, анализ основных параметров узла агрегации в разных режимах функционирования – это актуальная задача.

С учетом того, что имитационную модель можно разработать с любой детализацией процесса или явления [7], а это является неотъемлемой частью при анализе таких сложных структур как узел агрегации, то имитационное моделирование прекрасно подходит к решению вопросов анализа параметров узла агрегации.

## Описание объекта

Согласно [6], узел агрегации является сетевым, функции которого соответствуют функциям уровня агрегации сети связи, и содержит комплекс технических и программных средств, предназначенных для выполнения

функций мультиплексирования (демультиплексирования) и (или) концентрации, и (или) коммутации и переноса разнородного трафика с требуемым качеством.

### Формирование модели

С точки зрения имитационного моделирования модель узла агрегации представляет собой программу, реализованную на персональном компьютере, описывающую (моделирующую) функционирование элементов узла агрегации, их связи между собой и внешней средой. С учетом анализа [8] программой для имитационного моделирования выбран «Расширенный редактор GPSS World».

### Описание моделируемого процесса

Имеются три источника, формирующих кадры данных, поступающие на узел агрегации. Процедура поступления кадров данных на узел агрегации описывается ON/OFF-моделью. Чередование ON/OFF-периодов происходит через случайные промежутки времени со средними интервалами времени  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  для ON-периода каждого источника и  $T_4$  для OFF-периода. Интенсивность поступления кадров от каждого источника в ON-период имеет случайный характер со средними значениями интенсивности  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ ,  $\lambda_3$ .

При формировании кадров данных учитывается процедура кодирования (данные кодируются со скоростью  $V_1$ ,  $V_2$ ,  $V_3$  соответственно), задержка кодирования составляет  $T_{kod1}$ ,  $T_{kod2}$ ,  $T_{kod3}$ . Данные инкапсулируются в Ethernet-кадр за случайные промежутки времени со средними интервалами времени  $T_{ink1}$ ,  $T_{ink2}$ ,  $T_{ink3}$ .

Сообщения могут быть разных категорий с вероятностями их появления  $p_{k1}$ ,  $p_{k2}$ , ...,  $p_{km}$  ( $p_{k1} + p_{k2} + \dots + p_{km} = 1$ ) и вычислительными сложностями обработки  $W = W_1 + W_2 + W_3 + W_4 + W_5$ , где  $W_1$  = (размер сэмпла инкапсулируемых данных (в секундах)  $\times$  пропускную

способность кодека)/8 – количество байт в сэмпле данных;  $W_2$  – количество байт RTP заголовка;  $W_3$  – количество байт UDP заголовка;  $W_4$  – количество байт IP заголовка;  $W_5$  – количество байт служебной информации пакета Ethernet.

В элементах узла агрегации (маршрутизаторе, коммутаторе) сообщения обрабатываются с производительностью  $Q$  кадров в 1 с. После обработки сообщения поступают в выходной буфер узла агрегации.

Исходными данными для моделирования являются параметры трафика, поступающего на узел агрегации, представленные в табл. 1.

При моделировании узел агрегации описывается с использованием теории массового обслуживания, включая входные потоки запросов (заявок), очереди (накопители), устройства обслуживания (элементы узла агрегации, канал передачи данных), выходной поток обработанных запросов, поток потерянных (необработанных) запросов и т. д. В соответствии с классификацией Кендалла узел агрегации может быть описан как СМО типа G/G/1 [9–13].

Модель в «Расширенном редакторе GPSS World» разработана согласно постановке задачи исследования и включает следующие элементы:

- задание исходных данных;
- определение матриц;
- описание функций, задающих исходные данные;
- арифметические выражения;
- сегмент имитации работы генератора трафика 1;
- сегмент имитации работы генератора трафика 2;
- сегмент имитации работы генератора трафика 3;
- розыгрыш категории сообщения и счета сообщений;
- розыгрыш характеристик сообщений;
- сегмент имитации работы основных каналов 1–3;
- сегмент имитации работы узла агрегации;

ТАБЛИЦА 1. Исходные данные моделирования

Показатель		Речь	Видео	Данные
Скорость кодирования $V_1, V_2, V_3$ , кбит/с		48	64	108
Алгоритмическая задержка кодирования, $T_{kod}$ , мс		40	6,734	100
Задержка инкапсуляции, $T_{ink}$ , мс		5	5	0
Закон распределения длительности задержки инкапсуляции		Парето	Парето	Парето
Количество байт в Ethernet-кадре	$W_1$	240	120	1350
	$W_2$	12	12	20
	$W_3$	8	8	
	$W_4$	20	20	20
	$W_5$	26	26	26
Интенсивность передачи кадров $\lambda$ , кадр/с		22	86	10
Закон распределения интенсивности передачи кадров		Пуассона	Парето	Вейбулла
Длительность ON-периода, $T_1, T_2, T_3$ , с		180	120	60
Длительность OFF-периода, $T_4$ , с		30	30	30
Закон распределения чередования ON/OFF-периодов		Экспоненциальный	Экспоненциальный	Экспоненциальный

- сегмент имитации работы основных каналов 4–6;
- сегмент имитации получения сообщений;
- сегмент имитации работы резервных каналов 7–9;
- сегмент имитации работы резервных каналов 10–12;
- сегмент имитации отказов узла агрегации;
- сегмент имитации отказов каналов связи 1–3;
- сегмент имитации отказов каналов связи 4–6;
- сегмент счета переданных и потерянных сообщений и расчет вероятностей передачи сообщений;
- задание времени моделирования и расчет результатов.

Сообщения имитируются транзактами с параметрами, необходимыми, согласно логике

работы модели. Генераторы трафика, каналы связи и узлы агрегации имитируются одноканальными устройствами. По статистическим данным моделирования рассчитываются задержка распространения кадра через узел агрегации и джиттер задержки.

Перед началом моделирования произведены расчеты стратегического и тактического планирования эксперимента [3]. Факторы стратегического планирования: скорость генераторов трафика; сочетание видов генераторов трафика; закон распределения интенсивности нагрузки, поступающей от генераторов трафика; скорость кодирования; скорость инкапсуляции. С учетом выбранных параметров генераторов трафика, варьируемых при моделировании узла агрегации, количество необходимых экспериментов равняется 72. Расчет количества реализаций каждого эксперимента для определения значений исследуемых параметров составил 100 000 для значений за-

держки передачи кадра и 500 000 для джиттера задержки кадров.

## Результаты моделирования

На рис. 1 и 2 представлены гистограммы, описывающие зависимость величины задержки кадров данных и джиттера задержки кадров от различного сочетания значений задержек инкапсуляции данных, поступающих от каждого источника нагрузки. Цвета столбцов гистограммы обозначают определенное сочетание задержек инкапсуляции данных, формируемых тремя генераторами трафика. Значения 1, 2, 3 столбцов в легенде таблицы обозначают задержку инкапсуляции кадров трех источников данных соответственно (1 – речевой трафик, 2 – видео трафик, 3 – трафик данных). На осях ординат отложены значения

задержки кадра агрегированного трафика и значение джиттера задержки кадров агрегированного трафика соответственно.

Из гистограмм видно:

- при задержках инкапсуляции кадров 0,004 с/0,002 с/0,008 с и 0,006 с/0,001 с/0,008 с – значение задержки кадров агрегированного трафика получилось наибольшим, а при 0,006 с/0,003 с/0,007 с – наименьшим;
- при задержке инкапсуляции кадров 0,003 с/0,003 с/0,007 с и 0,006 с/0,003 с/0,007 с – величина джиттера задержки кадров агрегированного трафика получилась наибольшей, а при 0,005 с/0,003 с/0,008 с – наименьшей;
- изменения задержки кадров и джиттера инкапсуляции не всегда имеют общую динамику.

В табл. 2 представлен фрагмент результата многофакторного эксперимента, где выделен лучший среди представленных вариантов сочетания рассматриваемых факторов трафика для получения минимальной задержки кадра.

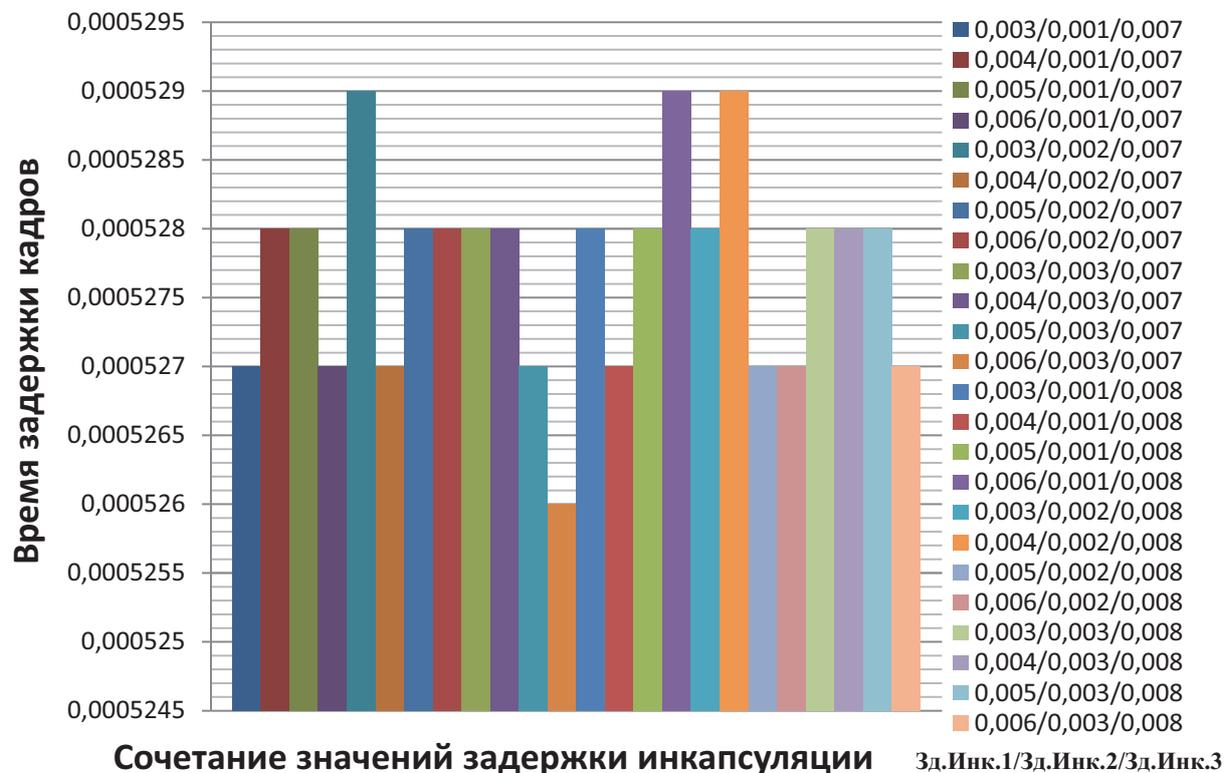


Рис. 1. Зависимость задержки агрегированного трафика от значений задержек инкапсуляции данных

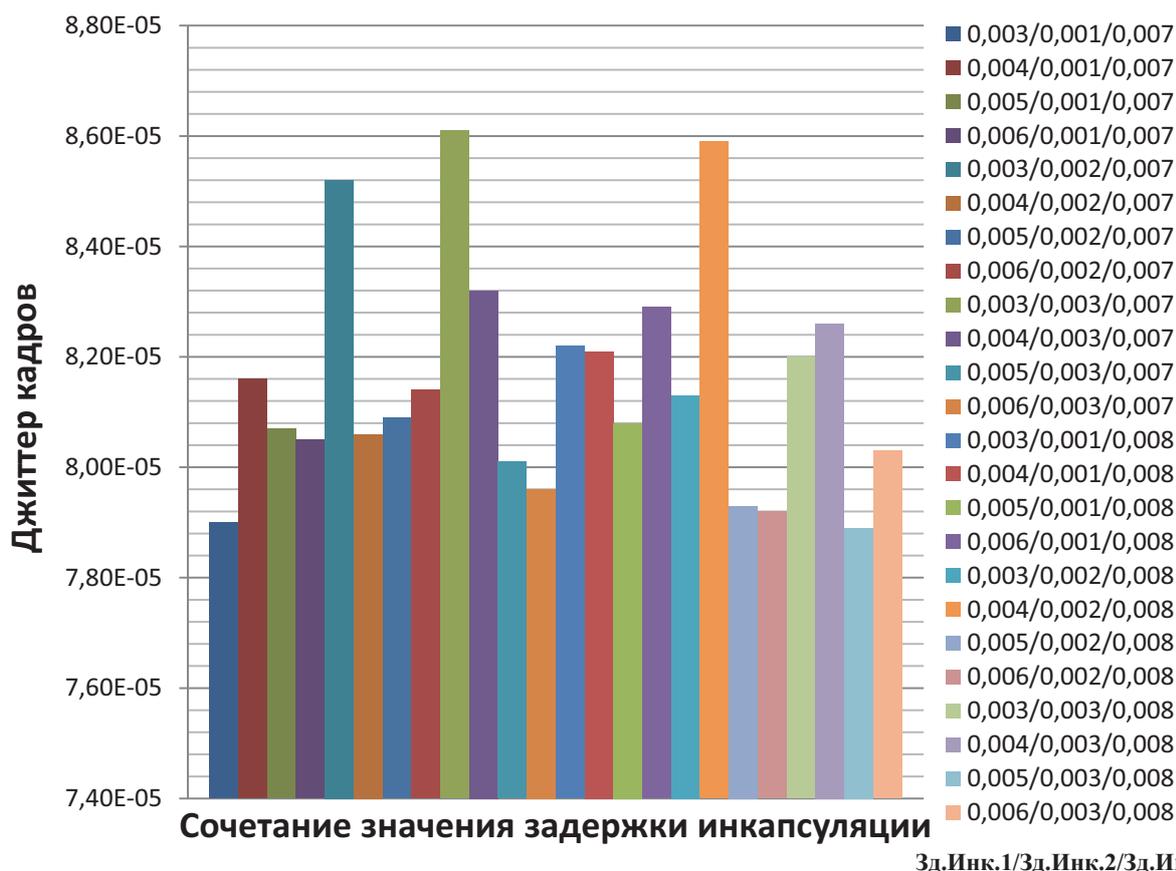


Рис. 2. Зависимость джиттера агрегированного трафика от значений задержек инкапсуляции данных

ТАБЛИЦА 2. Фрагмент результатов многофакторного эксперимента

Генератор трафика 1	Генератор трафика 2	Скорость, модельная единица	...	Задержка кодирования 2, с	Задержка инкапсуляции 1, с	Задержка кадров, с	Джиттер, с
1	1	0,02	...	0,004	0,01	0,00289	0,000245
2	2	0,02	...	0,004	0,01	0,00318	0,000155
...	...	...	...	...	...	...	...
1	2	0,02	...	0,004	0,01	0,00341	0,000218
2	1	0,02	...	0,004	0,01	0,00277	0,000204

## Заключение

Из результатов моделирования видно, что параметры агрегированного трафика чувствительны к различным вариантам сочетания нагрузки, поступающей на узел агрегации.

Разница между значениями задержек кадров при различных сочетаниях нагрузки достигает сотен микросекунд, что существенно влияет на поведение агрегированного трафика в целом. Дальнейшее распространение агрегированного трафика по узлам сети связи будет

способствовать возрастанию такой разницы, которая будет влиять на качество предоставления услуг связи в целом.

Модель учитывает скорость передачи данных источником, вид данных, процессы преобразования данных и т. д., что позволяет выявить, как влияет различное сочетание значений таких факторов на исследуемые параметры агрегированного трафика. Таким образом, вводя в имитационную модель реальные исходные данные и анализируя полученные исследуемые параметры, можно формировать требования к узлу агрегации по составу, видам оборудования, структуре и защитным механизмам.

### Библиографический список

1. МСЭ Т Recommendation Y.1540. IP Packet Transfer and Availability Performance parameters / December 2002. – URL : <http://niits.ru/public/2008/2008-006.pdf> (дата обращения: 03.03.2017).

2. Шелухин О. И. Фрактальные процессы в телекоммуникациях / О. И. Шелухин, А. В. Осин, А. М. Тенякшев. – М. : Радиотехника, 2003. – 480 с.

3. Бахарева Н. Ф. Аппроксимативные методы и модели массового обслуживания. Исследование компьютерных сетей / Н. Ф. Бахарева, В. Н. Тарасов. – Самара : Самарск. науч. центр РАН, 2011. – 327 с.

4. Ануфренко А. В. Принцип организации узла агрегации мультисервисной сети связи / А. В. Ануфренко, Д. В. Волков, А. К. Канаев // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании. IV Междунар. науч.-технич. и науч.-метод. конференция : сб. науч. ст. : в 2 т. – СПб. : СПб ГУТ, 2015. – С. 203–206.

5. Ануфренко А. В. Обеспечение отказоустойчивости сетей связи, функционирующих на базе пакетно-ориентированных технологий / А. В. Ануфренко, А. В. Баранцев, А. К. Канаев // Юбил. 70-я Всерос. научн.-технич. конференция, посвященная Дню радио. – СПб. : ВАС, 2015. – С. 304–306.

6. Олифер В. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы : учебник для вузов. 4-е изд. / В. Олифер, Н. Олифер. – СПб. : Питер, 2012. – 944 с.

7. Боев В. Д. Моделирование систем. Инструментальные средства GPSS World : учеб. пособие / В. Д. Боев. – СПб. : БХВ-Петербург, 2004. – 240 с.

8. Боев В. Д. Исследование адекватности GPSS World и AnyLogic при моделировании дискретно-событийных процессов : монография / В. Д. Боев. – СПб. : ВАС, 2011. – 404 с.

9. Алиев Т. И. Основы моделирования дискретных систем / Т. И. Алиев. – СПб. : СПбГУ ИТМО, 2009. – 363 с.

10. Боев В. Д. Компьютерное моделирование. Элементы теории и практики / В. Д. Боев, Р. П. Сыпченко. – СПб. : ВАС, 2009. – 436 с.

11. Назаров А. Н. Модели и методы расчета показателей качества функционирования узлового оборудования и структурно-сетевых параметров сетей связи следующего поколения / А. Н. Назаров, К. И. Сычев. – Красноярск : Изд-во ООО «Поликом», 2010. – 389 с.

12. Алиев Т. И. Сети ЭВМ и телекоммуникации : учеб. пособие / Т. И. Алиев. – СПб. : СПбГУ ИТМО, 2011. – 400 с.

13. Сахарова М. А. Моделирование процессов обработки потоков IP-пакетов с различными типами информационных составляющих на основе глубокого анализа трафика / М. А. Сахарова, А. К. Канаев // Бюл. результатов научных исследований. – 2014. – № 3 (12). – С. 85–93. – URL : <http://cyberleninka.ru/article/n> (дата обращения: 10.02.2017).

### References

1. ITU-T Recommendation Y.1540 [IP Packet Transfer and Availability Performance parameters]. December 2002. URL: <http://niits.ru/public/2008/2008-006.pdf> (accessed: 03.03.2017).

2. Shelukhyn O. I., Osin A. V. & Tenyakshev A. M. *Fraktalniye protsessy v telekommunikatsiyakh* [Fractal processes in telecommunications]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2003, 480 p. (In Russian)

3. Bakhareva N. F. & Tarasov V. N. *Approksimativniye metody i modely massovogo obsluzhivaniya. Issledovaniye kompjuternykh setey* [Approximative methods and queueing models. Computer networks research]. Samara, RAS research centre of Samara Publ., 2011, 327 p. (In Russian)

4. Anufrenko A. V., Volkov D. V. & Kanayev A. K. Printsip organizatsii uzla aggregatsii multiservisnoy sety svyazy [The principle of aggregation node setup of multi-service communications network]. Aktualniye problemy infotelekkommunikatsiy v nauke i obrazovanii. IV Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya i nauchno-metodycheskaya konferentsiya [Topical issues of information telecommunications in science and education. The IV<sup>th</sup> Intern. scientific and technical, scientific methodological conference]. *Collection of scientific papers*: in 2 vol. Saint Petersburg, Saint Petersburg SUT Publ., 2015, pp. 203–206. (In Russian)
5. Anufrenko A. V., Barantsev A. V. & Kanajev A. K. Obespecheniye otkazoustoychivosty setey svyazy, funktsionirujushikh na baze paketno-orientirovannykh tekhnologiy [Telecommunications fail-safety support, functioning on the basis of packet oriented technologies]. *Jubileynaya 70-ya Vserossiyskaya Nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya, posveshennaya Dnyu radio [Anniversary edition of the 70<sup>th</sup> All-Russian scientific and technical conference dedicated to the Radio day]*. Saint Petersburg, MAT Publ., 2015, pp. 304–306. (In Russian)
6. Olifer V. & Olifer N. *Kompjuterniye sety. Printsipy, tekhnologii, protokoly [Computer networks. Foundations, technologies, protocols]*: 4<sup>th</sup> ed. Saint Petersburg, Peter Publ., 2012, 944 p. (In Russian)
7. Bojev V. D. *Modelirovaniye system. Instrumentalniye sredstva GPSS World [Systems simulation. GPSS World workbench]*. Saint Petersburg, BHV-St. Petersburg Publ., 2004, 240 p. (In Russian)
8. Bojev V. D. *Issledovaniye adekvatnosti GPSS World i AnyLogic pry modelirovanii diskretno-so-bitijnykh protsessov [The study of GPSS World and AnyLogic adequacy in the process of discrete-event simulation]*. Saint Petersburg, MAT Publ., 2011, 404 p. (In Russian)
9. Aliyev T. I. *Osnovy modelirovaniya diskretnykh system [Discrete systems' modeling foundation]*. Saint Petersburg, Saint Petersburg ITMO Publ., 2009, 363 p. (In Russian)
10. Bojev V. D. & Sypchenko R. P. *Kompjuternoye modelirovaniye. Elementy teorii i praktiki [Computer modeling. Elements of theory and practice]*. Saint Petersburg, MAT Publ., 2009, 436 p. (In Russian)
11. Nazarov A. N. & Sychev K. I. *Modely i metody rascheta pokazateley kachestva funktsionirovaniya uzlovogo oborudovaniya i strukturno-setevykh parametrov setey svyazy sledujushogo pokoleniya [Calculation models and methods of performance indices of nodal equipment and structural network parameters of the next generation telecommunications]*. Krasnoyarsk, JSC "Polycom" Publ., 2010, 389 p. (In Russian)
12. Aliyev T. I. *Sety EVM i telekommunikatsii [Computer networks and telecommunications]*. Saint Petersburg, Saint Petersburg ITMO Publ., 2011, 400 p. (In Russian)
13. Sakharova M. A. & Kanayev A. K. Modelirovaniye protsessov obrabotki potokov IP-paketov s razlychnymy tipami informatsionnykh sostavlyajushykh na osnove glubokogo analiza trafika [Modeling of IP-packets' stream processing with different types of data components on the basis of in-depth traffic analysis]. *Bulletin on research results*, 2014, no. 3 (12), pp. 85–93. URL: <http://cyberleninka.ru/article/n> (accessed: 10.02.2017). (In Russian)

\*АНУФРЕНКО Александр Викторович – адъюнкт, leroi88@mail.ru (Военная академия связи имени маршала Советского Союза С. М. Буденного Министерства обороны Российской Федерации); КАНАЕВ Андрей Константинович – доктор техн. наук, доцент, заведующий кафедрой, kanaesak@mail.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 625.1:004.94

**А. Г. Котенко, И. М. Кокурин, В. Л. Белозеров, В. С. Тимченко****МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ  
РЕКОНСТРУИРУЕМОЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ ЛИНИИ  
НА ОСНОВЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Дата поступления: 22.03.2017

Решение о публикации: 24.04.2017

**Аннотация**

**Цель:** Совершенствование прогнозной оценки освоения объемов перевозок на реконструируемых железнодорожных линиях. **Методы:** Работа посвящена разработке методики имитационного моделирования, также использовались статистический метод обработки данных, теория вероятностей и метод определения экономической эффективности капитальных вложений. **Результаты:** Предложен способ имитационного моделирования оценки пропускной способности реконструируемой железнодорожной линии, включающий обоснование границ моделирования реконструируемой линии, оценку задержек от предоставления «окон», учет характеристик движения грузовых поездов и расчет вероятности соответствия моделируемой пропускной способности линии потребной. Создана технология имитационного моделирования пропуска поездов по реконструируемой линии, включающая процедуру оценки задержек поездов на станциях от предоставления «окон» и процедуру проверки обеспечения пропуска заданного количества грузовых поездов. Показано, что на основе обработки результатов имитационного моделирования пропуска поездов по реконструируемой линии при предоставлении «окон», пропуске различных «категорий» грузовых поездов и длительностей занятия путей на станциях можно оценить вероятность соответствия моделируемой пропускной способности линии потребной. **Практическая значимость:** Сформулированные в работе предложения позволят специалистам проектных организаций при расчете пропускной способности железнодорожных линий оценивать величину задержек на станциях от предоставления «окон» при пропуске грузовых поездов с различными массой и длиной состава.

**Ключевые слова:** Железнодорожная линия, реконструкция, «окна», пропускная способность, перерабатывающая способность, имитационное моделирование.

**Alexey G. Kotenko**, D. Sci., associate professor, head of a chair, algenko@gmail.com (Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University); **Iosyph M. Kokuryn**, D. Sci., professor, kokyrinim@mail.ru (Solomenko institute of transport problems of the Russian Academy of Sciences); **Vladimir L. Belozеров**, D. Sci, professor, v.belozеров@mail.ru (Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University); \***Vyacheslav S. Tymchenko**, scientific associate, tim4enko.via4eslav@mail.ru (Solomenko institute of transport problems of the Russian Academy of Sciences) EVALUATION METHOD OF RECONSTRUCTED RAILWAY LINE TRAIN-HANDLING CAPACITY BASED ON SIMULATION MODELING

**Summary**

**Objective:** To improve prediction estimate of traffic volume development on reconstructed railway lines. **Methods:** The study is dedicated to the development of simulation modeling method, statistical data processing method, as well as probability theory and method for determination of capital investments' economic efficiency were also applied in the research. **Results:** A simulation modeling method of train-handling capacity estimation on a reconstructed railway line, including the validation of a reconstructed

railway line modeling limits, the assessment of track possession approval, account of freight traffic characteristics and matching probability calculation of a modeled and required train-handling capacity of a railway line. A simulation modeling method of train handling on a reconstructed railway line was developed, including the procedure of assessment of train delays at stations and track possession approval, as well as checking procedure of track possession approval for the given number of freight trains. It was shown that, on the basis of simulation modeling of train handling on a reconstructed railway line data processing with track possession approval, different “categories” of freight trains handling and the duration of tracks’ occupation, matching probability of a modeled and required train handling capacity of a railway line may be assessed. **Practical importance:** The suggestions stated in the study will allow design engineers of organizations to assess the delay level at the stations from track possession approval when handling freight trains of different lengths and bulk, in the process of calculation of train handling capacity of railway lines.

**Keywords:** Railway line, reconstruction, possession, train-handling capacity, terminal capacity, simulation modeling.

## Введение

Ключевая проблема, возникающая при определении пропускной способности реконструируемой линии, – оценка соответствия характеристик железнодорожной инфраструктуры требуемым условиям организации движения. В общем случае задача связана с выбором экономически целесообразных вариантов графика предоставления «окон» на участках и мероприятий по пропуску поездов, где условиями являются как уменьшение стоимости выполнения ремонтных работ, так и снижение задержек поездов на станциях.

На практике обоснование пропускной способности линии в условиях ремонта железнодорожных участков осуществляется проектными организациями приближенно по минимальной перевозочной мощности, исходя из паспортных данных отдельно для пропускной способности участков и перерабатывающей способности технических станций. Влияние «окон» на размеры движения принимается во внимание на этапе разработки вариантных графиков движения поездов. Это не позволяет учитывать взаимное влияние неравномерности загрузки железнодорожных участков и технических станций.

Решение проблемы на базе использования средств имитационного моделирования [1–8] затрудняется отсутствием аппарата для расче-

та величины задержек на станциях в условиях взаимного влияния «окон» при проведении ремонтных работ, а также особенностей пропуска грузовых поездов с различными массой и длиной состава.

Кроме того, современные средства имитации работы линии в условиях ремонта отдельных участков нуждаются в развитии способов анализа влияния на пропускную способность длительности занятия приемо-отправочных путей станций назначения, что особенно характерно при железнодорожном обслуживании морских портов [9–11].

## Основные положения методики имитационного моделирования пропуска поездов по реконструируемой линии

В общем виде наличная пропускная способность  $N'_л$  реконструируемой линии  $Л' = \{Y_i, C_i^{tex}\}$ , состоящая из участков, перегонов, перегонов, находящихся в условиях предоставления «окон», а также промежуточных станций  $Y_i = \{П_i, П'_i, C_i\}$ , может быть описана в терминах: число предназначенных для пропуска по линии поездов  $n_п$ ; число «категорий» [12] поездов  $n_к$  по участкам  $Y_i$  в зависимости от массы и длины состава; максимальная скорость движения поездов по ли-

нии  $v$ , ограниченная задержками на станциях  $C_i^{\text{тех}}$ , в том числе от предоставления «окон» на перегонах  $\Pi'_i$ ; показатель несинхронности следования поездов относительно графика движения.

Пропускную способность  $N'_л$  реконструируемой линии можно определять с помощью имитационного моделирования. Однако отсутствие технологии имитационного моделирования пропуска различных «категорий» грузовых поездов по линии в условиях задержек на станциях от предоставления «окон» не позволяет применять существующие методы имитационного моделирования, что и определяет проблему исследования.

Рассмотрим основные положения предлагаемой технологии имитационного моделирования пропуска поездов по реконструируемой линии.

Первое положение касается обоснования границ моделирования, которые устанавливаются в соответствии с результатами анализа потерь поездочасов  $z_{п/ч}$  при движении заданного числа поездов  $n_k$  по линии [13] до начала ремонтных работ по схеме: станция назначения – станция, являющаяся «узким местом» пропуска, плюс ближайшая техническая станция, предшествующая ей.

Критерий «узкого места» пропуска без учета «окон» имеет вид

$$(t_{\text{ст}}^{\text{max}}, t_{\text{ст}}^{\text{сум}}, \Delta v_{\text{п}}) \rightarrow \text{max},$$

где  $t_{\text{ст}}^{\text{сум}}$  – суммарные длительности стоянок на станциях, ч;  $t_{\text{ст}}^{\text{max}}$  – максимальные длительности стоянок на станциях, ч;  $\Delta v_{\text{п}}$  – снижения скоростей на подходах к станциям, км/ч.

Второе положение учитывает увеличение длительности стоянки поездов при предоставлении «окон». Показано, что средняя длительность стоянок поездов на технических станциях  $t'_{\text{ст}}$  в условиях работы реальной линии при предоставлении «окон» увеличивается более чем на 60% (рис. 1):

$$t'_{\text{ст}} = t_{\text{ст}}^{\text{б.ок}} + t_{\text{ст}}^{\text{ок}},$$

здесь  $t_{\text{ст}}^{\text{б.ок}}$  – длительность стоянок поездов на технической станции  $C_i^{\text{тех}}$  при отсутствии «окон» на железнодорожной линии;  $t_{\text{ст}}^{\text{ок}}$  – задержки поездов на технической станции  $C_i^{\text{тех}}$  от предоставления «окон» на железнодорожной линии.

Средняя длительность стоянок поездов на технических станциях ( $t'_{\text{ст}}$ ) зависит от вариан-

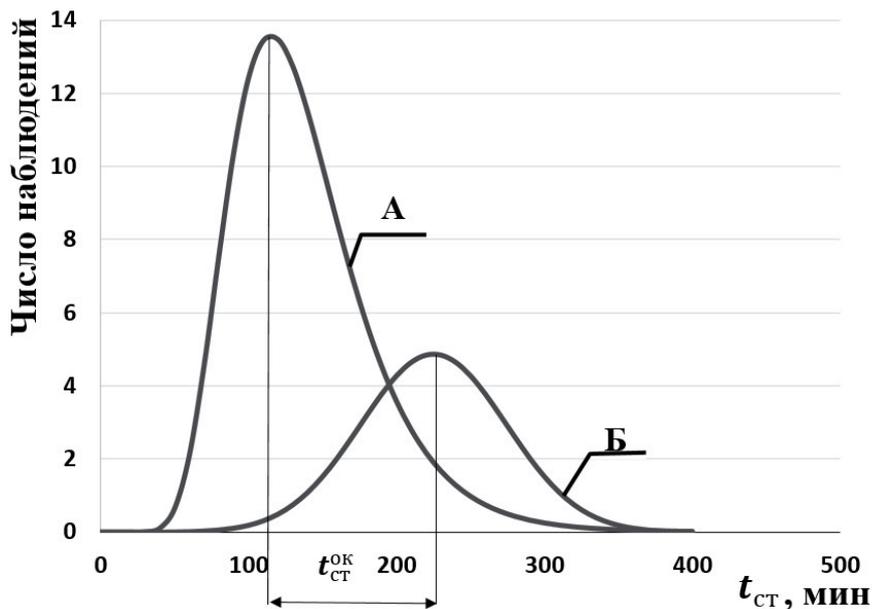


Рис. 1. Изменение длительностей стоянок ( $t_{\text{ст}}$ ) поездов на станции при предоставлении «окон» (Б) и при их отсутствии (А)

та графика предоставления «окон» (8-, 10-, 12- и 24-часовых) и общих потерь поездо-часов на линии  $z_{п/ч} = f(l_y)$ , где  $l_y$  – длина ремонтируемого участка (в км). Экономически целесообразный вариант графика предоставления «окон» определяется критерием минимальных затрат  $C_3$

$$C_3 = f\left(z_{\frac{п}{ч}}, N'_л, N'_м\right) \rightarrow \min. \quad (1)$$

В (1)  $N'_л$  – наличная пропускная способность реконструируемой линии,  $N'_м$  – максимальный поездопоток, который может быть отклонен на параллельную железнодорожную линию.

Третье положение касается нахождения характеристик «категорий» поездов. «Категории» поездов  $n_k$  моделируются перегонными временами хода  $t_r$ , в зависимости от массы поезда, определяемого видом перевозимого груза, родом и типом вагонов для перевозки груза.

Четвертое положение касается возможности освоения прогнозируемых объемов перевозок по реконструируемой линии, с учетом «узких мест», варианта графика предоставления «окон» и пропуска нескольких «категорий» грузовых поездов, на основании оценки вероятности  $P'$  соответствия в течение суток моделируемой пропускной способности  $N'_л$  – потребной  $N''_л$  [14]:

$$P'(P' \geq 3\sigma) = 1 - \Phi\left(\frac{N''_л - N'_л}{\sigma}\right), \quad (2)$$

где  $N''_л$  – потребная пропускная способность рассматриваемого направления движения (четное/нечетное) железнодорожной линии;  $N'_л$  – пропускная способность направления движения реконструируемой линии, полученная с помощью моделирования;  $\sigma$  – отклонение величины суточных колебаний моделируемой пропускной способности от потребной пропускной способности;  $\Phi$  – функция соответствия между моделируемой и потребной пропускной способностью.

## Технология имитационного моделирования пропуска поездов по реконструируемой линии

Технология имитационного моделирования пропуска поездов по реконструируемой линии основана на процедуре оценки задержек поездов на станциях при возможности отклонения поездопотока на параллельные железнодорожные линии хода, в условиях взаимного влияния «окон» при проведении ремонтных работ и процедуре проверки обеспечения пропуска заданного количества грузовых поездов с различными перегонными временами хода в течение суток, что позволяет учесть неравномерность движения при оценке вероятности соответствия моделируемой и потребной пропускной способности линии.

Установлено [15], что количество восьмичасовых «окон» для модернизации железнодорожного пути, сокращаемых за счет совмещения работ, увеличивается с длиной ремонтируемого участка. Например, на участке длиной 3 км оно составляет 2 «окна», а на участке длиной 12 км – 23, что необходимо учитывать при автоматизации расчетов экономически целесообразной продолжительности «окон». Результаты анализа потерь поездо-часов ( $z_{п/ч}$ ) в зависимости от варианта графика предоставления «окон» приведены на рис. 2.

Методика имитационного моделирования позволяет учесть мероприятия по форсированию пропускной и провозной способности на период предоставления «окон», к которым относятся: применение устройств, позволяющих обеспечить движение поездов по сигналам АЛСН по неправильному пути; организация двустороннего пакетного пропуска поездов в период проведения «окна» по открытому пути для поездов обоих направлений и организация обращения соединенных поездов.

Процедура обработки поездов в имитационной модели дает возможность промоделировать пропуск заданного количества грузовых поездов с разными перегонными временами хода в течение суток. При оценке пропускной способности порядок пропуска

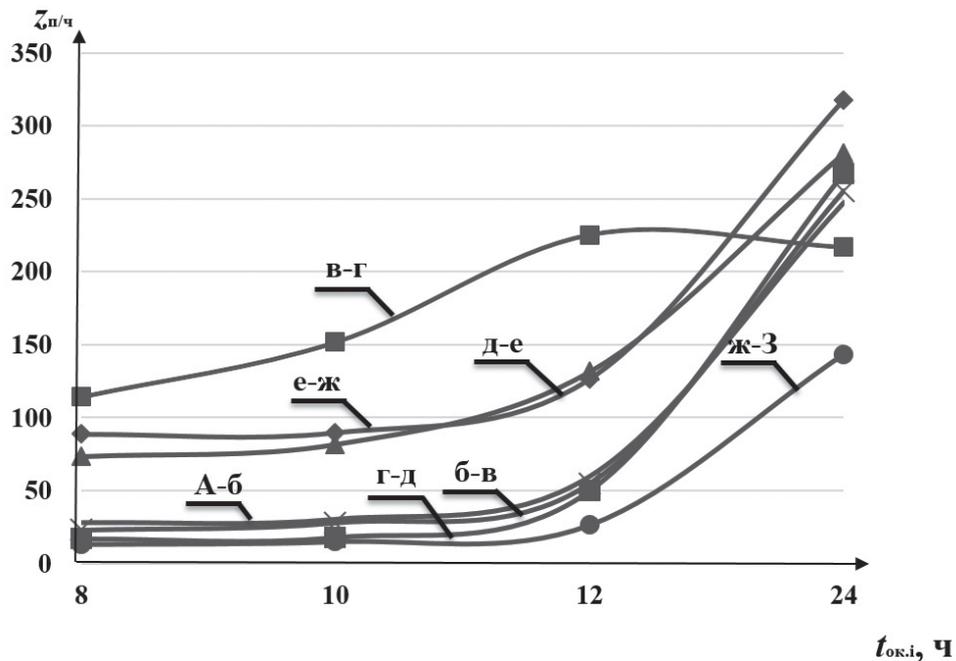


Рис. 2. Результаты анализа потерь поездо-часов ( $z_{п/ч}$ ) в зависимости от варианта графика предоставления «окон», где А-б, б-в, в-г, г-д, д-е, е-ж, ж-З – перегоны ремонтируемого участка, на которых предоставляются «окна»

грузовых поездов принимается равным долям поездов с различными перегонными временами хода от общего количества поездов и первоначально пропускать поезда из «категории» ( $\alpha_{рг1j}$ ), обладающей максимальным приоритетом (рис. 3, слева). При достижении равенства количества поездов в «категориях» поезда случайным образом выбираются из обеих «категорий» (рис. 3, справа).

Вероятность соответствия моделируемой пропускной способности линии потребной [16] для рассматриваемого направления дви-

жения в условиях суточных колебаний пропускной способности реконструируемой линии определяется выражением (2).

Был проведен расчет пропускной способности реальной двухпутной электрифицированной железнодорожной линии, обслуживающей морской порт, длиной 174,7 км, с длинами перегонов от 1,6 до 14,6 км, с 18 промежуточными станциями и 1 технической станцией, оборудованной трехзначной автоблокировкой, на которой производится смена локомотивных бригад, оборудованной трехзначной автобло-

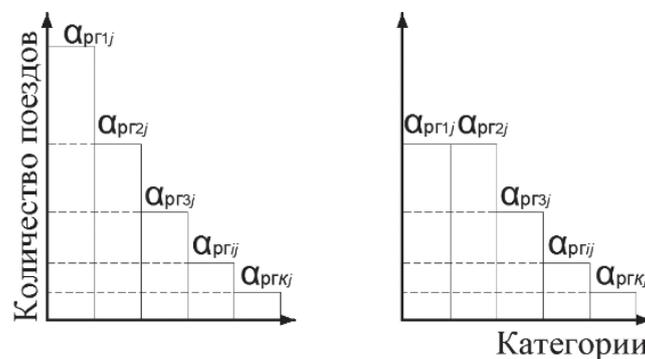


Рис. 3. Алгоритм обработки поездов в имитационной модели в соответствии с «категориями»  $\alpha_{ргij}$

кировкой, при разном количестве грузовых поездов с различными перегонными временами хода, при отсутствии «окон», стоянок на технических станциях и электрической тяги.

Анализ результатов имитационного моделирования показал разницу пропускной способности линии варианта пропуска поездов с равной массой аналогично полученного расчетом по аналитическим формулам, например 4300 т и варианта с соотношением поездов с массами 8096, 4300 и 969 т при электрической тяге 24 поездов в четном направлении и 26 поездов в нечетном, что повышает точность определения пропускной способности линии с помощью методики имитационного моделирования по сравнению с аналитическим методом, за счет увеличения количества учитываемых параметров.

Моделируемая пропускная способность линии оценивалась при различных длительностях занятия приемо-отправочных путей предпортовой станции (рис. 4), с учетом задержек поездов на станциях от предоставления «окон» и пропуска разных «категорий» грузовых поездов. Определена максимальная длительность их занятия, при которой обе-

спечивается превышение моделируемой пропускной способностью потребной.

При оценке вероятности освоения прогнозируемых объемов перевозок заданной номенклатуры грузов при различных длительностях занятия приемо-отправочных путей районных парков предпортовой железнодорожной станции (таблица) для определения критической длительности занятия путей установлено, что в рассматриваемом случае максимальная длительность занятия приемо-отправочных путей станции назначения в условиях перерывов в движении составляет 2 ч, а при их отсутствии – 4 ч.

### Заключение

В работе получены следующие результаты:

1) разработан способ имитационного моделирования оценки пропускной способности реконструируемой железнодорожной линии, включающий обоснование границ моделирования реконструируемой линии, оценку задержек от предоставления «окон», учет характеристик движения грузовых поездов и расчет

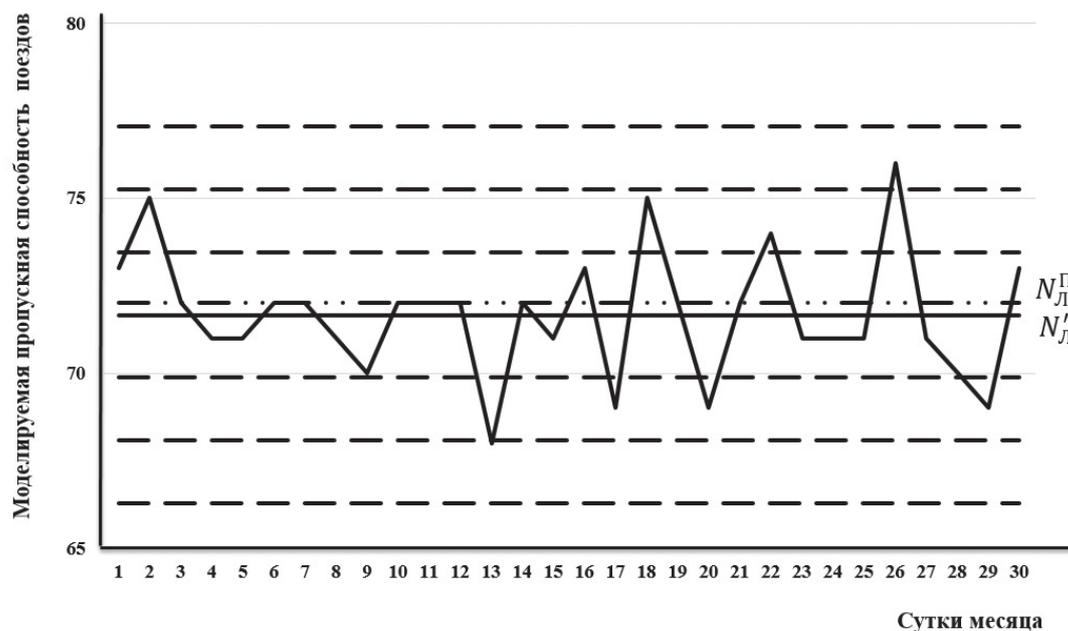


Рис. 4. Результаты расчета отклонений моделируемой пропускной способности от потребной при предоставлении «окон»

Результаты оценки возможности освоения прогнозируемых объемов перевозок заданной номенклатуры грузов с равной вероятностью

№ п/п	Вариант	Длительность занятия путей, ч	$N_{\text{нм}}$	$N_{\text{п}}$	$\sigma$	$P(N_{\text{п}} < N_{\text{нм}})$
1	С перерывами в движении	2	<b>78,93</b>	<b>72</b>	<b>1,93</b>	<b>1</b>
2		4	71,66	72	1,8	0,43
3		6	66,19	72	1,37	0
4		8	57,58	72	1,09	0
5		10	52,06	72	1,16	0
6	Без перерывов в движении	2	85,28	72	2,24	1
7		<b>4</b>	<b>78,46</b>	<b>72</b>	<b>0,78</b>	<b>1</b>
8		6	69,89	72	0,69	0
9		8	57,99	72	0,07	0
10		10	54,01	72	0,4	0

вероятности соответствия моделируемой пропускной способности линии потребной;

2) предложена технология имитационного моделирования пропуска поездов по реконструируемой линии, содержащая процедуру оценки задержек поездов на станциях от предоставления «окон» и процедуру проверки обеспечения пропуска заданного количества грузовых поездов;

3) показано, что на основе обработки результатов имитационного моделирования пропуска поездов по реконструируемой линии при предоставлении «окон», пропуске различных «категорий» грузовых поездов и длительностей занятия путей на станциях существует возможность оценить вероятность соответствия моделируемой и потребной пропускной способности линии.

### Библиографический список

1. Козлов П. А. Имитационная экспертиза – необходимая процедура в составе транспортного проекта / П. А. Козлов, А. Э. Алесандров // Железнодорожный транспорт. – 2010. – № 3. – С. 52–53.

2. Шапкин И. Н. Имитационное моделирование материальных и транспортных потоков / И. Н. Шапкин, Ю. В. Пересветов, А. И. Самохвалов // Железнодорожный транспорт. – 2011. – № 12. – С. 65–67.

3. Тимухина Е. Н. Функциональная надежность – теоретические основы и принципы расчета / Е. Н. Тимухина, Н. В. Кашеева // Современные проблемы транспортного комплекса России. – 2012. – № 2. – С. 98–108.

4. Козлов П. А. Имитационная экспертиза проектов развития инфраструктуры / П. А. Козлов, Н. А. Тушин // Мир транспорта. – 2011. – № 2. – С. 22–25.

5. Осокин О. В. Автоматизированное построение имитационных моделей / О. В. Осокин, В. С. Колокольников, Н. В. Кашеева // Транспорт : наука, техника, управление. – 2014. – № 5. – С. 50–53.

6. Романова П. Б. Формирование поездов различной массы и длины / П. Б. Романова, С. А. Цыганов // Вестник транспорта Поволжья. – 2016. – № 6. – С. 71–76.

7. Тимухина Е. Н. Учет станционных и межпоездных интервалов при построении графика движения в имитационной системе ИСТРА / Е. Н. Тимухина, А. В. Шипулин // Транспорт : наука, техника, управление. – 2012. – № 5. – С. 37–41.

8. Журавлева Н. А. Бизнес-моделирование работы участковой станции при пропуске транзитных поездов / Н. А. Журавлева, В. Г. Карчик, А. Г. Котенко // Железнодорожный транспорт. – 2013. – № 4. – С. 29–32.

9. Кузнецов А. Л. Генезис агентного имитационного моделирования в ходе развития методов тех-

нологического проектирования портов и терминалов / А. Л. Кузнецов // Эксплуатация морского транспорта. – 2009. – № 4. – С. 3–7.

10. Китиков А. Н. Расчет морского фронта методами имитационного моделирования / А. Н. Китиков, А. Л. Кузнецов, И. А. Русинов // Эксплуатация морского транспорта. – 2013. – № 2 (72). – С. 3–6.

11. Муравьев Д. С. Особенности построения имитационной модели технологии работы морского порта в системе Anylogic / Д. С. Муравьев, А. Н. Рахмангулов // Проблемы и перспективы развития Евроазиатских транспортных систем. – 2013. – № 1. – С. 207–209.

12. Котенко А. Г. Оценка достаточности перерабатывающей способности распределительного склада тарно-штучных грузов, при обслуживании семи категорий транспортных средств / А. Г. Котенко, К. Е. Ковалев, В. С. Тимченко // Интеллектуальные системы на транспорте. – 2015. – № 5. – С. 135–144.

13. Кокурин И. М. Методы определения «узких мест», ограничивающих пропускную способность железнодорожных направлений / И. М. Кокурин, В. С. Тимченко // Изв. Петерб. гос. ун-та путей сообщения. – 2013. – Вып. 1. – С. 15–22.

14. Таранцев А. А. Инженерные методы теории массового обслуживания / А. А. Таранцев. – СПб. : Наука, 2007. – 175 с.

15. Тимченко В. С. Имитационное моделирование на железнодорожном транспорте : монография / В. С. Тимченко, К. Е. Ковалев, Д. И. Хомич. – Саарбрюккен, Германия : LAP. LAMBERT Academic Publishing, 2017. – 172 с.

16. Кокурин И. М. Метод оценки вероятности обеспечения потребной пропускной способности железнодорожной линии, используемой для перевозок грузов морского порта, с учетом предоставления «окон» / И. М. Кокурин, В. С. Тимченко // Транспорт Урала. – 2016. – № 2. – С. 81–86.

## References

1. Kozlov P.A. & Alesandrov A. E. Imytatsionnaya ekspertiza – neobkhodimaya protsedura v sostave transportnogo proyekta [Simulation examination – an essential procedure within the scope of a transport

project]. *Railway transport*, 2010, no. 3, pp. 52–53. (In Russian)

2. Shapkyn I. N., Peresvetov Y. V. & Samokhvalov A. I. Imitatsionnoye modelirovaniye materialnykh i transportnykh potokov [Simulation modeling of material and transport flows]. *Railway transport*, 2011, no. 12, pp. 65–67. (In Russian)

3. Timukhina Y.N. & Kasheyeva N. V. Funktsionalnaya nadezhnost – teoreticheskiye osnovy i printsipy rascheta [Functional reliability – theory and calculating principles]. *Modern issues of transport system of the Russian Federation*, 2012, no. 2, pp. 98–108. (In Russian)

4. Kozlov P.A. & Tushyn N.A. Imitatsionnaya ekspertiza proyektov razvitiya infrastruktury [Simulation examination of infrastructure development projects]. *The world of transport*, 2011, no. 2, pp. 22–25. (In Russian)

5. Osokyn O. V., Kolokolnykov V.S. & Kasheyeva N. V. Avtomatizirovannoye postroyeniye imitatsionnykh modeley [Automatized construction of simulation models]. *Transport: science, technology, management*, 2014, no. 5, pp. 50–53. (In Russian)

6. Romanova P.B. & Tsyganov S.A. Formirovaniye poyezdov razlychnoy massy i dlyny [Formation of trains of different bulk and length]. *The Volga region transport bulletin*, 2016, no. 6, pp. 71–76. (In Russian)

7. Timukhina Y.N. & Shypulin A. V. Uchet stantsionnykh i mezhpoyezdnykh intervalov pry postroyenii grafika dvyzheniya v imitatsionnoy sisteme ISTRA [Terminal and train intervals when organizing a displacement time diagram in ISTRA (transport simulation system)]. *Transport: science, technology, management*, 2012, no. 5, pp. 37–41. (In Russian)

8. Zhuravleva N.A., Karchyk V.G. & Kotenko A. G. Biznes-modelirovaniye raboty uchastkovoy stantsii pry propuske tranzytnykh poyezdov [Business modeling of district station functioning when handling through trains]. *Railway transport*, 2013, no. 4, pp. 29–32. (In Russian)

9. Kuznetsov A. L. Genezis agentnogo imitatsionnogo modelirovaniya v khode razvitiya metodov tekhnologicheskogo proyektirovaniya portov i terminalov [Agent simulation modeling genesis in the process of production engineering methods of ports and terminals development]. *Sea transport maintenance*, 2009, no. 4, pp. 3–7. (In Russian)

10. Kitykov A. N., Kuznetsov A. L. & Rusinov I. A. Raschet morskogo fronta metodamy imitatsionnogo modelirovaniya [Sea front analysis by means of simulation modeling]. *Sea transport maintenance*, 2013, no. 2 (72), pp. 3–6. (In Russian)
11. Muravyev D. S. & Rakhmangulov A. N. Osobennosty postroyeniya imitatsionnoy modeli tekhnologii raboty morskogo porta v sisteme Anylogic [Constructing specificities of sea port work technique simulation model in Anylogic system]. *Problems and development prospects of Euro-Asian transport systems*, 2013, no. 1, pp. 207–209. (In Russian)
12. Kotenko A. G., Kovalev K. Y. & Timchenko V. S. Otsenka dostatochnosti pererabatyvayushey sposobnosti raspredelyelnogo sklada tarно-shtuchnykh gruzov, pry obsluzhivanii semy kategoriy transportnykh sredstv [Estimated capacity sufficiency assessment of a package cargo distribution warehouse when maintaining seven categories of transport]. *Transport intelligence systems*, 2015, no. 5, pp. 135–144. (In Russian)
13. Kokurn I. M. & Timchenko V. S. Metody opredeleniya “uzkykh mest”, ogranichivayushikh prpusknuyu sposobnost zheleznodorozhnykh napravleniy [Methods of traffic bottlenecks’ identification, limiting train-handling capacity of railway directions]. *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2013, issue 1 (34), pp. 15–22. (In Russian)
14. Tarantsev A. A. *Inzhenerniye metody teorii massovogo obsluzhivaniya [Engineering methods of queuing theory]*. Saint Petersburg, Nauka Publ., 2007, 175 p. (In Russian)
15. Timchenko V. S., Kovalev K. Y. & Khomych D. I. *Imitatsionnoye modelirovaniye na zheleznodorozhnom transporte [Simulation modeling on railway transport]*. Saarbrücken, Germany, LAP. LAMBERT Academic Publ., 2017, 172 p. (In Russian)
16. Kokurn I. M. & Timchenko V. S. Metod otsenky veroyatnosti obespecheniya potrebnoy prpusknoy sposobnosti zheleznodorozhnoy lynii, ispolzuyemoy dlya perevozok gruzov morskogo porta, s uchetom predostavleniya “okon” [The method of estimated probability of the required train-handling capacity provision of a railway line, used for seaport cargo transportation, in case of possession approval]. *The Ural Transport*, 2016, no. 2, pp. 81–86. (In Russian)

КОТЕНКО Алексей Геннадьевич – доктор техн. наук, доцент, заведующий кафедрой, algenko@gmail.com (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I); КОКУРИН Иосиф Михайлович – доктор техн. наук, профессор, kokurim@mail.ru (Институт проблем транспорта имени Н. С. Соломенко РАН); БЕЛОЗЕРОВ Владимир Леонидович – доктор экон. наук, профессор, v.belozerov@mail.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I); \*ТИМЧЕНКО Вячеслав Сергеевич – научный сотрудник, tim4enko.via4eslav@mail.ru (Институт проблем транспорта имени Н. С. Соломенко РАН).

УДК 629.7.052

Т. И. Олевинская

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВИРТУАЛЬНОЙ ГЛИССАДЫ ДЛЯ ВЫЧИСЛЕНИЯ ОТКЛОНЕНИЙ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА НА КОНЕЧНОМ УЧАСТКЕ ПОСАДКИ

Дата поступления: 23.03.2017

Решение о публикации: 24.04.2017

### Аннотация

**Цель:** Разработка способа вычисления параметров наведения летательного аппарата (линейного и углового отклонения от синтетической глиссады) по сигналам глобальной спутниковой навигационной системы. В отличие от существующих методов в качестве опорной поверхности для наведения по вертикали предполагается использовать наклонную плоскость, содержащую линию глиссады. **Методы:** Проведено экспериментальное исследование предложенного способа расчета отклонений, выполнено сравнение результатов с данными определения параметров наведения существующими методами. **Результаты:** Показано, что результаты вычисления отклонений от глиссады разработанным способом и теми методами, которые в настоящее время применяются для посадки транспортных самолетов, практически не отличаются. **Практическая значимость:** Использование освещенного в статье способа вычисления отклонений летательного аппарата от глиссады позволит существенно упростить развертывание наземного сегмента системы посадки в аэропортах, что даст возможность оборудовать спутниковыми системами точной посадки региональные аэродромы 3–4-го класса, которые оборудованы системами неточного захода на посадку (приводными радиостанциями или VOR) либо не имеют никаких радионавигационных средств. Внедрение системы спутниковой посадки позволит экипажам летательных аппаратов (ЛА), оснащенных соответствующим бортовым оборудованием, перейти в случае необходимости от полета по правилам визуальных полетов к полету по правилам полетов по приборам. Это понизит метеоминимум аэродромов, что приведет к уменьшению количества нелетных дней и повысит эффективность использования аэродромов и флота. Еще одно преимущество применения спутниковой системы посадки заключается в том, что она позволяет курсантам отрабатывать процедуру захода на посадку по курсо-глиссадной системе.

**Ключевые слова:** Глобальная навигационная спутниковая система, точный заход на посадку, глиссада, летательный аппарат, траектория посадки.

**Tatyana I. Olevinskaya**, postgraduate student, olevinska-ans@yandex.ru (National Aviation University, Kiev) APPLICATION OF VIRTUAL GLIDE PATH FOR CALCULATION OF AIRCRAFT DEFLECTION AT THE FINAL STAGE OF LANDING

### Summary

**Objective:** The development of a calculation method of aircraft guidance parameters (linear and angular deflection from a synthetic glide path) by means of global satellite navigation system signals. As opposed to the existing methods, it is suggested to use an inclined plane, containing a glide slope line, as a base surface for vertical guidance. **Methods:** An experimental research was carried out, based on the suggested method of deflections' calculation, as well as the comparison of results was fulfilled with identification of guidance parameters' data by means of the existing methods. **Results:** It is shown that the results of calculating deflections from a glide path by means of the developed method and those methods, which are

currently applied in transport planes landing, are practically the same. **Practical importance:** Application of the given method of calculating aircraft deflections from a glide path will make it possible to simplify significantly the deployment of the ground segment of landing system in airports, which in its turn will give the opportunity to equip regional airdromes of the third and the fourth class, which are currently equipped with imprecise approach systems (compass locators or, the so-called, VOR) or have no radio-navigation aids, with satellite systems of precision approach. Satellite landing system implementation will allow aircraft crews, provided with proper airborne equipment, to pass, in case of need, from a contact fly to an instrumental fly conducted under flight rules. The above mentioned will reduce airdromes meteorological minimum, which in its turn will cause the decrease in the number of non-flying days and increase the efficiency of airdromes and fleet exploitation. One more advantage of satellite landing system application is the fact that it allows students to work out the procedure of approach on instrument landing system.

**Keywords:** Global satellite navigation system, precision approach, glide path, aircraft, landing path.

## Введение

Посадка летательного аппарата (ЛА) является одним из наиболее сложных, ответственных и потенциально опасных этапов полета. Для обеспечения возможности выполнять посадку в автоматическом режиме с середины XX в. используются системы точного захода на посадку, обеспечивающие горизонтальное и вертикальное наведение (измерение отклонения от намеченной траектории снижения). В настоящее время наиболее распространена радиомаячная курсоглиссадная система ILS (Instrument Landing System) [1], активно внедряется спутниковая система посадки GLS (GNSS Landing System) [2]. По сравнению с ILS GLS обладает существенными преимуществами, в числе которых уменьшение количества наземного оборудования. Тем не менее развертывание спутниковой системы посадки в аэропорту сопряжено со значительными трудозатратами и требует согласований, поэтому сейчас системами GLS оборудуются только крупные аэропорты [3]. В Российской Федерации спутниковой системой посадки оснащены аэропорты Кемерово [4] и Рощино (Тюмень) [5].

В то же время существенная доля авиационных работ выполняется воздушными судами (ВС) малой авиации (весом до 21 т), которые используют для взлета и посадки региональные аэродромы 3–4-го класса (с несущей способностью покрытия до 30 т) и посадоч-

ные площадки, не являющиеся аэродромами. Отсутствие в аэропорту наземного посадочного оборудования и, как следствие, схемы инструментального захода обязывает такие ВС выполнять заход по правилам визуальных полетов (ПВП) [6]. Это, в свою очередь, накладывает ограничения, связанные с метеорологическими условиями. Так, минимальная горизонтальная видимость в зоне взлета и посадки для полетов по ПВП должна составлять 2000 м для равнинной местности и 5000 м – для горной. Заход по правилам полетов по приборам (ППП) по I категории ИКАО можно осуществлять при горизонтальной видимости 800 м. Анализ архива метеосводок [7] о фактической погоде в аэропорту Борисполь за период с 1 по 30 ноября 2015 г. показал, что из 1265 периодов по 30 мин каждый для посадки по ПВП в равнинной местности были непригодны 96 периодов, а для посадки по ППП – 64. Таким образом, задача оборудования региональных аэродромов системами точного захода на посадку является актуальной. Наиболее перспективной, с этой точки зрения, является спутниковая система посадки GLS.

## Анализ литературных источников

В настоящее время существует несколько подходов к вычислению параметров наведе-

ния при посадке по GLS. В 2001 г. компанией «Rockwell Collins» был получен патент на спутниковую систему посадки с принципом наведения, идентичным ILS (Satellite landing system having instrument landing system look alike guidance) [8]. Патент базируется на материале, изложенном в статье [9]. Опираясь на данные, изложенные в тексте патента [8], компания «The Boeing Company» создала собственную систему вычисления параметров наведения и в 2012 г. получила патент [10]. Оба метода разрабатывались с целью внедрения в аэропортах гражданской авиации для посадки транспортных ВС. В каждом из них для точного определения параметров наведения используется опорная плоскость сложной формы – конус либо гиперboloид из двух пластов, что предполагает сложные расчеты. В статье [11] предложен метод наведения, предполагающий вычисление углового отклонения по горизонтали от плоскости, содержащей взлетно-посадочную полосу (ВПП), с последующим вычитанием угла наклона глиссады.

### Цель исследования

Ставится задача разработки способа определения отклонений ЛА от глиссады по сигналам Глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС) с использованием в качестве опорных поверхностей вертикальной и наклонной плоскостей.

### Изложение основного материала

Суть данного способа заключается в том, что в пространстве задаются плоскости курса и глиссады, пересечение которых образует заданную траекторию снижения (линию посадочного курса). Все линейные отклонения отсчитываются не от линии глиссады, а от задающих ее плоскостей.

Вертикальную плоскость (опорную плоскость курса) можно задать по координатам трех точек:  $L$  (соответствует точке LTP в документах ICAO [12]),  $P$  (соответствует точке GERP),  $T$  (соответствует точке DCP). Наклонная плоскость (опорная плоскость глиссады) задается точками  $P$  (GERP),  $T$  (DCP) и  $K$  (эта точка в документах ICAO не упоминается). Таким образом, для обеспечения наведения необходимо знать только геодезически измеренные координаты 4 точек на ВПП (рис. 1). Точка  $L$  находится на пересечении центральной оси ВПП с ее посадочным торцом. Точка  $T$  расположена непосредственно над точкой  $L$  на высоте желаемого пересечения ЛА торца ВПП. Точка  $P$  (точка, в которую проецируется глиссада) выбирается на центральной оси ВПП таким образом, чтобы угол наклона глиссады составлял около  $3^\circ$  (это значение может варьироваться в зависимости от типов и возможностей ЛА, для которых предназначена посадочная площадка). Точка  $K$  размещается на кромке ВПП так, чтобы отрезок  $PK$  был перпендикулярен центральной оси ВПП и параллелен ее торцам.

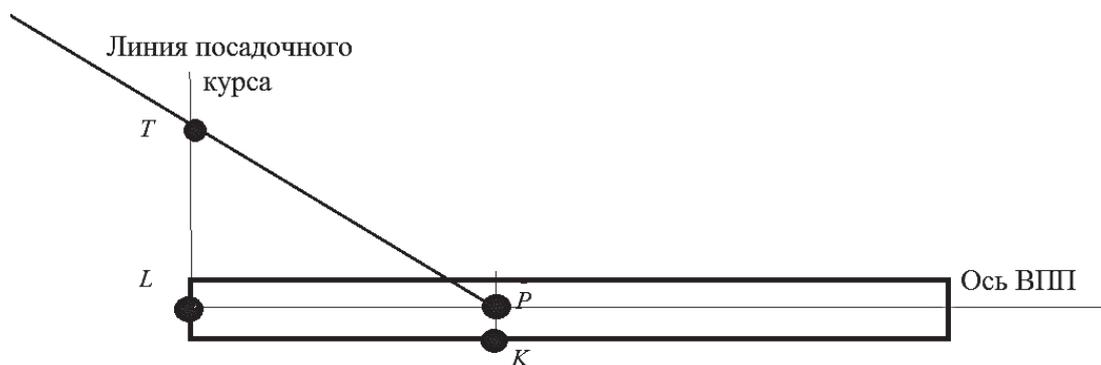


Рис. 1. Выбор точек на ВПП

Плоскость по координатам трех точек в пространстве задается следующим образом [13]:

$$\begin{vmatrix} x - x_1 & y - y_1 & z - z_1 \\ x_2 - x_1 & y_2 - y_1 & z_2 - z_1 \\ x_3 - x_1 & y_3 - y_1 & z_3 - z_1 \end{vmatrix} = 0, \quad (1)$$

где  $(x_1, y_1, z_1)$ ,  $(x_2, y_2, z_2)$ ,  $(x_3, y_3, z_3)$  – координаты точек, не лежащих на одной прямой. Подставив в уравнение (1) известные координаты трех точек, получим уравнение вида  $Ax + By + Cz + D = 0$ . Для того чтобы определить взаимное расположение точки (в рассматриваемом случае – бортового приемника ГНСС, расположенного поблизости от центра масс ЛА) и плоскости, нужно подставить координаты точки  $M(x, y, z)$  непосредственно в уравнение плоскости. Если решением уравнения станет положительное число, точка находится справа от плоскости, если отрицательное – слева. Если вычисляются отклонения в вертикальной плоскости (по каналу глиссады), положительные числа соответствуют отклонению вверх, отрицательные – отклонению вниз.

Расстояние от точки до плоскости (величина линейного отклонения) равно длине перпендикуляра, опущенного из точки на плоскость. Если задано уравнение плоскости  $Ax + By + Cz + D = 0$  и координаты точки  $M(x, y, z)$ , то расстояние можно найти по формуле

$$d = \frac{|A \cdot x + B \cdot y + C \cdot z + D|}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}}. \quad (2)$$

Угловое отклонение рассчитывается следующим образом:

$$\sin \alpha = \frac{|A \times l + B \times m + C \times n|}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2} \times \sqrt{l^2 + m^2 + n^2}}. \quad (3)$$

В формуле (3)  $A, B, C$  – коэффициенты уравнения плоскости,  $l, m, n$  – коэффициенты направляющего вектора прямой, соединяющей точки  $M$  и  $P$  (центр масс ЛА и точку, в которую проецируется глиссада).

Измерение координат навигационным приемником, находящимся на борту ЛА, происходит в системе координат WGS-84 [14]. Поскольку посадка проводится на сравнительно небольшом участке, целесообразно осуществлять все расчеты в местной системе координат ENU (East-North-Up).

В качестве бортовой составляющей системы посадки в настоящее время обычно применяется Primary flight display, или PFD (рис. 2). Во время посадки на PFD отображаются два ряда точек – внизу и справа от основного изображения, которые предназначены для индикации соответственно бокового и вертикального отклонения.

Ромбы отображают текущее отклонение ЛА относительно посадочной траектории. Эта информация позволяет экипажу скорректировать положение путем отклонения рулевых поверхностей. Если посадка происходит в автоматическом режиме, коррекцию отклонений осуществляет автопилот. Цена деления шкалы в плоскости курса –  $0,5^\circ$  (одной точке соответствует  $0,5^\circ$ ), в плоскости глиссады –  $0,14^\circ$  (одной точке соответствует  $0,14^\circ$ ). Таким образом, полное отклонение (full scale deviation) в плоскости курса равно  $2,5^\circ$ , в плоскости глиссады –  $0,7^\circ$ . Максимально допустимое

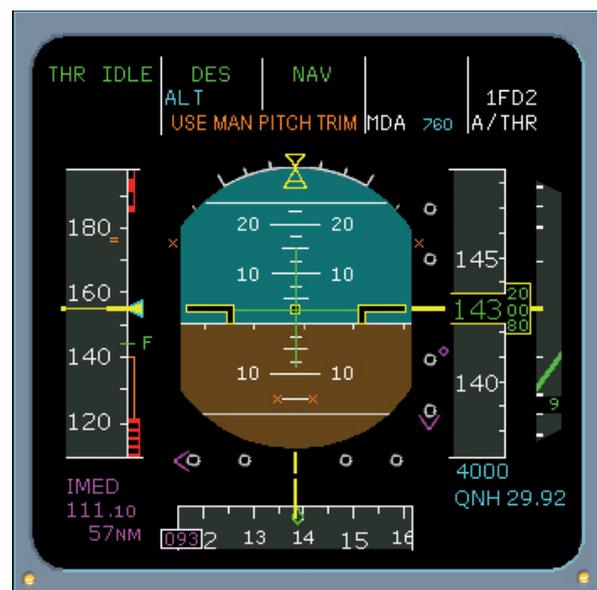


Рис. 2. Бортовая составляющая системы посадки PFD

отклонение ЛА по время прямолинейного движения по глиссаде составляет 0,5 точки в плоскости глиссады и 0,25 точки в плоскости курса. При превышении данных показателей заход считается нестабилизированным, и экипаж или автопилот должен немедленно принять меры к уходу на второй круг.

### Экспериментальное исследование

Для изучения предложенного способа определения параметров наведения на глиссаду при посадке был проведен эксперимент. Дата проведения – 20 октября 2016 г., место – набережная Макарова (г. Санкт-Петербург).

На ровном участке набережной с применением геодезического приемника GNSS, лазерного дальномера и угломера был создан макет ВПП шириной 2 м, длиной 46 м, с углом наклона глиссады  $5^\circ$  и высотой пересечения торца ВПП, равной 2 м. Точка, в которую проецируется глиссада, равноудалена от торцов ВПП и находится на ее оси. Масштаб ВПП был выбран произвольно, на результаты измерения он влияния не оказывает.

Опорные точки, расположенные на ВПП, создают прямоугольник:

1. Точка  $L$  с координатами в системе WGS-84  $[59^\circ 56' 58.88863 \text{N}, 30^\circ 16' 36.67707 \text{E}, 18.642]$  – точка на пересечении посадочного торца и оси ВПП.

2. Точка  $P$  с координатами  $[59^\circ 56' 59.56987 \text{N}, 30^\circ 16' 37.25880 \text{E}, 18.893]$  – точка пересечения линии глиссады с осью ВПП.

3. Точка  $R$  с координатами  $[59^\circ 56' 58.87817 \text{N}, 30^\circ 16' 36.73029 \text{E}, 18.649]$  – точка на пересечении посадочного торца и кромки ВПП (данная точка в вычислениях не участвует).

4. Точка  $K$  с координатами  $[59^\circ 56' 59.55853 \text{N}, 30^\circ 16' 37.31310 \text{E}, 18.887]$  – точка на кромке ВПП, выбранная таким образом, чтобы отрезок  $PK$  был параллелен отрезку  $LR$ .

5. Точка  $T$  с координатами  $[59^\circ 56' 58.88880 \text{N}, 30^\circ 16' 36.67760 \text{E}, 20.663]$  – точка пересечения торца ВПП – расположена над точкой  $L$  на заранее выбранной высоте 2 м.

Схема взаимного расположения точек  $L, P, R, K, T$ , созданная при помощи программы, написанной в среде MATLAB [15], приведена на рис. 3.

Точки  $L, P, T$  задают плоскость курса (рис. 4, а), точки  $P, T, K$  – плоскость глиссады (рис. 4, б).

Все измерения координат проводились приемником Javad Sigma-G3 с подключением к спутниковой геодезической сети «GeoSpider» в режиме «кинематика», который обеспечивает сантиметровую точность как по горизонтали, так и по вертикали. На следующем шаге

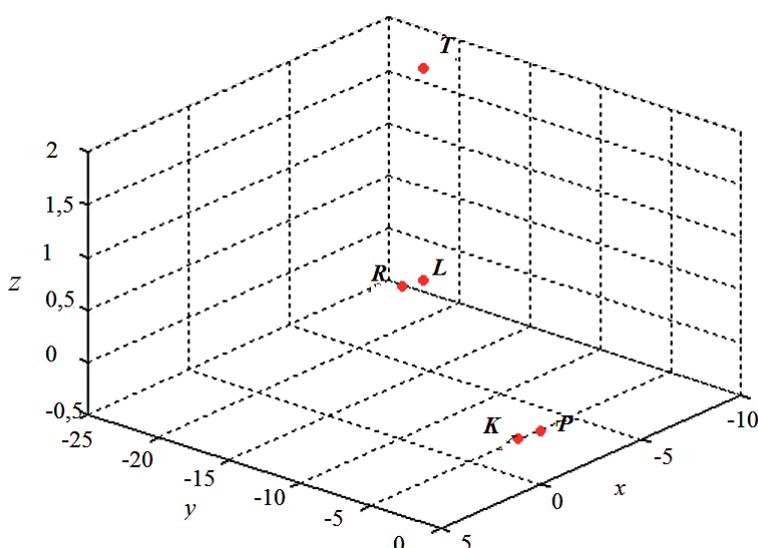


Рис. 3. Схема взаимного расположения точек  $L, P, R, K, T$

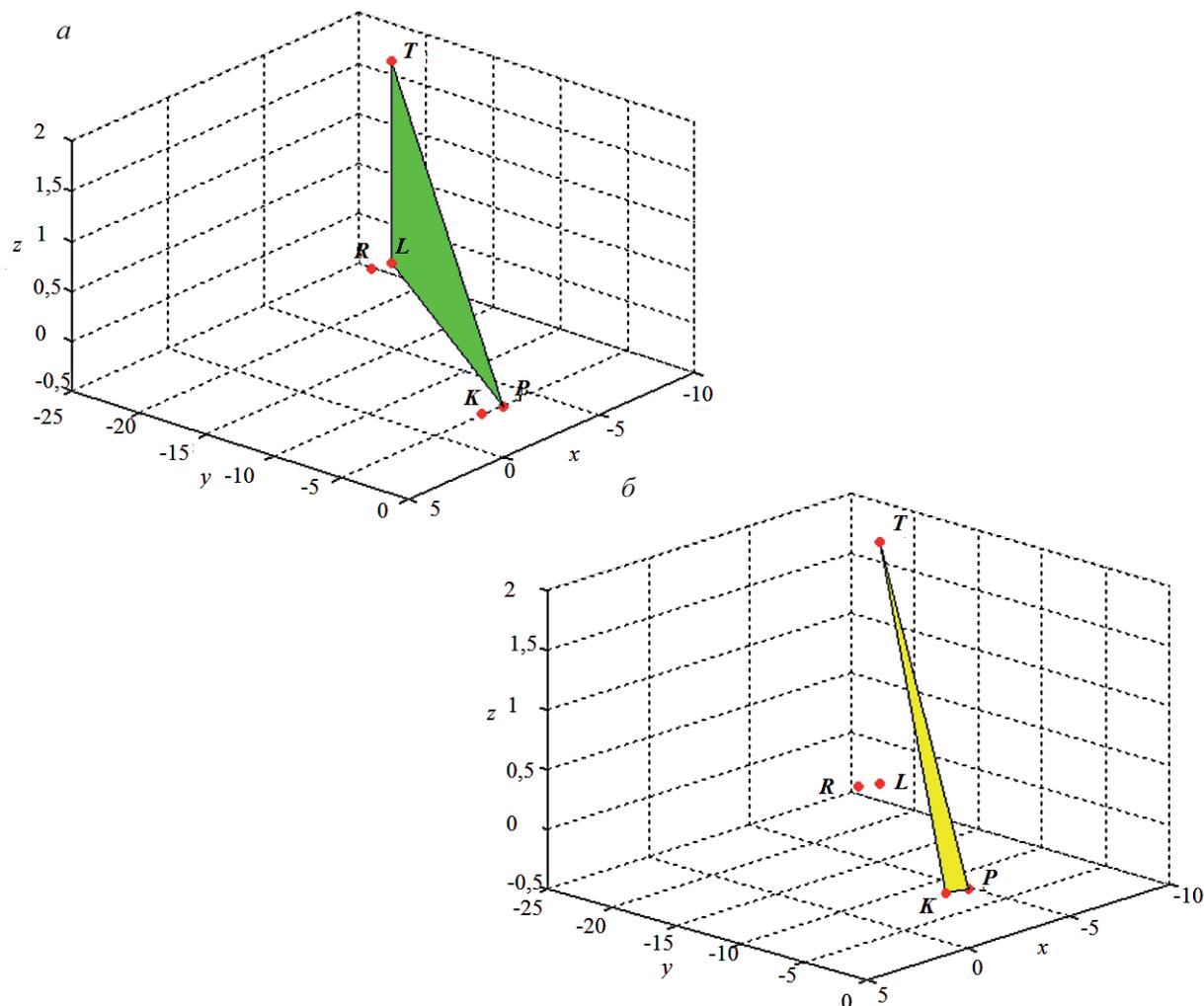


Рис. 4. Плоскость курса (а) и плоскость глиссады (б)

было осуществлено 24 измерения координат вышеуказанным приемником, который постепенно перемещался вдоль лазерного луча, направленного из точки  $P$  в точку  $T$  (имитировалась траектория движения бортового приемника во время посадки). Результаты измерений (трехмерные координаты каждой точки) представлены на рис. 5.

После обработки полученных координат по формулам (1)–(3) были получены значения угловых отклонений 24 точек от плоскостей курса и глиссады (рис. 6).

На рис. 6, а положительные значения соответствуют отклонению приемника ГНСС вправо от заданной в пространстве по точкам  $P$ ,  $T$  и  $L$  плоскости курса, отрицательные – отклонению влево, на рис. 6, б положительные

значения – отклонению вверх от заданной в пространстве по точкам  $K$ ,  $P$  и  $T$  плоскости глиссады, отрицательные – отклонению вниз. По горизонтали на графиках отложены порядковые номера измерений, по вертикали – угловое отклонение, в градусах.

Те же результаты измерений координат были использованы для определения отклонений методами, запатентованными компаниями «The Boeing Company» и «Rockwell Collins». В первом случае применялась модель плоской Земли (формулы также даны в [9]), во втором вычисления выполнялись для сферической подстилающей поверхности (формулы приведены в [10]). Результаты сопоставления полученных отклонений представлены на рис. 7, 8 (по горизонтали на графиках отложены по-

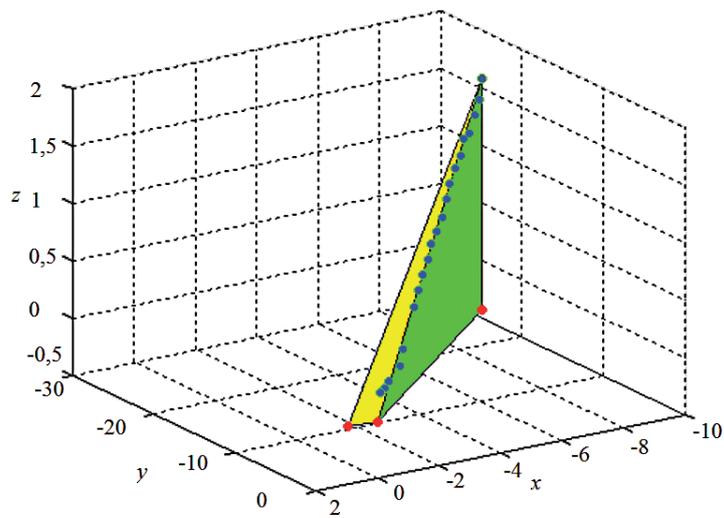
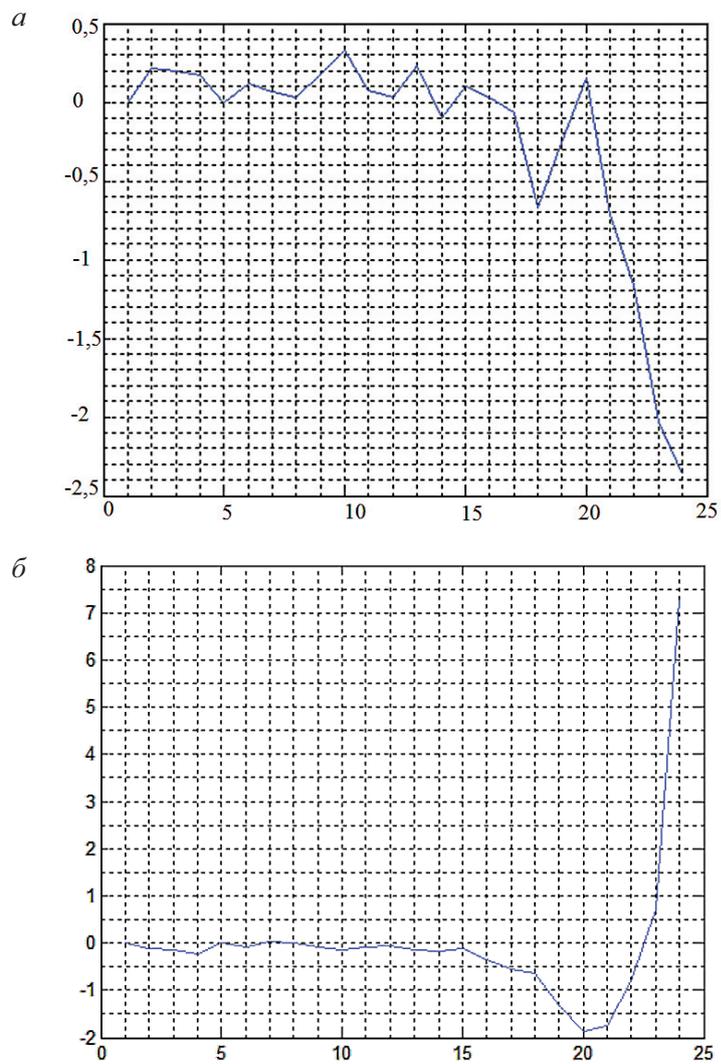


Рис. 5. Результат измерения координат бортового приемника

Рис. 6. Результат измерений отклонений:  $a$  – от плоскости курса;  $b$  – от плоскости глissады

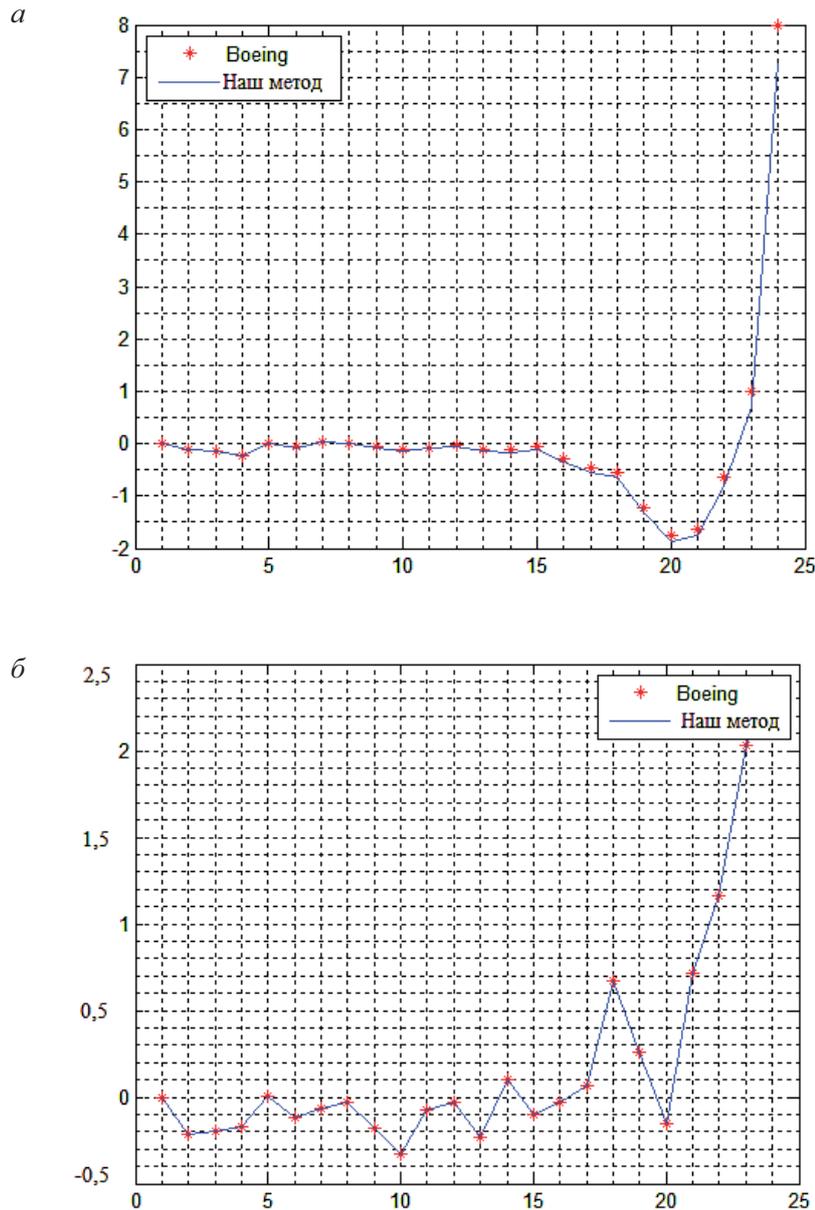


Рис. 7. Результат сопоставления отклонений, полученных рассматриваемым способом и методом «The Boeing Company»:

*а* – в плоскости глissады; *б* – в плоскости курса

рядковые номера измерений, по вертикали – угловое отклонение, в градусах).

### Заклyчение

Из рис. 7, 8 следует, что расхождения оценок отклонения, определенных различными способами, незначительны.

Максимальная величина расхождения для канала курса составила  $0,0013^\circ$ , для канала глissады –  $0,28^\circ$ . Таким образом, можно сделать вывод, что для участка, на котором производится посадка ВС малой авиации, эллипсоидность Земли незначительна. Преимущество представленного в статье способа вычисления отклонений ЛА от глissады перед применяющимися в настоящее время заключается в ис-

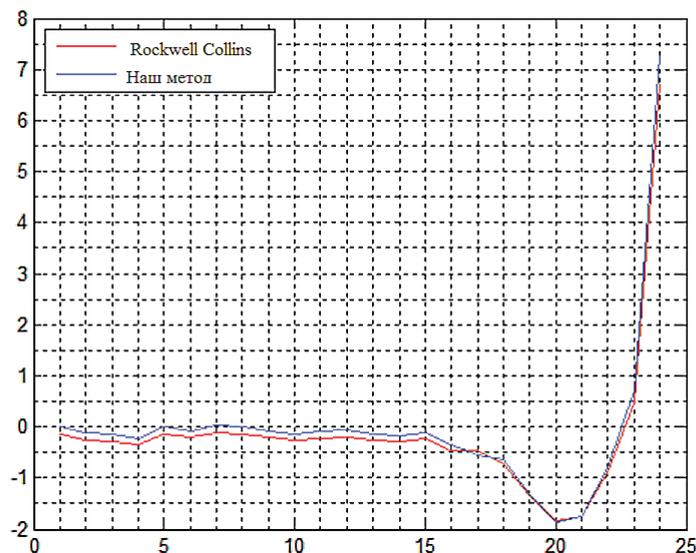


Рис. 8. Результат сопоставления отклонений, полученных рассматриваемым способом и методом «Rockwell Collins» (в плоскости глиссады)

пользовании более простой опорной поверхности для вычисления отклонения по вертикали, следствием чего является уменьшение количества расчетов.

Практическое применение предложенного способа заключается в том, что значения углового отклонения ЛА от глиссады в двух плоскостях можно использовать в качестве входных данных для последующей компенсации отклонения и стабилизации ЛА на глиссаде. Синтез закона управления автоматическим отклонением рулевых поверхностей на примере канала тангажа освещен в статье [16]. В формулу потребного угла отклонения руля высоты наряду с текущим отклонением ЛА от глиссады входят текущий угол тангажа, скорость ЛА (вопрос вычисления приборной скорости с помощью бортового приемника ГНСС подробно рассмотрен в [17]) и физические параметры самолета.

### Библиографический список

1. Instrument Landing System and Ancillary Electronic Component Configuration and Performance Requirements. – URL : <https://www.faa.gov/documentLibrary/media/Order/6750.24E.pdf> (дата обращения : 17.05.2017).

2. Ackland J. Global Navigation Satellite System Landing System / John Ackland, Thomas Imrich, Tim Murhpy. – URL : [http://www.boeing.com/commercial/aeromagazine/aero\\_21/gnss.pdf](http://www.boeing.com/commercial/aeromagazine/aero_21/gnss.pdf) (дата обращения : 17.05.2017).

3. GNSS Frequently Asked Questions. – URL : [https://www.faa.gov/about/office\\_org/headquarters\\_offices/ato/service\\_units/techops/navservices/gnss/faq/laas/](https://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/ato/service_units/techops/navservices/gnss/faq/laas/) (дата обращения : 17.05.2017).

4. S7 Airlines is the first Russian airline approved for GLS landing. – URL : <https://www.s7.ru/home/about/news/s7-airlines-is-the-first-russian-airline-approved-for-gls-landing> (дата обращения : 18.05.2017).

5. Аэропорт Рожино принял воздушное судно по спутниковой системе захода на посадку. – URL : <http://www.tjm.aero/mediacenter/news/149902/> (дата обращения : 18.05.2017).

6. Правила полетов. – Приложение 2 к Конвенции о международной гражданской авиации ИКАО. Изд. 10-е. – Монреаль, 2005. – Июль.

7. Заболотников Г.В. Использование международных авиационных метеорологических кодов METAR (SPECI) и TAF / Г.В. Заболотников, М.Г. Веселкин. – СПб. : ПИТМУ, 2006. – 33 с.

8. Satellite landing system having instrument landing system look alike guidance. Патент US 6239745. – URL : <https://www.google.com/patents/US6239745> (дата обращения : 18.05.2017).

9. Stratton D. Al. Guidance Characteristics of GNSS Landing Systems / D. Al. Stratton // IEEE / AIAA Digital Avionics System Conference. – Бельвю, 1998. – Ноябрь.
10. Airplane Position Assurance Monitor. Патент US 20120265376 A1. – URL : <https://www.google.com/patents/US20120265376> (дата обращения : 18.05.2017).
11. Ковалевский Э. А. Определение параметров наведения при посадке летательного аппарата по технологии GNSS / Э. А. Ковалевский, В. В. Конин, Т. И. Олевинская // Вестн. Нац. авиац. ун-та. – 2013. – № 3 (56). – С. 18–21.
12. Авиационная электросвязь. – Приложение 10 к Конвенции о международной гражданской авиации ИКАО. Изд. 6-е. – Монреаль, 2006. – Июль.
13. Выгодский М. Я. Справочник по высшей математике / М. Я. Выгодский. – М. : Наука, 1977. – 852 с.
14. Конин В. В. Системы спутниковой радионавигации / В. В. Конин, В. П. Харченко. – Киев : Холтех, 2010. – 509 с.
15. Васильев А. Н. Matlab : самоучитель. Практический подход / А. Н. Васильев. – СПб. : Наука и техника, 2012. – 448 с.
16. Петунин В. И. Синтез законов управления канала тангажа автопилота / В. И. Петунин // Вестн. Уфимск. гос. авиац. техн. ун-та. – 2007. – № 2 (20). – С. 25–31.
17. Конин В. В. Определение приборной скорости самолета без системы воздушных сигналов / В. В. Конин, Т. И. Олевинская // Вестн. Инженер. акад. Украины. – 2016. – № 3. – С. 15–18.
3. GNSS Frequently Asked Questions. URL: [https://www.faa.gov/about/office\\_org/headquarters\\_offices/ato/service\\_units/techops/navservices/gnss/faq/laas/](https://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/ato/service_units/techops/navservices/gnss/faq/laas/) (accessed: 17.05.2017).
4. S7 Airlines is the first Russian airline approved for GLS landing. URL: <https://www.s7.ru/home/about/news/s7-airlines-is-the-first-russian-airline-approved-for-gls-landing> (accessed: 18.05.2017).
5. Aeroport Roshino prynyal vozdushnoye sudno po sputnykovoy systeme zakhoda na posadku [Roshino airport received an aircraft via satellite landing system]. URL: <http://www.tjm.aero/mediacenter/news/149902/> (accessed: 18.05.2017). (In Russian)
6. Pravila poletov [Flight rules]. Attachment 2 of Convention on international civil aviation ICAO, issue 10. Montreal, 2005, July. (In Russian)
7. Zabolotnykov G. V. & Veselkyn M. G. Ispolzovaniye mezhdunarodnykh aviatsionnykh meteorologicheskikh kodov METAR (SPECI) i TAF [Application of International aeronautical meteorological codes METAR (SPECI) and TAF]. Saint Petersburg, Russian State Hydrometeorological University Publ., 2006, 33 p. (In Russian)
8. Satellite landing system having instrument landing system look alike guidance. Patent US 6239745. URL: <https://www.google.com/patents/US6239745> (accessed: 18.05.2017).
9. Stratton D. Al. Guidance characteristics of GNSS Landing Systems. IEEE/AIAA Digital Avionics System Conference. Bellevue, 1998, November.
10. Airplane Position Assurance Monitor. Patent US 20120265376 A1. URL: <https://www.google.com/patents/US20120265376> (accessed: 18.05.2017).
11. Kovalevsky E. A., Konin V. V. & Olevinskaya T. I. Opredeleniye parametrov navedeniya pry posadke letatel'nogo apparata po tekhnologii GNSS [Guidance parameters evaluation in the process of aircraft landing by means of GNSS technology]. National aviation University Bulletin, 2013, no. 3 (56), pp. 18–21. (In Russian)
12. Aviatsionnaya svyaz [Aeronautical communication]. Attachment 10 of convention on international civil aviation ICAO, issue 6. Montreal, 2006, July. (In Russian)
13. Vygodsky M. Y. Spravochnik po vysshey matematyke [Reference book on higher mathematics]. Moscow, Nauka Publ., 1977, 852 p. (In Russian)

## References

1. Instrument Landing System and Ancillary Electronic Component Configuration and Performance Requirements. URL: <https://www.faa.gov/documentLibrary/media/Order/6750.24E.pdf> (accessed: 17.05.2017).
2. Ackland J., Imrich T. & Murphy T. Global Navigation Satellite System Landing System. URL: [http://www.boeing.com/commercial/aeromagazine/aero\\_21/gnss.pdf](http://www.boeing.com/commercial/aeromagazine/aero_21/gnss.pdf) (accessed: 17.05.2017).

14. Konin V.V. & Kharchenko V.P. *Systemy sputnikovoy radionavigatsii* [Satellite navigation systems]. Kiev, Kholtekh Publ., 2010, 509 p. (In Russian)
15. Vasiliev A.N. *Matlab. Samouchitel. Praktichesky podkhod* [Teach-yourself book. Practical approach]. Saint Petersburg, Nauka i Tekhnika Publ., 2012, 448 p. (In Russian)
16. Petunin V.I. Syntez zakonov upravleniya kanala tangazha avtopylota [Control laws of autopilot pitch attitude control synthesis]. *Ufa State aviation Technical University Bulletin*, 2007, no. 2 (20), pp. 25–31. (In Russian)
17. Konin V.V. & Olevinskaya T.I. Opredeleniye prybornoy skorosty samoleta bez systemy vozdukhnykh signalov [Assessment of aircraft indicated speed without air data system]. *Vestnik Inzhenernoy akademii Ukraini* [Engineering academy of Ukraine Bulletin], 2016, no. 3, pp. 15–18. (In Russian)

ОЛЕВИНСКАЯ Татьяна Игоревна – аспирант, olevinska-ans@yandex.ru (Национальный авиационный университет, Киев).