

**МОДЕЛЬ РЕАЛИЗАЦИИ БАРЬЕРНЫХ ФУНКЦИЙ
ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ СОХРАННОСТИ ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ
ПРИ ИХ ПРИЕМЕ НА ИНФРАСТРУКТУРУ ОАО «РЖД»**

**СМЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К ОРГАНИЗАЦИИ
ПЕРЕВОЗОЧНОГО ПРОЦЕССА
НА ОСНОВЕ ТЕХНИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ**

**СИСТЕМА ДЛЯ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ СТОЛКНОВЕНИЙ
НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ПЕРЕЕЗДЕ
ПРИ ВЫНУЖДЕННОЙ ОСТАНОВКЕ АВТОТРАНСПОРТА**

**РАСЧЕТ ДОЛЕЙ ДЕФЕКТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ
СТРЕЛОЧНОЙ ПРОДУКЦИИ**



МЕЖДУНАРОДНЫЙ РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

1. Галкин Александр Геннадьевич, д-р техн. наук, профессор, главный редактор, УрГУПС, Екатеринбург, Россия
2. Буйносов Александр Петрович, д-р техн. наук, профессор, УрГУПС, Екатеринбург, Россия
3. Козлов Петр Алексеевич, д-р техн. наук, профессор, научно-производственный холдинг «СТРАТЕГ», Москва, Россия
4. Симармата Джулиатер, доктор менеджмента, Институт транспорта и логистики Трисакти, Джакарта, Индонезия
5. Цяо Цун, канд. техн. наук, Чжэнчжоуский железнодорожный профессиональный технический институт, Чжэнчжоу, Китай

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

1. Александров Александр Эрнстович, д-р техн. наук, доцент, научный редактор, Екатеринбург
2. Бородин Андрей Федорович, д-р техн. наук, профессор, Москва
3. Галиев Ильхам Исламович, д-р техн. наук, профессор, Омск
4. Гриценко Александр Владимирович, д-р техн. наук, доцент, Челябинск
5. Куренков Петр Владимирович, д-р экон. наук, профессор, Москва
6. Лапшин Василий Федорович, д-р техн. наук, профессор, Екатеринбург
7. Ларин Олег Николаевич, д-р техн. наук, профессор, Москва
8. Ледяев Александр Петрович, д-р техн. наук, профессор, Санкт-Петербург
9. Локтев Алексей Алексеевич, д-р физ.-мат. наук, профессор, Москва
10. Неволин Дмитрий Германович, д-р техн. наук, с. н. с., Екатеринбург
11. Румянцев Сергей Алексеевич, д-р техн. наук, с. н. с., Екатеринбург
12. Сай Василий Михайлович, д-р техн. наук, профессор, зам. главного редактора, Екатеринбург
13. Сирина Нина Фридриховна, д-р техн. наук, профессор, Екатеринбург
14. Смольянинов Александр Васильевич, д-р техн. наук, профессор, Екатеринбург
15. Тушин Николай Андреевич, д-р техн. наук, доцент, Екатеринбург
16. Хоменко Андрей Павлович, д-р техн. наук, профессор, Иркутск
17. Якунин Николай Николаевич, д-р техн. наук, профессор, Оренбург

INTERNATIONAL EDITORIAL BOARD

1. Galkin Alexander Gennadyevich, DSc, professor, editor-in-chief, USURT, Ekaterinburg, Russia
2. Buynosov Alexander Petrovich, DSc, professor, USURT, Ekaterinburg, Russia
3. Kozlov Petr Alexeevich, DSc, professor, Research & Production Holding STRATEG, Moscow, Russia
4. Simarmata Juliater, DSc, Trisakti Institute of Transportation and Logistics, Jakarta, Indonesia
5. Qiao Cong, PhD, Zhengzhou Railway Vocational and Technical Institute, Zhengzhou, China

EDITORIAL BOARD

1. Alexandrov Alexander Ernstovich, DSc, associate professor, science editor, Ekaterinburg
2. Borodin Andrey Fedorovich, DSc, professor, Moscow
3. Galiev Ilkham Islamovich, DSc, professor, Omsk
4. Gritsenko Alexander Vladimirovich, DSc, associate professor, Chelyabinsk
5. Kurenkov Petr Vladimirovich, DSc, professor, Moscow
6. Lapshin Vasily Fedorovich, DSc, professor, Ekaterinburg
7. Larin Oleg Nikolaevich, DSc, professor, Moscow
8. Ledyev Alexander Petrovich, DSc, professor, St. Petersburg
9. Loktev Alexey Alexeevich, DSc, professor, Moscow
10. Nevolin Dmitriy Germanovich, DSc, senior staff scientist, Ekaterinburg
11. Rumyantsev Sergey Alexeevich, DSc, senior staff scientist, Ekaterinburg
12. Say Vasily Mikhaylovich, DSc, professor, deputy editor-in-chief, Ekaterinburg
13. Sirina Nina Fridrikhovna, DSc, professor, Ekaterinburg
14. Smolyaninov Alexander Vasilyevich, DSc, professor, Ekaterinburg
15. Tushin Nikolay Andreevich, DSc, associate professor, Ekaterinburg
16. Khomenko Andrey Pavlovich, DSc, professor, Irkutsk
17. Yakunin Nikolay Nikolaevich, DSc, professor, Orenburg

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ТРАНСПОРТА

И. С. Абдуллаев. Подходы технологического интегратора при выборе параметров реализации объектов на предпроектной стадии **3**

ВАГОНЫ И ВАГОННОЕ ХОЗЯЙСТВО

Н. Ф. Сирина, А. Е. Колодин, В. Б. Свердлов.
 Модель реализации барьерных функций по обеспечению сохранности грузовых вагонов при их приеме на инфраструктуру ОАО «РЖД» **8**

Н. Ф. Сирина, А. Е. Колодин. Функциональная архитектура цифровой модели технического обслуживания и ремонта грузовых вагонов **14**

Е. В. Сорокина, С. Л. Самошкин, О. С. Самошкин, С. Д. Коршунов.
 Разработка технических требований и внедрение упругих межвагонных переходов на отечественных пассажирских вагонах с учетом ветровой и тепловой нагрузки **20**

О. Г. Ведерникова, О. В. Игнатьева.
 Разработка интерактивного виртуального тренажера осматривателя вагонов в среде Unity на платформе SteamVR **26**

ГРУЗОВЫЕ И ПАССАЖИРСКИЕ ПЕРЕВОЗКИ

А. Ф. Бородин, В. В. Панин, Е. С. Максимова, Е. А. Лаханкин.
 Методические подходы к организации перевозочного процесса на основе технико-технологических параметров **33**

А. Э. Александров, И. А. Ковалев, В. Ю. Пермикин, А. В. Сурин, В. В. Лесных.
 Верификация оптимизационной модели переработки вагонопотоков на сортировочной станции методом имитационного моделирования **37**

С. В. Бушуев, Н. С. Голочалов. Анализ способов повышения пропускной способности железных дорог **42**

Р. Р. Юсупов, А. С. Хохрин. Исследование процесса функционирования корреляционного приемника с квадратурными каналами автоматической локомотивной сигнализации непрерывного типа в номинальных условиях эксплуатации **51**

Д. Г. Неволин, А. А. Цариков, В. Г. Бондаренко.
 Основные направления развития скоростного пассажирского транспорта в крупных и крупнейших городах России **59**

ПОДВИЖНОЙ СОСТАВ И ТЯГА

С. В. Кротов, Д. П. Кононов, А. П. Буйносов.
 Оптимизация элементарной детали подвижного состава **65**

Е. Ю. Rogov, В. Е. Овсянников, В. И. Васильев, В. Ф. Лапшин.
 Разработка подхода к повышению качества ремонта осей колесных пар **70**

АВТОМАТИКА, ТЕЛЕМЕХАНИКА И СВЯЗЬ

А. Н. Попов. Система для предотвращения столкновений на железнодорожном переезде при вынужденной остановке автотранспорта **75**

Ю. В. Могильников, В. А. Баранов, И. Д. Вершинин.
 Влияние паразитных магнитных полей на прием кода из рельсовой цепи **82**

ПУТЬ И ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

А. А. Локтев, И. В. Шishкина, В. И. Ткаченко, В. В. Артемьева.
 Расчет долей дефектных элементов стрелочной продукции **88**

Е. П. Дудкин, С. Н. Корнилов, М. В. Малахов, Н. Н. Султанов.
 Особенности расчета железнодорожного пути на беспальном основании **93**

ТРАНСПОРТНО-ЛОГИСТИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

А. Т. Попов, О. А. Суслова, Е. А. Воронкова.
 Оптимизация транспортного обслуживания агломерационного производства с учетом динамики потоков **99**

А. Г. Матвеев, Т. А. Менухова. Повышение сохранности доставки тарно-штучного груза: момент риска и способы сокращения риска утраты груза при доставке **105**

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ

А. Н. Штин, К. Г. Шумаков, Д. В. Лесников, Л. А. Фролов.
 Процессы коммутации вентильных токов полупроводникового вольтдобавочного устройства **110**

А. А. Ковалев, А. В. Андрюков. Оценка влияния стрел провеса контактного провода на возможность повышения скорости движения на участке контактной сети Екатеринбург — Челябинск **116**

Е. Ю. Тряпкин, И. В. Игнатенко, С. А. Власенко, Н. К. Шурова.
 Исследование причин возникновения повышенных потенциалов тяговой рельсовой сети переменного тока путем регистрации данных в режиме единого времени **120**

GENERAL TRANSPORT PROBLEMS

I. S. Abdullaev. Approaches of technological integrator at selection of object parameters on concept design stage **3**

RAILWAY CARS AND CARRIAGE EQUIPMENT

N. F. Sirina, A. E. Kolodin, V. B. Sverdlov.
 Model of realization of barrier functions for provision of safety of freight car fleet at car allowance on the JSC «RZD» infrastructure **8**

N. F. Sirina, A. E. Kolodin. Functional architecture of digital model of maintenance and repair of freight cars **14**

E. V. Sorokina, S. L. Samoshkin, O. S. Samoshkin, S. D. Korshunov.
 Development of technical requirements and introduction of elastic gangways on domestic passenger cars with the consideration for wind and thermal loads **20**

O. G. Vedernikova, O. V. Ignatyeva.
 Development of interactive virtual trainer of car inspector in Unity environment on SteamVR platform **26**

CARGO AND PASSENGER TRANSPORTATION

A. F. Borodin, V. V. Panin, E. S. Maximova, E. A. Lakhankin.
 Methodological approaches to organization of transportation process on the basis of technical and technological parameters **33**

A. E. Alexandrov, I. A. Kovalev, V. Yu. Permikin, A. V. Surin, V. V. Lesnykh.
 Verification of optimization model of car traffic processing at marshalling station by simulation modeling **37**

S. V. Bushuev, N. S. Golochalov. Analysis of ways to increase traffic capacity of railways **42**

R. R. Yusupov, A. S. Khokhrin. Study of operation of correlation receiver with quadrature continuously working automatic cab signalling channels in nominal conditions of operation **51**

D. G. Nevolin, A. A. Tsarikov, V. G. Bondarenko.
 Main directions of development of high-speed passenger transport in large and largest Russian cities **59**

ROLLING STOCK AND TRACTION

S. V. Krotov, D. P. Kononov, A. P. Buynosov.
 Optimization of an elementary part of rolling stock **65**

E. Yu. Rogov, V. E. Ovsyannikov, V. I. Vasilyev, V. F. Lapshin.
 Development of approach to increase quality of repair of wheelset axles **70**

AUTOMATION, TELEMCHANICS AND COMMUNICATION

A. N. Popov. System for prevention from collisions at railway crossing at forced stop of motor transport **75**

Yu. V. Mogilnikov, V. A. Baranov, I. D. Vershinin.
 Influence of sneak magnetic fields on reception of code from track circuit **82**

RAILWAY CONSTRUCTION AND RAILWAY TRACK

A. A. Loktev, I. V. Shishkina, V. I. Tkachenko, V. V. Artemyeva.
 Calculation of shares of switch production defective parts **88**

E. P. Dudkin, S. N. Kornilov, M. V. Malakhov, N. N. Sultanov.
 Features of calculation of railway track on sleeperless base **93**

TRANSPORT AND LOGISTICS PROCESSES

A. T. Popov, O. A. Suslova, E. A. Voronkova.
 Optimization of transport service of sinter production with the consideration for traffic dynamics **99**

A. G. Matveev, T. A. Menukhova. Increase of safety of palletized-piece cargo delivery: moment of risk and ways to decrease cargo loss risk at delivery **105**

ELECTRIC SUPPLY

A. N. Shtin, K. G. Shumakov, D. V. Lesnikov, L. A. Frolov.
 Processes of commutation of rectifier currents of a semi-conductor booster **110**

A. A. Kovalev, A. V. Andryukov. Assessment of influence of contact wire sag on possibility of increase of driving speed on the Ekaterinburg — Chelyabinsk catenary section **116**

E. Yu. Tryapkin, I. V. Ignatenko, S. A. Vlasenko, N. K. Shurova.
 Study of causes of increased potentials of alternating current traction rail network by registration of data in united time mode **120**

УДК 656.078:006.76

Ильдар Салимович Абдуллаев, кандидат технических наук, заместитель начальника
Управления комплексной экспертизы проектов ОАО «РЖД», Москва, Россия

ПОДХОДЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ИНТЕГРАТОРА ПРИ ВЫБОРЕ ПАРАМЕТРОВ РЕАЛИЗАЦИИ ОБЪЕКТОВ НА ПРЕДПРОЕКТНОЙ СТАДИИ

Ildar Salimovich Abdullaev, PhD in Engineering, Deputy Head of Division
for Complex Examination of the JSC «RZD» Projects, Moscow, Russia

Approaches of technological integrator at selection of object parameters on concept design stage

Аннотация

Статья посвящена выбору оптимальных параметров реализации объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта на предпроектной стадии. Рассмотрены проблемы, которые возникают при проектировании и применении нормативной документации и приводят к превышению первоначальной стоимости объектов, а также инструменты, которые может использовать технологический интегратор, независимое подразделение ОАО «РЖД», для решения данных проблем. В качестве важного аспекта анализа предпроектной документации представлены возможные подходы к определению этапности развития объектов железнодорожной инфраструктуры, приведены конкретные примеры и комплекс технологических мероприятий.

Ключевые слова: выбор параметров объекта на предпроектной стадии, технологический интегратор, этапность реализации, оптимальное развитие инфраструктуры.

Abstract

The paper is devoted to selection of optimal parameters of railway infrastructure objects on the concept design stage. The author considers problems that arise at designing and applying normative documentation and lead to excess of the initial cost of objects, as well as tools that can be used for solving such problems by a technological integrator — independent division of the JSC «RZD». As an important aspect of the analysis of concept design documentation the paper presents possible approaches to determination of stage-by-stage development of railway infrastructure objects. Moreover, it provides specific examples and a complex of technological measures.

Keywords: selection of object parameters on concept design stage, technological integrator, stage-by-stage realization, optimal development of infrastructure.

DOI: 10.20291/1815-9400-2023-1-3-7

Накопленный в нашей стране опыт проектирования объектов железнодорожного транспорта свидетельствует о необходимости более детальной проработки технологических и технических аспектов на предпроектной стадии. Переход от идеи и обоснования инвестиций сразу к проектированию, минуя стадию разработки основных проектных решений (далее — ОПР), может привести к значительному удорожанию проекта по итогам составления сметной документации. Это, в частности, послужило одной из причин превышения стоимости проекта первого этапа развития Восточного полигона до 2021 г. над первоначально заложенными параметрами.

При разработке детального плана мероприятий по развитию объектов инфраструктуры второго этапа Восточного полигона уже было принято решение о необходимости разработки ОПР на все объекты строительства и реконструкции. С одной стороны, такое решение требует выделения дополнительных финансовых затрат на предпроектные работы, отвлечения ресурсов проектных институтов и заинтересованных подразделений ОАО «РЖД» на разработку и согласование промежуточных результатов, а с другой — все принципиальные вопросы должны быть урегулированы на ранней стадии.

При этом у всех участников инвестиционной деятельности должно сложиться единое, целостное понимание целевого состояния каждого объекта еще до начала его проектирования, что позволит минимизировать финансовые риски компании при строительстве. В спорных случаях, когда участники согласования предпроектной стадии не могут прийти к консолидированному мнению, решение должен принять технологический интегратор — независимое подразделение ОАО «РЖД», обладающее соответствующим правом и необходимыми компетенциями.

Чтобы обеспечить качественное формирование требований к техническим и технологическим параметрам объектов, а также для оценки поступающих от подразделений ОАО «РЖД» предложений о достаточности и отсутствии избыточности мероприятий, руководство компании определило технологическим интегратором Управление комплексной экспертизы проектов и наделило его такими функциями [1]:

1) анализ предложений по техническим и технологическим параметрам объектов, их технико-экономических обоснований, проверка достаточности исходных данных;

2) согласование задания на разработку предпроектной документации;

3) экспертная оценка разработанной предпроектной документации на ее соответствие заданию, оценка разработанных вариантов реализации основных технических и технологических решений.

Для объективной и всесторонней оценки предложений по техническим и технологическим параметрам объектов экспертное мнение технологического интегратора должно быть основано на требованиях федерального законодательства и нормативной базы ОАО «РЖД». Однако принять однозначное решение не всегда возможно, особенно с учетом многообразия нормативной базы по схожим вопросам. Помимо федеральных законов и отраслевых документов различных министерств (таких как своды правил, нормативы, сборники, типовые альбомы, рекомендации и т.д.), внутренних документов ОАО «РЖД» (распоряжения, приказы, регламенты), необходимо принимать во внимание отдельные письма, телеграммы и протоколы, а в особых случаях — разработку специальных технических условий и привлечение научно-технического сопровождения.

В качестве примера можно привести технические решения при разработке ОПР по объекту «Организация движения поездов на участке Москва-Рижская — Ржев — Муравьево». Проектным институтом предлагалось для проектирования конструкции верхнего строения пути и земляного полотна применять требования СП 32–104–98 [2], согласно которым при высоте откоса выемки до 12 м ширина закуветных полок составляет не более 2 м. Вместе с тем по требованиям СП 119.13330.2017 [3] в выемках глубиной более 2 м в глинистых грунтах, мелких и пылеватых песках и легковыветривающихся скальных грунтах должны быть устроены закуветные полки шириной 3 м. Оба упомянутые документа действующие и могут быть применены на данном объекте, но в то же время по-разному влияют на его итоговую стоимость.

Классический вариант решения этой проблемы — сравнительный анализ требований всех нормативно-правовых актов и сопутствующих документов по конкретной тематике, верификация актуальности вопроса и внесение соответствующих изменений в основополагающие документы с отменой вспомогательных. С учетом того что, как правило, документы нижестоящего уровня только ужесточают требования нормативно-правовых актов вышестоящего уровня, потребует внесения изменений и в федеральную базу данных. Здесь существует риск возникновения процедурных вопросов, связанных со сроками рассмотрения отраслевых предложений, после решения которых сами предложения могут оказаться уже неактуальными.

В данной ситуации для принятия оптимального и своевременного решения по выбору технических и технологических параметров объекта в конкретных условиях предлагается провести анализ требований актуальной нормативной базы по рассматриваемой тематике, после чего свести ее в единый формат. Причем для простоты восприятия информации и объективности выбора этот формат может обеспечивать визуализацию возможного использования всех рассматриваемых конфигу-

раций с описанием их основных технических, технологических и стоимостных характеристик [4], преимуществ и недостатков, а также выводов и рекомендаций по применению.

На рис. 1 и 2 приведены примеры такой работы. Аналогичный сравнительный анализ технико-технологических характеристик различных параметров объектов выполнен для систем управления станциями, категорий железнодорожных линий, устройств контактной сети, пассажирских платформ, путевого развития отдельных пунктов, объектов транспортной безопасности [2–7].

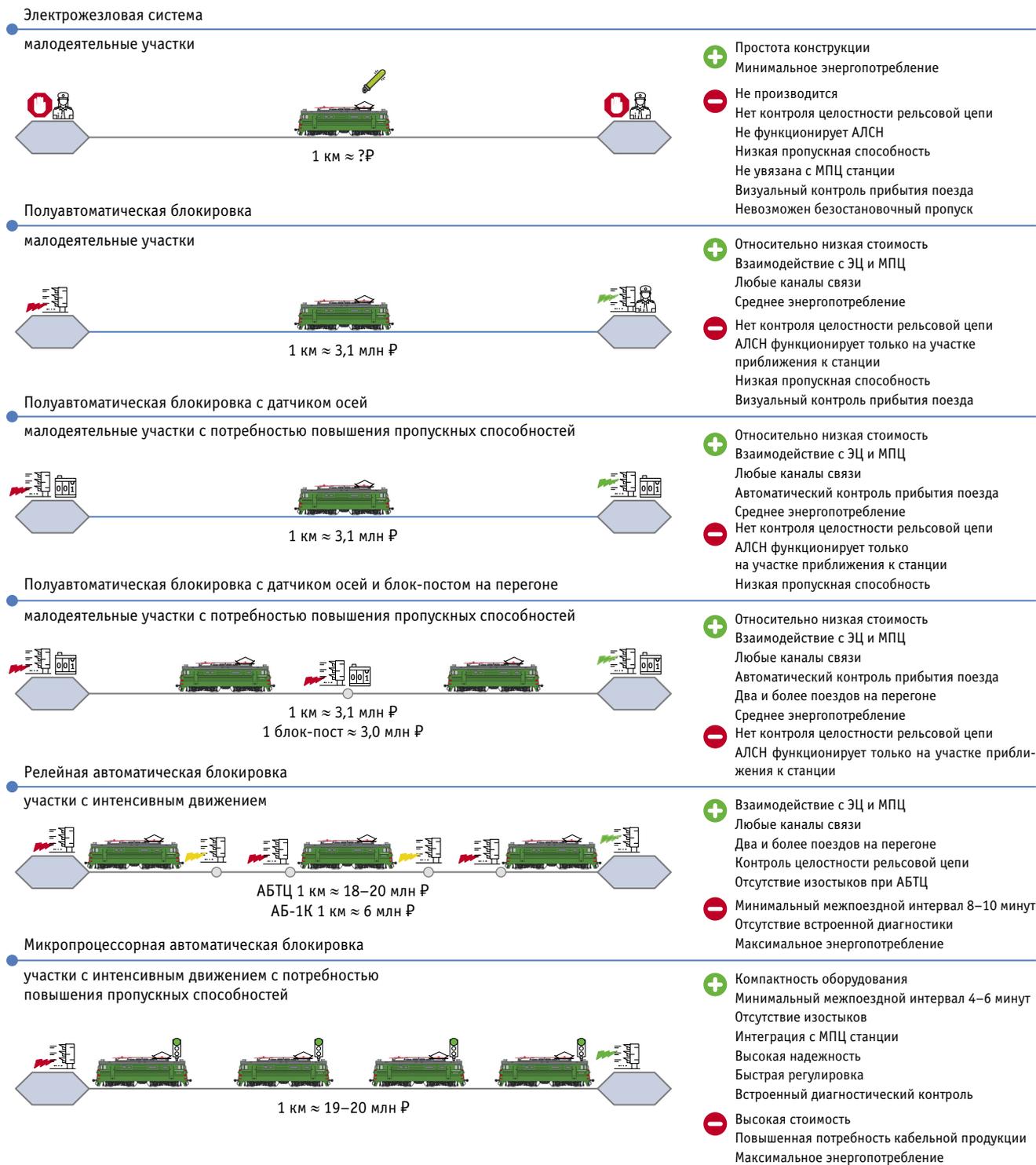
Такой анализ не отменяет необходимости приведения нормативной базы в единое соответствие, но значительно облегчает навигацию по существующим правовым источникам при выборе оптимальных технических, технологических и стоимостных параметров типовых объектов, позволяет проводить экспресс-оценку целесообразности применения тех или иных конфигураций в конкретных условиях, существенно сокращая сроки рассмотрения предложений, поступающих от подразделений ОАО «РЖД».

При согласовании задания на разработку предпроектной документации и рассмотрении самой предпроектной документации отдельного внимания заслуживает вопрос, связанный с этапностью реализации мероприятий по реконструкции или строительству объекта. Наиболее рациональный подход — от простого к сложному [8]. Это означает, что на первом этапе предлагается проработка технологических мероприятий (не требующих значительных финансовых вложений), на втором — технических (с использованием инвестиционных средств, но без принципиального изменения схемы объекта), а на третьем — реконструктивных. Однако если говорить о целом направлении или полигоне сети железных дорог, то такой подход в отношении технологических мероприятий не всегда применим в «чистом» виде, поскольку их реализация может повлечь за собой необходимость приведения инфраструктуры к другим требованиям.

Например, если проанализировать все технологические мероприятия по повышению пропускной и провозной способности, примененные с 2013 г. (с начала реализации комплексного инвестиционного проекта по развитию инфраструктуры) на Восточном полигоне, то условно их можно разделить на три группы:

- 1) технологические мероприятия в «чистом» виде (не требующие значительных финансовых вложений);
- 2) технологические мероприятия, связанные с внедрением новых технических средств или техническим переоснащением объекта, но без изменения его принципиальной схемы;
- 3) технологические мероприятия, реализация которых должна осуществляться в совокупности с реконструкцией станционной и перегонной инфраструктурой полигона.

Технологические мероприятия в «чистом» виде — наименее дорогостоящий, но не всегда самый простой способ решения задачи, так как он нередко связан с необходимостью пересмотра нормативной документации, сложностями организационного характера, трудностями при принятии управленческих решений на центральном уровне, согласовании изменений с другими структурами, субъектами России, а иногда и с определенными государствами. Тем не менее именно с этих мероприятий рекомендуется реализовывать комплекс по развитию



Выводы, рекомендации:

- Выбор системы интервального регулирования должен осуществляться на основании экономической целесообразности её внедрения в соответствии с прогнозными размерами движения поездов на рассматриваемом участке.
- Цифровые технологии внедряются на интенсивных и грузонапряженных участках, где необходимо уменьшить интервал движения, на малоинтенсивных участках внедряются релейно-процессорные и релейные системы.

Рис. 1. Сравнительный анализ параметров систем интервального регулирования [3]

Марка 1/22 проект H03.002.0000.00			
	Главные пути со смешанным грузопассажирским движением Взаимозаменяем с переводом 2832.00.000		Длина — 79874 мм Радиус бокового пути — 2800–1600 м Максимальная нагрузка — 250 кН <i>Примечание: крестовина с непрерывной поверхностью катания для высокоскоростного движения</i>
			По прямому пути — 250 км/ч На боковой путь — 120 км/ч
Марка 1/18 проект H03.001.0000.00			
	Главные пути со смешанным грузопассажирским движением Взаимозаменяем с переводом 2832.00.000		Длина — 63880 мм Радиус бокового пути — 962,5 м Максимальная нагрузка — 250 кН <i>Примечание: крестовина с непрерывной поверхностью катания для высокоскоростного движения</i>
			По прямому пути — 250 км/ч На боковой путь — 80 км/ч
Марка 1/18 проект 2870.00.000			
	Главные пути со смешанным грузопассажирским движением		Длина — 61660 мм Радиус бокового пути — 962,5 м Максимальная нагрузка — 245 кН <i>Примечание: крестовина с непрерывной поверхностью катания</i>
			По прямому пути — 200 км/ч На боковой путь — 80 км/ч
Марка 1/11 проект 2726.00.000			
	Главные пути со смешанным грузопассажирским движением		Длина — 39063 мм Радиус бокового пути — 300 м Максимальная нагрузка — 245 кН <i>Примечание: крестовина с непрерывной поверхностью катания</i>
			По прямому пути — 200 км/ч На боковой путь — 50 км/ч
Марка 1/11 проект H01.001.0000.00			
	Главные пути со смешанным грузопассажирским движением Взаимозаменяем с переводом 2750.00.000		Длина — 34858 мм Радиус бокового пути — 300 м Максимальная нагрузка — 270 кН <i>Примечание: сборная или моноблочная крестовина</i>
			По прямому пути — 160 км/ч На боковой путь — 50 км/ч
Марка 1/11 проект 2750.00.000			
	Главные пути со смешанным грузопассажирским движением		Длина — 34858 мм Радиус бокового пути — 300 м Максимальная нагрузка — 245 кН <i>Примечание: наиболее часто применяемый стрелочный перевод (сборная крестовина, гибкие острия с приварными рельсовыми окончаниями)</i>
			По прямому пути — 140 км/ч На боковой путь — 50 км/ч
Марка 1/11 проекты H01.001.0000.00 – 04 и H01.001.0000.00 – 06			
	Главные пути со смешанным грузопассажирским движением Взаимозаменяем с переводом 2750.00.000		Длина — 34858 мм Радиус бокового пути — 300 м Максимальная нагрузка — 270 кН <i>Примечание: сборная крестовина</i>
			По прямому пути — 140 км/ч На боковой путь — 50 км/ч
Марка 1/11 проект H01.004.0000.00			
	Главные пути со смешанным грузопассажирским движением Взаимозаменяем с переводом 2750.00.000		Длина — 34858 мм Радиус бокового пути — 300 м Максимальная нагрузка — 270 кН <i>Примечание: моноблочная крестовина</i>
			По прямому пути — 160 км/ч На боковой путь — 50 км/ч
Марка 1/11 проект 2956.00.000			
	Главные пути со смешанным грузопассажирским движением		Длина — 40543 мм Радиус бокового пути — 300 м Максимальная нагрузка — 250 кН <i>Примечание: крестовина с непрерывной поверхностью катания для высокоскоростного движения</i>
			По прямому пути — 250 км/ч На боковой путь — 50 км/ч
Марка 1/9 проект 2796.00.000			
	Главные пути со смешанным грузопассажирским движением		Длина — 32625 мм Радиус бокового пути — 300 м Максимальная нагрузка — 245 кН <i>Примечание: сборная крестовина</i>
			По прямому пути — 100 км/ч На боковой путь — 40 км/ч
Марка 1/9 проект 2796.00.000			
	Пути ОАО «РЖД»		Длина — 312035 мм Радиус бокового пути — 300 м Максимальная нагрузка — 245 кН <i>Примечание: с поворотными остриями</i>
			По прямому пути — 100 км/ч На боковой путь — 40 км/ч

Выводы, рекомендации:

1. Выбор марки стрелочного перевода зависит от потребной скорости движения поезда при съезде на боковой путь и от достаточности землеотвода.
2. При выборе марки стрелочного перевода должна производиться оценка соответствия размеров инвестиций на его укладку с экономическим эффектом от его последующей эксплуатации

Рис. 2. Сравнительный анализ параметров стрелочных переводов

всего направления, полигона или сети железных дорог, так как они могут дать значительный технологический эффект, который позволит исключить или минимизировать применение дорогостоящих технических и реконструктивных мероприятий.

В качестве примера можно привести такие типовые мероприятия, как корректировка графика движения поездов, удлинение плеч обслуживания локомотивных бригад, сокращение времени выполнения технологических операций на станциях или их параллельное выполнение, концентрация видов работ в одно «окно», предоставление «окон» в едином «створе» и т.д.

К мероприятиям второй группы можно отнести сокращение межпоездных интервалов путем технического переоснащения системы интервального регулирования, экипировку локомотивов на станционных путях без отцепки в депо, изменение технологии подталкивания поездов с применением более мощных локомотивов и другие мероприятия, не затрагивающие принципиальной схемы развития объектов инфраструктуры направления. Этапность внедрения таких мероприятий должна быть продиктована критерием использования существующей инфраструктуры и финансовых возможностей компании.

В качестве примера мероприятий третьей группы можно привести такие классические, как увеличение веса и длины поез-

да, организация вождения соединенных контейнерных поездов и длиннооставных порожних маршрутов, которые влекут за собой необходимость удлинения станционных путей с переустройством горловин. Соответственно технологический и экономический эффекты от применения таких мероприятий следует рассматривать с учетом всех затрат на развитие инфраструктуры. При этом если технологические мероприятия будут внедряться сразу на всем направлении, то этапность реализации технических мероприятий следует рассматривать индивидуально — исходя из существующих возможностей инфраструктуры, требуемого прироста грузопотока и финансовых ограничений [9].

Дальнейшим перспективным направлением, связанным с определением оптимальных параметров объекта на предпроектной стадии, включая этапность реализации, может стать автоматизация процесса выбора технических и технологических характеристик объекта с использованием их набора, нормативной базы и местных условий [10, 11]. При постоянном мониторинге нормативно-правовой документации и соответствующих своевременных корректировках в сводную базу возможных конфигураций параметров объекта предлагаемый подход может стать эффективным инструментом для поиска оптимальных решений по развитию инфраструктуры.

Литература

1. Об утверждении Порядка подготовки предпроектной документации на комплексные инвестиционные проекты ОАО «РЖД»: распоряжение ОАО «РЖД» от 04.03.2021 г. № 444/р.
2. СП 32-104-98. Проектирование земляного полотна железных дорог колеи 1520 мм. Москва : Госстрой России, 1999. 95 с.
3. СП 119.13330.2017. Железные дороги колеи 1520 мм. Москва : Стандартинформ, 2018. 40 с.
4. ОНЦКРЖ 81-02-07-2017. Отраслевые укрупненные сметные нормативы. Железные дороги. Отраслевые укрупненные нормативы цены конструктивных решений. Москва, 2017. 47 с.
5. Перечень разрешенных систем для проектирования: утв. начальником Управления автоматики и телемеханики Э. Г. Ореховым 23.07.2021 г. № ЦДИ-198.
6. Об утверждении Правил технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации: приказ Минтранса России от 21.12.2010 г. № 286.
7. СП 235.1326000.2015. Железнодорожная автоматика и телемеханика. Правила проектирования. Москва, 2015. 184 с.
8. Абдуллаев И. С. Обоснование мероприятий по увеличению пропускной способности пассажирских станций : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва, 2016. 22 с.
9. Батури А. П. Теория выбора оптимального развития технического оснащения сети железных дорог : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Москва, 2000. 335 с.
10. Абдуллаев И. С., Саргсян В. Г. Алгоритм расчета оптимального развития инфраструктуры участка // Наука и техника транспорта. 2022. № 4. С. 55–60. ISSN 2074–9325.
11. Абдуллаев И. С., Саргсян В. Г. Оценка эффективности развития инфраструктуры на долгосрочную перспективу // Экономика железных дорог. 2022. № 9. С. 63–69. ISSN 1727–6500.

References

1. On approval of the Order on preparation of concept design documentation on complex investment projects of the JSC «RZD» [Ob utverzhenii Poryadka podgotovki predproektnoy dokumentatsii na kompleksnye investitsionnye projekty OAO «RZHD»]: the Order of JSC «RZD» dated 04.03.2021 No. 444/r.
2. Code of Rules 32-104-98. Design of earthwork for rail ways with 1520 mm track [SP 32-104-98. Proektirovanie zemlyanogo polotna zheleznykh dorog kolei 1520 mm]. Moscow : Gosstroy of Russia, 1999. 95 p.
3. Code of Rules 119.13330.2017. Railway with 1520 mm track [SP 119.13330.2017. Zheleznye dorogi kolei 1520 mm]. Moscow : Standardinform, 2018. 40 p.
4. Branch cost standards 81-02-07-2017. Branch enlarged contemplated standards. Railways. Branch enlarged standards of cost of design solutions : [ONTsKRZh 81-02-07-2017. Otrasleye ukрупnennye smetnye normativy. Zheleznye dorogi. Otrasleye ukрупnennye normativy tseny konstruktivnykh resheniy]. Moscow, 2017. 47 p.
5. Set of allowed systems for design [Perechen' razreshennykh sistem dlya proektirovaniya]: approved by the Head of the Automatics and Telemechanics Division E. G. Orekhov 23.07.2021 No. TsDI-198.
6. On approval the Russian Federation railway operating rules [Ob utverzhenii tekhnicheskoy ekspluatatsii zheleznykh dorog Rossiyskoy Federatsii]: the Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation dated 21.12.2010 No. 286.
7. Code of Rules 235.1326000.2015. Railway automatics and telemechanics. Rules for design [SP 235.1326000.2015. Zheleznodorozhnaya avtomatika i telemekhanika. Pravila proektirovaniya]. Moscow, 2015. 184 p.
8. Abdullaev I. S. Substantiation of measures on increase of traffic capacity of passenger stations [Obosnovanie meropriyatii po uvelicheniyu propusknoy sposobnosti passazhirskikh stantsiy] : Synopsis of PhD in Engineering Thesis. Moscow, 2016. 22 p.
9. Baturin A. P. Theory for selection of optimal development of technical equipment of railway network [Teoriya vybora optimal'nogo razvitiya tekhnicheskogo osnashheniya seti zheleznykh dorog] : DSc in Engineering Thesis. Moscow, 2000. 335 p.
10. Abdullaev I. S., Sargsyan V. G. Algorithm for calculating optimal development of section infrastructure [Algoritm rascheta optimal'nogo razvitiya infrastruktury uchastka] // Science and technology in transport. 2022. No. 4. Pp. 55–60. ISSN 2074–9325.
11. Abdullaev I. S., Sargsyan V. G. Assessment of the effectiveness of infrastructure development in the long term [Otsenka effektivnosti razvitiya infrastruktury na dolgosrochnuyu perspektivu] // Railway Economy. 2022. No. 9. Pp. 63–69. ISSN 1727–6500.

УДК 656.212.6

Нина Фридриховна Сирина, доктор технических наук, профессор кафедры «Вагоны» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,
Александр Евгеньевич Колодин, главный инженер службы вагонного хозяйства Свердловской дирекции инфраструктуры ОАО «РЖД», Екатеринбург, Россия,
Вадим Борисович Свердлов, кандидат технических наук, инспектор по сохранности вагонного парка службы вагонного хозяйства Свердловской дирекции инфраструктуры ОАО «РЖД», Екатеринбург, Россия

МОДЕЛЬ РЕАЛИЗАЦИИ БАРЬЕРНЫХ ФУНКЦИЙ ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ СОХРАННОСТИ ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ ПРИ ИХ ПРИЕМЕ НА ИНФРАСТРУКТУРУ ОАО «РЖД»

Nina Fridrikhovna Sirina, DSc in Engineering, Professor, Railway Cars Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,
Alexander Evgenyevich Kolodin, Chief Engineer, Car Service Division, Sverdlovsk Infrastructure Directorate of the JSC «RZD», Ekaterinburg, Russia,
Vadim Borisovich Sverdlov, PhD in Engineering, Inspector for safety of car fleet, Car Service Division, Sverdlovsk Infrastructure Directorate of the JSC «RZD», Ekaterinburg, Russia

Model of realization of barrier functions for provision of safety of freight car fleet at car allowance on the JSC «RZD» infrastructure

Аннотация

Проанализированы основные причины повреждения вагонов на путях необщего пользования. Показано, что снизить повреждения вагонов от разрушения литых деталей тележек позволяет внедрение барьерных функций, блокирующих выход на инфраструктуру ОАО «РЖД» вагонов с непригодными для эксплуатации деталями. Дано определение барьерной функции как блокирующей реакции информационной системы на несоответствие параметров подвижного состава установленным требованиям. Предложено при допуске вагонов на инфраструктуру ОАО «РЖД» после выполнения грузовых операций ввести барьерную функцию «формирование логического запрета на прием вагона с путей необщего пользования при выявлении поврежденного вагона». Создана имитационная модель организации приема вагона на инфраструктуру, позволяющая автоматизировать процедуру допуска и существенно снизить риски пропуска поврежденных вагонов. Для разработки математической модели предложено использовать метод статистического моделирования (метод Монте-Карло).

Ключевые слова: повреждение вагона, сохранность вагонного парка, барьерная функция, допуск вагона, математическая модель, метод Монте-Карло.

Abstract

The paper presents analysis of main reasons of car damage on non-public railway tracks. It shows that the introduction of barrier functions that block the release of cars with unusable parts on the JSC «RZD» infrastructure allows decreasing car damage from failure of cast parts of bogies. The authors give a definition to a barrier function as a blocking reaction of an information system on discrepancy of rolling stock parameters to established requirements. At car allowance on the JSC «RZD» infrastructure after loading-unloading operations they suggest to introduce the barrier function «creating of logical prohibition on car reception from non-public tracks when a damaged car is revealed». The authors have created a simulation model of car allowance on the infrastructure that allow automating allowance procedure and significantly decreasing risks of release of damaged cars. For the development of the mathematical model they propose to use the method of statistical modeling (the Monte-Carlo technique).

Keywords: car damage, safety of car fleet, barrier function, car allowance, mathematical model, the Monte-Carlo technique.

DOI: 10.20291/1815-9400-2023-1-8-13

Сохранность вагонного парка остается одной из важнейших задач ОАО «РЖД» при организации перевозочного процесса. Благодаря выстроенной системе контроля за сохранностью вагонов удовлетворяется потребность государства в перевозках, предотвращаются потери грузов, обеспечивается безопасность движения поездов, сокращаются затраты на ремонт вагонов. В результате мер, планомерно принимаемых министерством транспорта и ОАО «РЖД», наметилась устойчивая тенденция к снижению потерь от повреждения вагонов. Ключевые факторы сокращения потерь — появление нового надежного инновационного подвижного состава, а также внимание ОАО «РЖД» к обеспечению сохранности вагонного парка.

На сегодняшний день проблемами вагонного парка остаются разоборудование вагонов, хищение узлов и деталей [1]; несовершенство нормативной и правовой базы, определяющей взаимоотношения между всеми участниками рынка железнодорожных перевозок; допуск вагонов на инфраструктуру ОАО «РЖД» после проведения операций погрузки-выгрузки на путях необщего пользования.

По данным Проектно-конструкторского бюро вагонного хозяйства — филиала ОАО «РЖД» [2], за 9 месяцев 2022 г. на сети железных дорог повреждено 49709 вагонов, что ниже, чем за аналогичный период 2021 г., на 7,8 % (в 2021 г. повреждено 53916 вагонов). Наибольшее количество поврежденных вагонов выявлено при грузовой работе на путях необщего пользования (табл. 1).

Таблица 1

Распределение поврежденных вагонов на путях необщего пользования за 9 месяцев 2022 г.

Вид поврежденных вагонов				
Крытые	Платформы	Полувагоны	Цистерны	Хопперы
Повреждено при грузовой работе				
473/20	3388/103	42064/394	130/4	718/20
Повреждено при маневровой работе				
37/5	125/11	594/56	108/14	99/19

* В числителе — всего по России, в знаменателе — по Свердловской железной дороге.

Основной причиной повреждений остается нарушение технологии погрузки-выгрузки вагонов на путях необщего пользования. Также высоки риски повреждений при роспуске на сортировочных горках (образование односторонних ползунов, повреждения, вызванные нарушением скорости соударения вагонов, скрытые повреждения тормозного оборудования при разогреве грузов в размораживающих устройствах).

Анализ за 9 месяцев 2022 г. показал, что количество поврежденных полувагонов составило 42658 (85,8 % от общего числа поврежденных вагонов). Максимальное количество повреждений приходится на зимние месяцы, когда насыпные грузы (уголь, руда и др.) поступают под выгрузку в смерзшемся состоянии. Основные причины повреждений [3–5] — применение для погрузки и выгрузки неисправных машин и механизмов, грейферный метод разгрузки, нарушение технических условий размещения и крепления грузов и правил производства операций. Эти причины непосредственно влияют на повреждение вагонов при выполнении грузовых операций. В то же время неудовлетворительное состояние путей необщего пользования приводит к сходу подвижного состава и имеет более тяжелые последствия и в техническом, и в материальном плане [6–8]. Все требования к обеспечению сохранности вагонного парка отражены в ГОСТ 22235–2010 [9].

Наиболее серьезные повреждения вагонов — изломы литых деталей тележек и разрушения осей колесных пар. По данным управления вагонного хозяйства, за 9 месяцев 2022 г. на сети железных дорог России произошло два случая излома боковой рамы, один случай излома диска колеса и два случая сдвига ступицы колеса, приведшие к сходу. Существенной мерой, повлиявшей на снижение рисков повреждения вагонов в результате изломов литых деталей тележек, стало решение ОАО «РЖД» запретить использование таких деталей из-под вагонов, имевших сход с рельсов.

В целях блокировки выхода на инфраструктуру ОАО «РЖД» вагонов с непригодными к эксплуатации литыми деталями тележек (наддрессорными балками, боковыми рамами) и колесными парами разработана система, создающая логический запрет (барьер) на выпуск вагона с подобными деталями из ремонта [10–12].

Барьерная функция — это блокирующая реакция информационной системы на несоответствие параметров подвижного состава или его деталей установленным требованиям, прерывающая нормальную последовательность передачи информационных сообщений при эксплуатации вагона. При реализации барьерной функции цифровая модель вагона в информационных системах приобретает критичный признак, исключающий ряд операций с вагоном путем блокирования передачи информационных сообщений (оформление погрузки, оформление перевозочных документов, оформление подачи-уборки).

Барьерная функция внедрялась в информационных системах ОАО «РЖД» с 2016 г. и зарекомендовала себя как эффективный механизм предотвращения угроз и снижения рисков выхода потенциально опасного подвижного состава на пути ОАО «РЖД» [13]. При срабатывании логического контроля информационное сообщение от вагоноремонтного предприятия, обязательное к передаче в Главный вычислительный центр — филиал ОАО «РЖД» при выполнении планового или текущего ремонта вагона, не принимается.

Блокировка выхода вагонов на инфраструктуру после планового и текущего ремонтов осуществляется по отношению к деталям с просроченным сроком службы, имеющим клейма предприятий с отсутствующим разрешением Росжелдора, забракованным деталям, деталям-двойникам, нелегитимным деталям и деталям, забракованным на этапе изготовления.

В 2021 г. в вагонном хозяйстве зафиксировано срабатывание барьерных функций в 19962 случаях. Применение барьерных функций обеспечило отрицательную динамику комплектации грузовых вагонов деталями, непригодными к эксплуатации. Так, за 2021 г. зарегистрировано 14217 отклоненных сообщений о комплектации вагонов по причине срабатывания барьерных функций, что на 7993, или на 36 %, меньше, чем в 2020 г., и составляет 1 % от общего количества переданных сообщений (1425385) за рассматриваемый период (рис. 1).

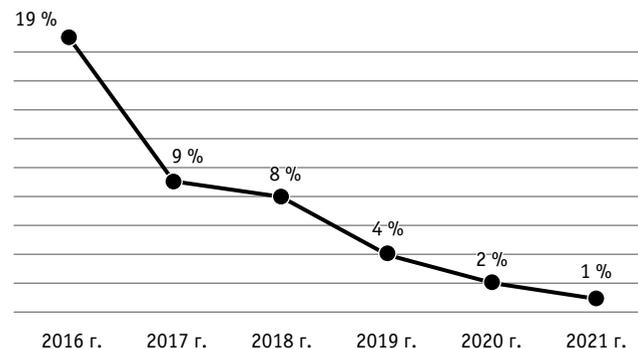


Рис. 1. Динамика снижения отклоненных сообщений о комплектации грузовых вагонов по причине срабатывания барьерных функций

С целью предупреждения выхода на инфраструктуру ОАО «РЖД» поврежденных, угрожающих безопасности движения, технически неисправных вагонов предлагается разработать систему барьерных функций при приеме вагонов с путей необщего пользования после грузовых операций.

В настоящее время прием/передача грузовых вагонов на пути / с путей необщего пользования определены Положением о порядке контроля сохранности грузовых вагонов при приеме к перевозке на инфраструктуру ОАО «РЖД» и обеспечения их сохранности в процессе перевозок, утвержденным распоряжением ОАО «РЖД» от 29 мая 2020 г. № 1153/р [14]. Наряду с порядком приема вагонов с путей необщего пользования, распоряжение № 1153/р устанавливает порядок обеспечения сохранности при перевозке вагонов на путях общего пользования, а также порядок оформления поврежденных вагонов в ремонт. В табл. 2 приведены данные о повреждениях вагонов в границах Свердловской железной дороги.

Как следует из табл. 2, основные виды повреждений вагонов при проведении грузовых операций на промышленных предприятиях, осуществляющих свою деятельность в границах Свердловской железной дороги, — это повреждение крышки люков, петель, обшивки кузова, лестниц (поручней, подножек), стоек и запоров люков; неисправность погрузочно-разгрузочных механизмов специализированных вагонов. Отдельно нужно выделить сходы вагонов на путях клиентов. Согласно действующим документам ОАО «РЖД», эксплуатация вагонов с ходовыми частями, имевшими сход, не допускается. Таким образом, при допуске вагонов в эксплуатацию на пути общего пользования возникает задача по выявлению вагонов, угрожа-

ющих безопасности движения и имевших повреждения на путях необщего пользования.

Типовой технологический процесс пункта технической передачи грузовых вагонов ТК-469 [15] подробно описывает процедуру приема вагона с путей необщего пользования, определяет порядок оформления и учета случаев повреждений. Дальнейшее совершенствование технологии приема вагона после грузовых операций направлено на автоматизацию контроля за сохранностью вагонов при их приеме к перевозке и на выявление поврежденных вагонов, техническое состояние которых изменено в результате их нахождения не под ответственностью ОАО «РЖД». Процессный элемент должен представлять собой совокупность автономных, сопрягаемых функционально, аппаратно и программно подсистем и устройств, которые будут соответствовать требованиям нормативно-технических документов ОАО «РЖД» и обеспечивать выполнение задачи по допуску на инфраструктуру исправного подвижного состава.

ГОСТ 22235–2010 [9] определяет требования к устройствам, взаимодействующим с вагонами, и обязывает перед вводом устройств в эксплуатацию проводить их испытания на правильность наладки, регулировки режимов работы и обеспечение сохранности вагонов. Комплекс мероприятий по обеспечению сохранности вагонного парка при внедрении новых технических средств и технологий и по проверке готовности вагонов к работе при допуске на инфраструктуру ОАО «РЖД» после грузовых операций на путях необщего пользования, направленных на снижение рисков повреждения вагонов, можно представить в виде процесса обеспечения доказательства безопасности.

Таблица 2

Динамика отцепки вагонов по повреждениям в границах Свердловской железной дороги за 2016–2021 гг.

№ п/п	Код КЖА	Вид повреждений	2016 г.	2017 г.	2018 г.	2019 г.	2020 г.	2021 г.	В среднем за 2016–2021 гг.
1	101	Сход с рельсов	92	160	118	97	144	152	128
2	153	Излом/изгиб крышки буксы	19	14	14	11	16	18	15
3	363	Излом рычага расцепного привода	5	10	12	8	7	19	10
4	380	Трещина центрирующей балки	6	5	9	6	16	7	8
5	381	Обрыв/трещина маятниковой подвески	6	7	8	10	10	5	8
6	405	Неисправность концевого крана	17	13	4	9	5	5	9
7	443	Излом рычагов и тормозных тяг	11	11	13	10	9	10	11
8	505	Повреждение стоек	6	16	16	38	32	15	21
9	506	Повреждение обвязочных брусьев	7	12	13	14	11	5	10
10	531	Повреждение обшивки кузова	317	262	218	178	200	165	223
11	532	Повреждение пола	40	20	36	49	15	29	32
12	539	Повреждение крышки люка и петель	137	129	105	149	135	175	139
13	540	Неисправность запора люка	16	25	39	4	8	10	17
14	549	Неисправность погрузочно-разгрузочных механизмов специализированных вагонов	3	2	30	125	113	80	59
15	553	Повреждение (обрыв) лестниц/поручней/подножек	216	162	140	160	149	161	165
16	568	Повреждение запора люка	5	11	6	9	7	6	7

Такой подход позволит:

значительно повысить уровень доказательства безопасности технических средств и технологий в виде отдельных подзадач с четко обозначенными требованиями, включенными в программу обеспечения безопасности;

оценить уровень безопасности по результатам различных методов доказательства;

принять решение о том, соответствуют или не соответствуют используемые либо разрабатываемые системы, технические средства, технологии требованиям нормативных документов;

разработать меры по достижению поставленных целей, если объект испытаний не соответствует требованиям, заявленным в программе обеспечения безопасности.

Разработка современных систем контроля и диагностики невозможна без качественной математической модели, описывающей законы, по которым функционирует конкретный физический объект [16]. Сложные системы замещаются моделированием, т.е. условным образом, именуемым моделью и обеспечивающим близкое к исследуемому объекту поведение с учетом допущений и погрешностей. Иными словами, свойства модели схожи со свойствами непосредственно самого объекта. При этом требования к модели определяются решаемой задачей и имеющимися средствами.

Результатом имитационного моделирования работы стохастической системы является реализация случайных величин или процессов. Поэтому для нахождения характеристик системы требуются многократное повторение и последующая обработка данных. Чаще всего в этом случае применяется разновидность имитационного моделирования — статистическое моделирование, или метод Монте-Карло, т.е. воспроизведение в моделях случайных факторов, событий, величин, процессов, полей [17]. По результатам статистического моделирования определяют оценки вероятностных критериев качества, общих и частных, характеризующих функционирование и эффективность управляемой системы. Метод Монте-Карло (или метод статистических испытаний) можно определить как метод моделирования случайной величины для вычисления характеристик их распределений. Суть состоит в том, что результат испытаний зависит от некоторой случайной величины, распределенной по заданному закону. Поэтому результат каждого отдельного испытания носит случайный характер. Полученные при многократных испытаниях статистические данные обрабатываются и представляются в виде численных оценок величин (характеристик системы). Испытание повторяется N раз, причем каждый опыт не зависит от остальных, и результаты всех опытов усредняются. Это значит, что число испытаний должно быть достаточно велико, поэтому метод существенно опирается на возможности компьютера. Теоретической основой метода Монте-Карло являются предельные теоремы теории вероятностей. Они гарантируют высокое качество статистических оценок при весьма большом числе испытаний. Метод статистических испытаний применим для исследования как стохастических, так и детерминированных систем. В задачах статистического моделирования обработка реализаций случайных процессов необходима не только для анализа выходных процессов. Весьма важен также и контроль характеристик входных случайных воздействий, который

заключается в проверке соответствия распределений генерируемых процессов заданным распределениям. Эта задача часто формулируется как задача проверки гипотез.

Выявление поврежденных вагонов максимально близко описывается моделью стохастического процесса. В простейшем виде задачу принятия решения по контролю вагонов при их приеме после грузовых операций можно представить в виде схемы, показанной на рис. 2. На практике подобные задачи реализованы в так называемых кольцевых маршрутах. Это, как правило, поезда для перевозки массовых однотипных грузов (например, угля, руды) между постоянными отправителями и получателями. Кольцевые маршруты обращаются между станциями погрузки и выгрузки по строго установленным расписаниям, причем со станций погрузки они отправляются с одним и тем же грузом, а обратно возвращаются в порожнем состоянии или с другим массовым грузом.

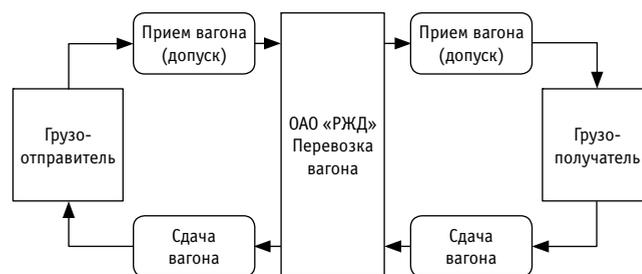


Рис. 2. Модель организации контроля сохранности вагонов кольцевого маршрута

Как правило, поезда формируются из вагонов после выполнения грузовых операций на различных предприятиях. При этом владельцы путей необщего пользования могут не иметь самостоятельных грузовых терминалов, а осуществлять операции только по приему-отправлению после погрузки/выгрузки вагонов.

Технология работы станции, на которой подача и уборка вагонов осуществляется на пути промышленных предприятий, владеющих собственными подъездными путями, территориально расположенными вблизи этой станции, представлена на рис. 3. В этом случае контроль за техническим состоянием вагонов выполняется либо на путях необщего пользования, либо на выставочных путях данной конкретной станции.

На основании распоряжения № 1153/р работники вагонного хозяйства при допуске вагона на инфраструктуру после проведения грузовых операций обязаны не только выявить повреждение, но и провести комплекс мероприятий по предотвращению выхода поврежденного вагона на пути общего пользования. При этом факт повреждения фиксируется в соответствующем акте формы ВУ-25 и в акте общей формы ГУ-23. До подписания этих документов поврежденный вагон должен оставаться под ответственностью владельца подъездного пути.

Факт выявления поврежденного вагона фиксируется в книге натурального осмотра формы ВУ-15, которая является документом, отражающим техническое состояние вагонов при передаче их на подъездные пути предприятий и организаций, а также при возвращении обратно на пути железных дорог.

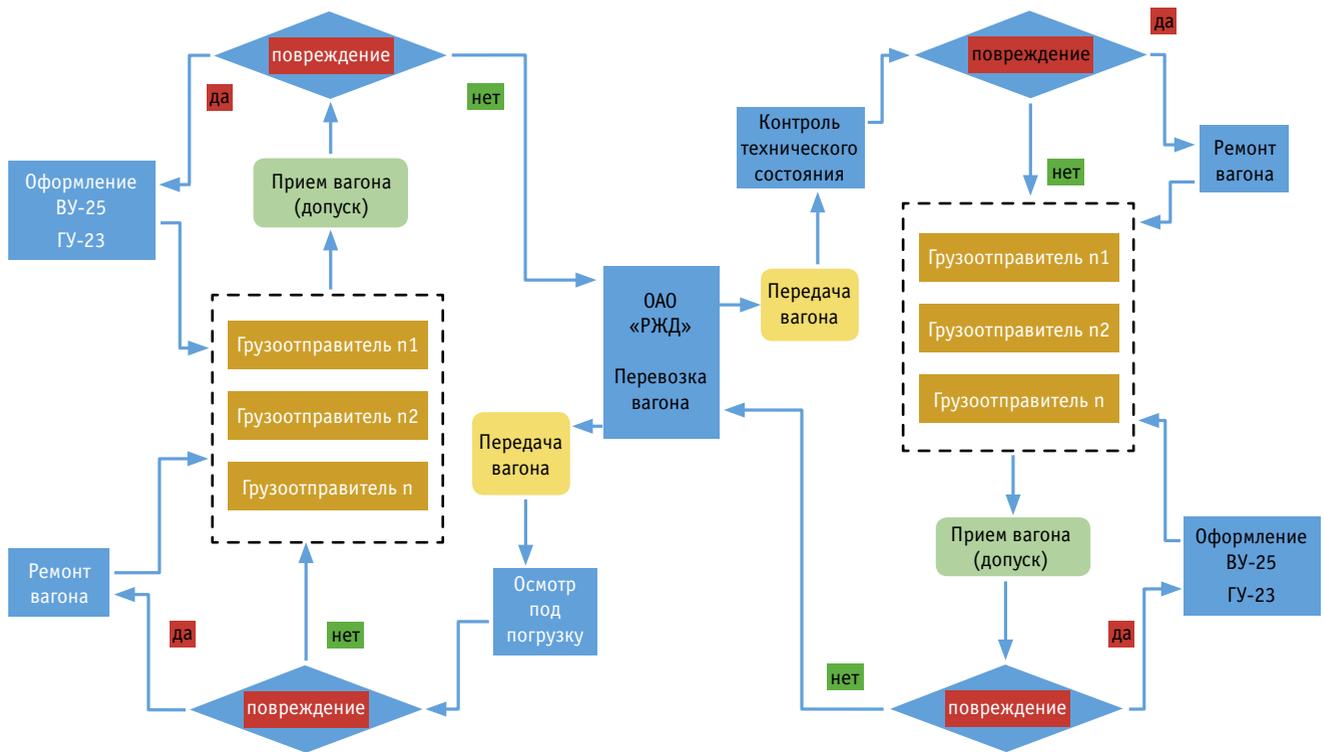


Рис. 3. Модель организации контроля сохранности вагонов после грузовых операций на промышленных предприятиях

Задача моделирования процесса организации приема вагона на инфраструктуру ОАО «РЖД» заключается в создании такой модели, которая при наличии стохастической системы допуска вагона позволит автоматизировать процедуру допуска и существенно снизить риски пропуска поврежденного вагона. Такая модель должна обеспечить:

- считывание инвентарных номеров вагонов;
- определение комплектации и комплектности вагона перед его подачей на пути необщего пользования;
- определение комплектации и комплектности вагона при его приеме с путей необщего пользования;
- сравнение комплектации и комплектности вагона до и после приема на пути необщего пользования;
- автоматическое формирование электронной книги ВУ-15 с передачей информации в АРМ-ТОВ;
- формирование логического запрета на прием вагона с путей необщего пользования в случае отличия в комплектации и комплектности вагона;
- автоматическое выявление повреждений вагона из-за нарушения требований ГОСТ 22235–2010 при операциях погрузки-выгрузки на путях необщего пользования;
- автоматическое формирование акта общей формы ГУ-23 и акта о повреждении вагона ВУ-25;
- предъявление акта о повреждении вагона формы ВУ-25 виновнику повреждения, идентификацию подписи на акте, принятие решения о направлении вагона в ремонт.

Таким образом, рассмотренная система позволит ввести барьерную функцию «формирование логического запрета на прием вагона с путей необщего пользования при выявлении по-

врежденного вагона». Практическая реализация этой функции может быть осуществлена путем использования памятки на подачу и уборку вагонов формы ГУ-45 [18]. Памятка является единственным унифицированным первичным документом для организации учета подачи (уборки) вагонов на пути / с путей общего и необщего пользования.

Разработка подобной системы, способствующей реализации барьерных функций при допуске вагонов на инфраструктуру, должна проводиться поэтапно и с учетом действующих в ОАО «РЖД» технических решений и технологических процессов.

В целом практическая реализация предложенной модели организации барьерных функций обеспечит:

- снижение рисков допуска на пути необщего пользования поврежденных, угрожающих безопасности движения и технически неисправных грузовых вагонов (за счет автоматизации процесса выявления повреждений);
- автоматизированное выявление и учет повреждений вагонов на путях необщего пользования;
- централизованный учет и контроль поврежденных вагонов, создание единой базы повреждений;
- сокращение финансовых потерь ОАО «РЖД» и вагоновладельцев от повреждений вагонов на путях необщего пользования.

Кроме того, внедрение барьерной системы обеспечения сохранности грузовых вагонов при их приеме с путей необщего пользования потребует от владельцев промышленных предприятий направлять инвестиции на техническое перевооружение, использовать новые, неагрессивные, технологии погрузки-выгрузки для снижения финансовых потерь при выполнении грузовых операций с вагонами.

Литература

1. Свердлов В. Б., Лапшин В. Ф. Обеспечение сохранности вагонного парка на путях необщего пользования // Транспорт Урала. 2021. № 4 (71). С. 33–39. DOI: 10.20291/1815-9400-2021-4-33-39.
2. Анализ положения с обеспечением сохранности вагонного парка за 9 месяцев 2022 года. Москва : Проектно-конструкторское бюро вагонного хозяйства, 2022. 92 с.
3. Скорина Н. И., Сендеров Г. К. Сохранность вагонного парка // Железнодорожный транспорт. 1992. № 3. С. 34–39. ISSN 0044-4448.
4. Сендеров Г. К., Поздина Е. А. Сохранность вагонов — одно из важных условий успешной работы транспорта // Железнодорожный транспорт. 2004. № 3. С. 104–107. ISSN 0044-4448.
5. Обеспечивать сохранность вагонов: Положение с сохранностью вагонов грузового парка за 2000–2004 гг. Повреждения вагонов на дорогах РЖД / Г. К. Сендеров, Е. А. Поздина, А. Н. Антропов, С. А. Пряников // Железнодорожный транспорт. 2005. № 10. С. 55–58. ISSN 0044-4448.
6. Клавдиенко О. А. Сохранность вагонного парка: проблемы остаются // Вагоны и вагонное хозяйство. 2013. № 1 (33). С. 23–24. ISSN 1817-6089.
7. Медведева В. А. Сохранность вагона — общая проблема участников рынка грузоперевозок // Вагоны и вагонное хозяйство. 2015. № 4. С. 5. ISSN 1817-6089.
8. Лапшин В. Ф., Егоров Д. В. Сохранность подвижного состава при виброзагрузке смерзающихся грузов: проблемы и постановка задачи компьютерного моделирования // Инновационный транспорт. 2017. № 1. С. 37–42. DOI: 10.20291/2311-164X-2017-1-37-42. ISSN 2311-164X.
9. ГОСТ 22235–2010. Вагоны грузовые магистральных железных дорог колеи 1520 мм. Общие требования по обеспечению сохранности при производстве погрузочно-разгрузочных и маневровых работ. Москва : Стандартинформ, 2011. 18 с.
10. О вводе в действие дополнительных барьерных функций, исключающих допуск на инфраструктуру ОАО «РЖД» грузовых вагонов, укомплектованных нелегитимными литыми деталями : распоряжение ОАО «РЖД» от 07.04.2016 г. № 612р.
11. О вводе в действие барьерных функций, исключающих допуск на инфраструктуру ОАО «РЖД» грузовых вагонов, укомплектованных нелегитимными деталями и деталями-двойниками : распоряжение ОАО «РЖД» от 24.04.2017 г. № 807р. URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71600584/> (дата обращения: 26.11.2022).
12. О развитии логических контролей по допуску подвижного состава на инфраструктуру в автоматизированных системах ОАО «РЖД» : распоряжение ОАО «РЖД» от 15.12.2017 г. № 2618р.
13. Щукин П. В. Применение барьерных функций в сфере логического контроля парка грузовых вагонов за 2021 г. // Вагоны и вагонное хозяйство. 2022. № 2 (70). С. 20–21. ISSN 1817-6089.
14. Положение о порядке контроля сохранности грузовых вагонов при их приеме и перевозке на инфраструктуру ОАО «РЖД» и обеспечение их сохранности в процессе перевозки : распоряжение ОАО «РЖД» от 29.05.2020 г. № 1153/р. URL: <https://docs.cntd.ru/document/565139670> (дата обращения: 26.11.2022).
15. Комплект технологической документации на типовой технологический процесс работы пункта технической передачи грузовых вагонов ТК-469 : распоряжение ОАО «РЖД» от 15.12.2021 г. № 2828/р.
16. Павлова Е. С. Математическое моделирование технических объектов // Карельский научный журнал. 2014. № 4 (9). С. 176–178. ISSN 2311-0104.
17. Ермаков С. М. Метод Монте-Карло и смежные вопросы. Москва : Наука, 1975. 473 с.
18. Об утверждении форм памяток на подачу и уборку вагонов для организации автоматизированного контроля наличия вагонов на подъездных путях и расчета платы за пользование вагонами : указание МПС России от 27.03.2000 г. № Д-720у.

References

1. Sverdlov V. B., Lapshin V. F. Car fleet safety assurance on non-public railway tracks [Obespechenie sokhrannosti vagonnogo parka na putyakh neobshhego pol'zovaniya] // Transport of the Urals. 2021. No. 4 (71). Pp. 33–39. DOI: 10.20291/1815-9400-2021-4-33-39.
2. Analysis of state of car fleet safety assurance for 9 months of 2022 [Analiz polozheniya s obespecheniem sokhrannosti vagonnogo parka za 9 mesyatsev 2022 goda]. Moscow : Planning and design office of car service, 2022. 92 p.
3. Skorina N. I., Senderov G. K. Safety of car fleet [Sokhrannost' vagonnogo parka] // Railway Transport. 1992. No. 3. Pp. 34–39. ISSN 0044-4448.
4. Senderov G. K., Pozdina E. A. Safety of cars — one of important conditions for successful operation of transport [Sokhrannost' vagonov — odno iz vazhnykh usloviy uspezhnoy raboty transporta] // Railway Transport. 2004. No. 3. Pp. 104–107. ISSN 0044-4448.
5. It is necessary to ensure safety of cars: State of safety of freight car fleet for the period of 2000–2004. Damage of cars on railways of the JSC «RZD» [Obespechivat' sokhrannost' vagonov: Polozhenie s sokhrannost'yu vagonov gruzovogo parka za 2000–2004 gg. Povrezhdeniya vagonov na dorogakh RZHD] / G. K. Senderov, E. A. Pozdina, A. N. Antropov, S. A. Pryanikov // Railway Transport. 2005. No. 10. Pp. 55–58. ISSN 0044-4448.
6. Klavdienko O. A. Safety of car fleet: Problems remain [Sokhrannost' vagonnogo parka: problemy ostayutsya] // Railway Cars and Carriage Equipment. 2013. No. 1 (33). Pp. 23–24. ISSN 1817-6089.
7. Medvedeva V. A. Car safety — common problem of freight transportation market participants [Sokhrannost' vagona — obshhaya problema uchastnikov rynka gruzoperevozok] // Railway Cars and Carriage Equipment. 2015. No. 4 (44). P. 5. ISSN 1817-6089.
8. Lapshin V. F., Egorov D. V. The safety of the rolling equipment during the vibration discharge of the cargo that is to be liquefied: problems and setting of the task of computer modeling [Sokhrannost' podvizhnogo sostava pri vibrozagruzke smerzayushhikhsya gruzov: problemy i postanovka zadachi komp'yuternogo modelirovaniya] // Innотrans. 2017. No. 1 (23). Pp. 37–42. DOI: 10.20291/2311-164X-2017-1-37-42. ISSN 2311-164X.
9. GOST 22235–2010. Freight cars for 1520 mm gauge main line railways. General requirements for safety in loading-unloading and shunting operations [Vagony gruzovye magistral'nykh zheleznykh dorog kolei 1520 mm. Obshhie trebovaniya po obespecheniyu sokhrannosti pri proizvodstve pogruzochno-razgruzochnykh i manevrovyykh rabot]. Moscow : Standardinform, 2011. 18 p.
10. On putting into operation of additional barrier functions that eliminate release on the JSC «RZD» infrastructure of freight cars equipped with illegal cast parts [O vvode v deystvie dopolnitel'nykh bar'ernykh funktsiy, isklyuchayushhikh dopusk na infrastrukturu ОАО «RZhD» gruzovykh vagonov, ukomplektovannykh nelegitimnymi litymi detal'yami] : the Order of the JSC «RZD» dated 07.04.2016 No. 612r.
11. On putting into operation of additional barrier functions that eliminate release on the JSC «RZD» infrastructure of freight cars equipped with illegal parts or duplicates [O vvode v deystvie bar'ernykh funktsiy, isklyuchayushhikh dopusk na infrastrukturu ОАО «RZhD» gruzovykh vagonov, ukomplektovannykh nelegitimnymi detal'yami i detal'yami-dvoynikami] : the Order of the JSC «RZD» dated 24.04.2017 No. 807r. URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71600584/> (access date: 26.11.2022).
12. On development of logical control on allowance of rolling stock on the infrastructure in automated systems of the JSC «RZD» [O razvitiy logicheskikh kontroley po dopusku podvizhnogo sostava na infrastrukturu v avtomatizirovannykh sistemakh ОАО «RZhD»] : the Order of the JSC «RZD» dated 15.12.2017 No. 2618r.
13. Shhukin P. V. Application of barrier functions in sphere of logical control of freight car fleet for the 2021 [Primeneniye bar'ernykh funktsiy v sfere logicheskogo kontrolya parka gruzovykh vagonov za 2021 g.] // Railway Cars and Carriage Equipment. 2022. No. 2 (70). Pp. 20–21. ISSN 1817-6089.
14. Statement on procedure for control of safety of freight cars at their reception and transportation to the JSC «RZD» infrastructure and ensurance of their safety during transportation [Polozhenie o poryadke kontrolya sokhrannosti gruzovykh vagonov pri ikh prieme i perevozke na infrastrukturu ОАО «RZhD» i obespechenie ikh sokhrannosti v protsesse perevozki] : the Order of the JSC «RZD» dated 29.05.2020 No. 1153r. URL: <https://docs.cntd.ru/document/565139670> (access date: 26.11.2022).
15. Set of technological documentation on typical technological process of operation of point for technical transition of freight cars TK-469 [Komplekt tekhnologicheskoy dokumentatsii na tipovoy tekhnologicheskiiy protsess raboty punkta tekhnicheskoy peredachi gruzovykh vagonov TK-469] : the Order of the JSC «RZD» dated 15.12.2021 No. 2828/r.
16. Pavlova E. S. Mathematical modeling technical object [Matematicheskoe modelirovanie tekhnicheskikh ob'ektov] // Karelian Scientific Journal. 2014. No. 4 (9). Pp. 176–178. ISSN 2311-0104.
17. Ermakov S. M. The Monte-Carlo technique and adjacent questions [Metod Monte-Karlo i smezhnye voprosy]. Moscow : Science, 1975. 473 p.
18. On approval of a checklist form on car spotting and picking for organization of automated control of car presence on non-public tracks and calculation of fare for car usage [Ob utverzhdenii form pamyatok na podachu i uborku vagonov dlya organizatsii avtomatizirovannogo kontrolya nalichiya vagonov na pod'ezdnykh putyakh i rascheta platy za pol'zovanie vagonami] : instruction of the Russian Ministry of Railways dated 27.03.2000 No. D-720u.

УДК 629.4

Нина Фридриховна Сирина, доктор технических наук, профессор кафедры «Вагоны» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,
Александр Евгеньевич Колодин, главный инженер службы вагонного хозяйства Свердловской дирекции инфраструктуры ОАО «РЖД», Екатеринбург, Россия

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ АРХИТЕКТУРА ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И РЕМОНТА ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ

Nina Fridrikhovna Sirina, DSc in Engineering, Professor, Railway Cars Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,
Alexander Evgenyevich Kolodin, Chief Engineer, Car Service Division, Sverdlovsk Infrastructure Directorate of the JSC «RZD», Ekaterinburg, Russia

Functional architecture of digital model of maintenance and repair of freight cars

Аннотация

Внедрение комплексной цифровизации вагонного хозяйства обусловлено прогрессивным развитием железнодорожного транспорта. Динамично развивающиеся программные продукты генерируют требования к трансформации отрасли, диктуют неизбежные изменения в архитектуре производства. Цифровизация производственных процессов и их внутренних связей все более глубоко интегрируется в технологию технического обслуживания и ремонта подвижного состава, становится базовым принципом производственного цикла любого уровня.

Для прогнозирования технического состояния грузовых вагонов предлагается модель системы их этапного сервисного обслуживания и ремонта. Созданная в цифровом виде симуляция описывает модель, позволяющую многократно просчитывать различные производственные сценарии при разнообразных заданных условиях и давать оптимальный прогноз конечных показателей технического обслуживания и ремонта вагона, не прибегая к натуральной оценке полученного результата.

Ключевые слова: система технического обслуживания и ремонта вагонов, цифровая трансформация, цифровая модель, цифровой двойник вагона, информационные потоки.

Abstract

Introduction of complex digitalization of car services is determined by progressive development of railway transport. Dynamically developing software products form inseparable requirements to transformation of the industry and dictate inevitable changes in the production architecture.

Digitalization of production processes and their internal connections integrates more deeply into technology of maintenance and repair of rolling stock and becomes a basic principle of a production cycle of any level.

For forecasting a technical condition of freight cars the authors suggest a model of a system for their phased maintenance and repair. A simulation created in the digital form describes the model that allows repeatedly calculating various production scripts at various given conditions and giving an optimal forecast of final indicators of maintenance and repair of a car without resorting to natural assessment of the result.

Keywords: system of maintenance and repair of cars, digital transformation, digital model, digital twin of a car, flows of information.

DOI: 10.20291/1815-9400-2023-1-14-19

ВВЕДЕНИЕ

Цифровизация всех отраслей железнодорожного транспорта России требует изменения принципов управления процессами технического обслуживания и ремонта вагонов. Цифровая трансформация вагонного хозяйства подразумевает не только установку современного оборудования или программного обеспечения, но и фундаментальные изменения в подходах к управлению, корпоративной культуре, внешним коммуникациям. Внедрение цифровых методов значительно повышает производительность труда, снижает себестоимость перевозок, поэтому подавляющее большинство участников вагонной бизнес-модели готовы использовать высокотехнологичные методы производства для сохранения конкурентных преимуществ на рынке.

Ручной сбор и ведение информации о вагоне для формирования и отражения полного жизненного цикла в его паспорте, листе комплектации по узлам и деталям требовали значительных ресурсов. Количественные и качественные показатели после многочисленных ретрансляций имели достаточную погрешность без возможности подтверждения. С такой же уверенностью можно сказать про сбор и использование информации о личном участии каждого работника в технологических процессах вагонного депо. Оценка, а значит, и возможность влиять на персональный результат без использования цифровых технологий затруднительна и нередко субъективна. Полнота и актуальность информационных ресурсов, аккумулирующих характеристики вагона в режиме реального времени, позволяет точно планировать расходную и прогнозировать доходную часть бюджета, контролировать выполнение задач и в случае необходимости принимать управленческие решения. Для выбора оптимального варианта распределения ресурсов предлагается разработка и интегрирование в производственную среду вагонного хозяйства методов математического моделирования.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Анализ результатов реформирования вагонного хозяйства свидетельствует о необходимости разработки единой модели его организационной структуры. При этом моделированию подлежит не только сама производственная система, но и связи между ее компонентами и объектами, которые участвуют в техническом обслуживании и ремонте. Например, за счет разработки паспорта эксплуатационного вагонного депо АГУ-11ВЦ и учетной формы АГО-4, расширенного паспорта грузового вагона (ВУ-4ЖА), формирования паспорта линейного сотрудника ПТО достигается детальное описание состояния ресурсов и объектов производства. Такой подход позволяет перейти к единому источнику информации, с высокой степенью точности оценить эффективность работы, повысить качество планирования деятельности инфраструктуры вагонного хозяйства по содержанию, текущему обслуживанию и ремонтам.

Моделирование подвижных единиц вагонного парка — это исходные данные, от которых напрямую зависит качественный результат работы с грузовыми вагонами. Цифровое описание вагона включает в себя учет всех его номерных деталей, порожнего и груженого пробега, выполненных ремонтов и модернизаций вагона и его деталей, сбор и аналитику показаний средств диагностики и многое другое. В итоге результаты моделирования дают возможность на основе оценки технического состояния вагона прогнозировать его ресурс в режиме реального времени на всем протяжении жизненного цикла. Для определения фактического ресурса деталей вагонов применим цифровой образ с интегрированной информацией, полученной со средств диагностики полигона курсирования подвижной единицы. Комплексный анализ показаний средств диагностики подвижного состава на ходу поезда позволяет планировать ремонт или замену отдельных частей вагона и исключает ручной ввод разрозненных показаний в информационных системах. Использование предиктивной аналитики снижает количество отказов узлов и деталей, обеспечивает сокращение стоимости жизненного цикла грузового вагона с возможностью увеличения протяженности гарантийных плеч и перехода от плановых видов ремонта к ремонту по состоянию. Автоматизация процесса определения годности вагона к перевозкам минимизирует влияние человеческого фактора в принятии решения по эксплуатации вагона.

Заданный тренд совершенствования производства требует инкорпорирования в вагонное сообщество цифровых новшеств широкого спектра, пересмотра нормативов регулирования физического состояния подвижного состава за счет управления моделями вагонов, предприятий и бизнес-процессов внутри облачной (цифровой) модели системы технического обслуживания и ремонта (СТОР).

Облачная (цифровая) модель СТОР — это цифровое отображение комплекса организационных, технических, технологических мероприятий, направленных на сопровождение полноценного жизненного цикла вагона, при этом входные и выходные данные в облаке взаимозависимо связаны с физическим состоянием объекта. В состав облачной (цифровой) модели СТОР входят:

цифровой двойник вагона;

цифровой двойник предприятия, имеющего право технического обслуживания и ремонта вагона и его комплектующих;

цифровой двойник инфраструктуры диагностики подвижного состава в поездах;

цифровой двойник правового регулирования, включающий нормативно-техническую документацию по вагонному хозяйству;

цифровой двойник технологических связей со смежными хозяйствами (движения, ТЦФТО, тяги и др.).

При помощи этих инструментов осуществляется полный и достаточный спектр операций по содержанию вагона на основе принципа предиктивности на протяжении всего жизненного цикла с возможностью управлять процессами в режиме реального времени и использовать данные о состоянии подвижного состава в любой момент его обслуживания. Моделирование позволяет прогностически определять время, место, объем технического обслуживания и ремонта вагонного парка, а также аналитически оценивать качество выполняемых работ (не только в разрезе элементов СТОР, но и в поузловом понимании уязвимости вагона в зависимости от рода перевозимого груза) с последующей корректировкой. Благодаря прозрачности и доступности цифровой информации можно с максимальной достоверностью прогнозировать мероприятия по содержанию вагона при перевозочном процессе и при эксплуатации в целом. Использование данных облачной модели позволяет оперативно принимать управленческие решения и, как следствие, сохранять за предприятием и отраслью лидирующие конкурентоспособные позиции в динамично развивающемся бизнес-пространстве.

Исследования оптимальной системы технического обслуживания грузовых вагонов [1–4] рассматривают базовую производственную цикличность операций и бизнес-процессов для поддержания подвижного состава в исправном состоянии. Математическое моделирование системы, основанное на оценке риска возникновения неисправности в процессе перевозки с учетом излишних финансовых издержек, позволяет расширить вариативность способов решения задачи.

Система технического обслуживания и ремонта железнодорожного подвижного состава — это совокупность технических средств, документации по техническому обслуживанию и ремонту, а также исполнителей, необходимых для выполнения задач технического обслуживания и ремонта [5]. Общие принятые методы, основанные на положениях действующего межгосударственного стандарта, не позволяют с высокой долей вероятности прогнозировать уровень технической готовности.

Вместе с тем научные исследования [6–9] по поиску оптимальной модели технического обслуживания и ремонта пассажирских вагонов применимы в случаях правообладания объектами обслуживания и инфраструктурой (пассажирские вагоны являются собственностью АО «ФПК», как и вагонные депо, их ремонтирующие). При данной модели наиболее приемлемым вариантом контроля за технической готовностью пассажирских вагонов является внедрение сервисного обслуживания железнодорожного подвижного состава.

Для грузовых вагонов, в отличие от пассажирских, подобная модель имеет достаточное количество ограничений, что

обусловлено различиями требований к порядку, виду и срокам технического обслуживания и ремонта. Методики оценки жизненного цикла грузового вагона [10–13] в отсутствие моделей СТОР (аналитических, имитационных) не позволяют комплексно оценивать результирующие последствия от внеплановых ремонтов. Разнохарактерные факторы, такие как причина отказа подвижной единицы, простои вагона в ожидании ремонта, метод ремонта (с заменой запасной части или ремонтом узла, с выкаткой из-под вагона с последующей подкаткой под этот же вагон), условия оплаты выполненных работ, транспортные расходы и пр. не могут служить предикторами системы. Из-за этого нельзя получить точные прогнозные оценки жизненного цикла грузового подвижного состава.

Описание взаимодействия объектов путем математического моделирования дает возможность решать задачи различной степени сложности и обеспечивает вариативность применяемых технологических процессов, в которых множество элементов модели может рассматриваться как в виде отдельных составных частей, так и в виде различных вариантов функциональных и структурных связей и зависимостей. Именно вариативность связей и качество заданных параметров позволяет получить оптимально сбалансированную структуру [14].

Зарубежные исследователи моделей планирования технического обслуживания и ремонта используют вероятность отказов технических средств в заданный момент времени. При этом модель в первую очередь опирается на возможности производственных площадок, их обеспеченность ресурсами, в том числе запасными частями, а также на время и место выполнения операций по техническому обслуживанию и ремонту.

Например, работы [15–19] посвящены поиску оптимального варианта схем распределения технических и технологических ресурсов, направленного на поддержание эксплуатируемого парка грузовых вагонов в технически исправном состоянии. В том числе исследования нацелены на определение адаптивной организационно-управленческой структуры процесса технического обслуживания и ремонта подвижного состава. Зарубежные ученые приоритетно выделяют методы решения указанных задач путем линейного и динамического программирования, изучения стохастической модели и анализа текущих значений.

В частности, Campbell и Reyes-Picknell [20] рассматривают техническое обслуживание в качестве инвестиций в производственные мощности и предлагают исключить из рассмотрения систему поддержания работоспособности технических средств как необходимое зло — центр затрат. Разработка и внедрение оптимальной модели технического обслуживания предоставляют максимально возможное количество вариантов рационального распределения производственных ресурсов в текущий момент, в том числе с учетом ситуации на отраслевом рынке. Campbell и Reyes-Picknell [20] делают вывод о необходимости не только создания вариативной структуры СТОР, но и ее поддержания в гибком состоянии (т.е. способность подстраиваться под постоянно меняющиеся условия отрасли и экономики в целом как на уровне принятия управленческих решений, так и на программно-аппаратном уровне).

Российские ученые при решении задач по организации и управлению СТОР подвижного состава делают акцент на математических методах. Широкое применение получили статистические методы с привлечением математического аппарата теории массового обслуживания, теории случайных процессов, в том числе по расположению вагоноремонтных мощностей на полигоне российских железных дорог [6–9], а также метод сетевого планирования управления, использующий теорию графов. В его основу закладывается цифровая модель грузового вагона в СТОР как результирующая работы самой системы содержания парка грузовых вагонов в общих границах жизненного цикла.

Построение оптимальной модели технического обслуживания и ремонта связано с решением таких задач, как:

- определение условий эксплуатации грузового вагонного парка на протяжении всего жизненного цикла;
- определение методов и технологических решений выполнения технического обслуживания и ремонта подвижного состава с актуальной оценкой трудовых и временных затрат;
- определение структуры, объема, требований и условий в заданный момент эксплуатации подвижного состава;
- разработка критериев по определению эффективности построенной модели СТОР, включая оценку результативности вклада каждого блока в техническое содержание вагонов.

Формирование модели СТОР грузовых вагонов базируется на представлении деятельности системы как взаимодействия всех участников жизненного цикла подвижных единиц в лице самостоятельных организационно-структурных предприятий, взаимосвязанных по отраслевому признаку, но, возможно, не связанных обязательствами. Функциональная архитектура подсистем внутри предприятий, а также структура их взаимодействий рассматривается в качестве системного метода, который позволит детально описать, как функционирует отдельный структурный элемент системы [21–23].

Структура цифровой модели технического обслуживания и ремонта грузового подвижного состава (рис. 1) представляет собой симбиоз взаимосвязанных друг с другом прямо либо опосредованно элементов, обслуживающих жизненный цикл вагона. При таком представлении сегменты модели напрямую или через промежуточные связи контактируют в интересах цели СТОР — поддержания вагона в работоспособном состоянии. От конфигурации и направления потоков связей зависят быстрота, качество взаимодействия и, как следствие, стоимость процессов. Управленческие решения принимаются на основе анализа результирующих оценок сегментов и их связей на входящем и на исходящем потоке информации.

Базовый уровень предлагаемой модели — цифровой двойник грузового вагона. Он представляет собой информационную характеристику технических, экономических, правовых параметров подвижной единицы, а также всех ее составных частей в любой момент времени.

Второй сегмент — цифровой двойник технологического процесса. Он представляет собой виртуальное пространство, ограниченное рамками технологического процесса изготовления, ремонта и технического обслуживания грузового вагона, описывает технологический процесс СТОР. Этот сегмент зави-



Рис. 1. Структура цифровой модели технического обслуживания и ремонта грузового подвижного состава



Рис. 2. Функциональная схема цифровой модели СТОР грузовых вагонов

сит от рода эксплуатируемого грузового подвижного состава, а также от требований, предъявляемых заводом-изготовителем.

Третий сегмент — цифровой двойник структурного подразделения. Он представляет собой информационную копию структурного подразделения вагонного хозяйства на полигоне сети железных дорог, осуществляющих техническое обслуживание и ремонт. В этот сегмент входит также цифровое описание вагоновладельцев. Структурный сегмент виртуально дает полную технико-экономическую характеристику вагоноремонтных и вагонообслуживающих подразделений и вагоновладельцев. Он включает в себя структурные связи между подразделениями изготовления, ремонта и обслуживания вагонов в процессе эксплуатации, а также отношения (в том числе договорные) между самими структурами и между вагоновладельцами. Например, возможны следующие варианты взаимодействия: структура — структура, структура — вагоновладелец и т.п. Конфигурация и объем взаимодействия регулируются договорами между участниками вагоноремонтного рынка.

Четвертый сегмент — цифровой нормативный контроль. Он представлен отдельной структурой и регулирует взаимодействие всех участников вагонной отрасли на основании оценки входящей и исходящей информации между сегментами и сравнения результатов с нормативно установленными значениями и положениями. Входящие данные для обработки четвертым сегментом (поток отказов грузового подвижного состава, расположение вагона, его правовой статус, фактическая возможность производственной вагоноремонтной площадки, обеспеченность ресурсами и т.д.) сопоставляются с нормативно-правовыми требованиями к техническим параметрам вагона и с готовностью производственных предприятий выполнять работы по техническому обслуживанию и ремонту. В результате обработки поступившей информации генерируется выбор оптимального технологического варианта из возможных решений в актуальный момент времени для конкретного вагона с последующим принятием соответствующего управленческого решения. Этот сегмент содержит актуализирован-

ную базу нормативных требований, действующих в Российской Федерации и железнодорожных администрациях государств — участников СНГ.

В работах [6–9] при моделировании структуры сервисного обслуживания и ремонта пассажирских вагонов используется схема, позволяющая графически изобразить состав модели. Взяв данную схему за основу и адаптируя ее к грузовому подвижному составу, представим функциональную схему цифровой модели СТОР грузовых вагонов с отражением всех информационных потоков (рис. 2).

Цифровая модель СТОР представлена в виде четырех уровней, связанных между собой информационными потоками.

1. Объектный уровень (цифровая модель объекта). Он является первичным уровнем. Здесь осуществляются операции по изменению физических характеристик вагона силами вагоноремонтных предприятий. Производится сбор входных и выходных геометрических параметров и характеристик деталей подвижной единицы. Процесс сбора осуществляется в автоматическом режиме путем измерения соответствующих параметров с последующей передачей результатов в информационные системы. Помимо измерений подвижной единицы и ее составных узлов также аккумулируются и анализируются характеристики производственных подразделений. При этом оцифровывается уровень готовности предприятия к объемам ремонта, оценивается его технологическая загрузка и достаточность материальных, технических и человеческих ресурсов. Объектный уровень включает в себя вагон и его составные части с полной их характеристикой; вагоновладельцев, операторов подвижного состава; грузоотправителей-грузополучателей.

2. Уровень управления данными. Здесь информация, полученная на объектном уровне, перерабатывается с обязательной интеграцией во все информационные ресурсы, используемые для технического обслуживания и ремонта вагонов. Барьерные функции на основе нормативных регламентных ограничений, заложенные в инфоресурсах, реализуются командными строками для оперативного реагирования или предупреждающих мер.

3. Ресурсный уровень. Этот уровень включает держателей тех ресурсов, которые необходимы для выполнения операций технического обслуживания и ремонта, в том числе информацию и расчеты, используемые для принятия соответствующих управленческих решений. Здесь корректируется бюджет предприятий вагонного хозяйства и операторских компаний — собственников подвижного состава. Получаемые варианты решения имеют строгий алгоритм, выполнение которого позволит объектодержателям оптимально реализовать свой функционал.

4. Административный уровень. Здесь содержатся все нормативно-технические требования, действующие в ведении вагонного хозяйства и транспорта в целом, которым должен соответствовать процесс эксплуатации и ремонта подвижного состава. Административный уровень устанавливает правила и порядок взаимодействия всех участников модели вагонного хозяйства.

Следует отметить, что уровни имеют прямые связи как между собой, так и между составляющими внутри каждого уровня. Информационные потоки аккумулируются в облачное хранилище для последующего использования в управлении объектами ремонта, инструментами, ресурсами и активами производства. Доступ в хранилище гарантирует максимальные преимущества для производственных площадок СТОР, а также возможность владельцу подвижного состава оптимально использовать необходимую информацию в процессе технического обслуживания и ремонта. Наличие протоколов информационной безопасности при передаче данных между уровнями, а также при подключении к облачной сети исключает несанкционированное использование сведений третьими лицами.

Цифровая модель СТОР не ограничивается общим видом и охватом промышленного значения. Компоненты производственных процессов интегрированы в отдельные подуровни: эксплуатационный, ремонтный, операторский. Моделирование каждого процесса происходит на основании анализа данных, в том числе с другого подуровня, для планирования от-

дельного производства. Обмен информацией о технических, эксплуатационных, экономических характеристиках вагонов и производствах между уровнями и подуровнями программно ограничен достаточностью данных для принятия управленческих решений. Данное положение исключает недобросовестную конкуренцию, а также позволяет сохранять конфиденциальность хода производственных процессов и запланированных мероприятий.

ВЫВОДЫ

Поиск оптимальной модели технического обслуживания и ремонта подвижного состава является актуальной задачей. При всем многообразии изготовителей, собственников, операторов подвижного состава и схем его технического обслуживания и ремонта использование исключительно сервисной модели уже неприемлемо.

Предпочтительный инструмент повышения эффективности использования грузового подвижного состава — переход на мультипликативную систему этапного сервисного обслуживания и ремонта, которая имеет определенный уровень готовности грузового вагона к перевозке (в порожнем либо груженом состоянии) в заданный момент времени и место проведения технического обслуживания или ремонта при достаточном уровне финансирования. Этапность в данном случае определяется периодом жизненного цикла: от постройки до планового ремонта, от планового ремонта до капитального ремонта, от капитального ремонта до планового, от порожнего рейса до груженого и т.д.

Для оптимального прогнозирования построена модель системы этапного сервисного обслуживания и ремонта парка грузовых вагонов. Созданная симуляция описывает в цифровом виде модель СТОР, которая многократно просчитывает разные производственные сценарии при различных заданных условиях, оптимально прогнозирует конечные показатели технического обслуживания и ремонта вагона, не прибегая к натуральной оценке полученного результата.

Литература

1. Сирина Н. Ф. Методологические основы формирования адаптивных механизмов организации вагоноремонтного комплекса : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Екатеринбург, 2009. 295 с.
2. Сирина Н. Ф. Моделирование управления вагоноремонтным комплексом // Вестник УрГУПС. 2009. № 1–2. С. 12–20. ISSN 2079-0392.
3. Сирина Н. Ф., Цыганов В. В. Адаптивные механизмы оценки и классификации дальновидных систем // Проблемы управления. 2006. № 6. С. 93–95. ISSN 1819-3161.
4. Andriole S. J., Cox T., Khin K. M. The Innovator's Imperative: Rapid Technology Adoption for Digital Transformation : 1st ed. New York : CRC Press, 2017. 179 p.
5. ГОСТ 32884–2014. Эксплуатация, техническое обслуживание и ремонт железнодорожного подвижного состава. Термины и определения. Москва : Стандартинформ, 2019. 12 с.

References

1. Sirina N. F. Methodological framework of formation of adaptive mechanisms of rolling stock repair [Metodologicheskie osnovy formirovaniya adaptivnykh mekhanizmov organizatsii vagonoremontnogo kompleksa] : DSc in Engineering Thesis. Ekaterinburg, 2009. 295 p.
2. Sirina N. F. Modelling of car-repair complex management [Modelirovanie upravleniya vagonoremontnym kompleksom] // Herald of USURT. 2009. No. 1–2. Pp. 12–20. ISSN 2079-0392.
3. Sirina N. F., Tsyganov V. V. Adaptive mechanisms of the prescient systems estimation and classification [Adaptivnye mekhanizmy otsenki i klassifikatsii dal'novidnykh system] // Control Sciences. 2006. No. 6. Pp. 93–95. ISSN 1819-3161.
4. Andriole S. J., Cox T., Khin K. M. The Innovator's Imperative: Rapid Technology Adoption for Digital Transformation : 1st ed. New York : CRC Press, 2017. 179 p.
5. ГОСТ 32884–2014. Operation, maintenance and repair for railway rolling stock. Terms and definitions [Ekspluatatsiya, tekhnicheskoe obsluzhivanie i remont zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava. Terminy i opredeleniya]. Moscow : Standardinform, 2019. 12 p.

6. Банников Д. А., Галкин А. Г., Сирина Н. Ф. Алгоритм расчета организации сервисного технического обслуживания и ремонта пассажирского подвижного состава // Транспорт Урала. 2017. № 4 (55). С. 31–35. DOI: 10.20291/1815-9400-2017-4-31-35. ISSN 1815-9400.
7. Bannikov D. A., Sirina N. F. Development of innovative railway rolling stock technologies // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. Vol. 1115. Pp. 401–407.
8. Bannikov D. A., Sirina N. F. Service maintenance and repair of passenger cars in the concept of Digital Enterprise // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 918 (2020) 012168. DOI: 10.1088/1757-899X/918/1/012168.
9. Банников Д. А., Сирина Н. Ф. Цифровая трансформация организации сервисного технического обслуживания и ремонта пассажирских вагонов // Современные наукоемкие технологии. 2021. № 3. С. 22–26. ISSN 1812-7320.
10. Оценка остаточного срока службы составной части вагона с учетом управляемого риска ее отказа / П. А. Устич, А. А. Иванов, Т. Г. Курыкина, М. А. Кузнецов // Железнодорожный транспорт. 2014. № 12. С. 56–57. ISSN 0044-4448.
11. Устич П. А. Работоспособность и надежность грузового вагона : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. Москва, 1992. 43 с.
12. Шикина Д. И. Расчетное обоснование системы технического обслуживания и ремонта грузовых вагонов с учетом качества ремонта // Неделя науки 2009. Москва : МИИТ, 2009. Т. 1. С. 79.
13. Гурский Е. П. Совершенствование технического обслуживания грузовых вагонов на основе вероятностного анализа их отказов // Механика. Исследования и инновации. 2017. № 10. С. 48–54. ISSN 2519-8742.
14. Белов И. В. Математические методы в планировании на железнодорожном транспорте. Москва : Транспорт, 1972. 248 с.
15. Pierskalla W. J., Voelker J. A. A survey of maintenance models: The control and surveillance of deteriorating systems // Naval Research Logistics Quarterly. 1976. No. 23. Pp. 353–388.
16. Osaki S., Nakagawa T. Classical Maintenance Models // IEEE Transactions on Reliability. 1976. No. 25. Pp. 284–287.
17. Sherif Y. S., Smith M. L. Optimal maintenance models for systems subject to failure — A Review // Naval Research Logistics Quarterly. 1981. No. 28. Pp. 47–74.
18. Valdez-Flores C., Feldman R. M. A survey of preventive maintenance models for stochastically deteriorating single-unit systems // Naval Research Logistics. 1989. No. 36. Pp. 419–446.
19. Cho D. I., Parlar M. A survey of maintenance models for multi-unit systems // European Journal of Operational Research. 1991. No. 51. Pp. 1–23.
20. Campbell J. D., Reyes-Picknell J. V. Uptime: Strategies for Excellence in Maintenance Management. Portland : Productivity Press, 1995. 368 p.
21. Патюрель Р. Создание сетевых организационных структур // Проблемы теории и практики управления. 1997. № 3. С. 76–81. ISSN 0234-4505.
22. Евсеев Д. Г., Щербаков К. Г. Сервисное обслуживание ТПС с управлением жизненным циклом // Мир транспорта. 2014. № 3. С. 134–139. ISSN 1992-3252.
23. Имитационное моделирование производственных систем / Под общ. ред. А. А. Вавилова. Москва : Машиностроение, 1983. 416 с.
6. Bannikov D. A., Galkin A. G., Sirina N. F. Calculation algorithm of organization of service technical maintenance and repair of passenger rolling stock [Algoritm rascheta organizatsii servisnogo tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta passazhirsogo podvizhnogo sostava] // Transport of the Urals. 2017. No. 4 (55). Pp. 31–35. DOI: 10.20291/1815-9400-2017-4-31-35. ISSN 1815-9400.
7. Bannikov D. A., Sirina N. F. Development of innovative railway rolling stock technologies // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. Vol. 1115. Pp. 401–407.
8. Bannikov D. A., Sirina N. F. Service maintenance and repair of passenger cars in the concept of Digital Enterprise // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 918 (2020) 012168. DOI: 10.1088/1757-899X/918/1/012168.
9. Bannikov D. A., Sirina N. F. Digital transformation of the organisation of passenger car service maintenance and repair [Tsifrovaya transformatsiya organizatsii servisnogo tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta passazhirsikh vagonov] // Modern high technologies. 2021. No. 3. Pp. 22–26. ISSN 1812-7320.
10. Assessment of remaining life of a car part with the consideration for controlled risk of its failure [Otsenka ostatochnogo sroka sluzhby sostavnoy chasti vagona s uchetom upravlyaemogo riska ee otказа] / P. A. Ustich, A. A. Ivanov, T. G. Kurykina, M. A. Kuznetsov // Railway Transport. 2014. No. 12. Pp. 56–57. ISSN 0044-4448.
11. Ustich P. A. Serviceability and reliability of a freight car [Rabotosposobnost' i nadezhnost' gruzovogo vagona] : Synopsis of DSc in Engineering Thesis. Moscow, 1992. 43 p.
12. Shikina D. I. Calculated substantiation for the system of maintenance and repair of freight cars with the consideration for repair quality [Raschetnoe obosnovanie sistemy tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta gruzovykh vagonov s uchetom kachestva remonta] // Science week 2009. Moscow : MIIT, 2009. Vol. 1. P. 79.
13. Gurskiy E. P. Improvement of technical maintenance of freight cars on the basis of probabilistic analysis of their failures [Sovershenstvovanie tekhnicheskogo obsluzhivaniya gruzovykh vagonov na osnove veroyatnostnogo analiza ikh otkazov] // Mechanics. Investigations and Innovations. 2017. No. 10. Pp. 48–54. ISSN 2519-8742.
14. Belov I. V. Mathematical methods in planning on railway transport [Matematicheskie metody v planirovanii na zheleznodorozhnom transporte]. Moscow : Transport, 1972. 248 p.
15. Pierskalla W. J., Voelker J. A. A survey of maintenance models: The control and surveillance of deteriorating systems // Naval Research Logistics Quarterly. 1976. No. 23. Pp. 353–388.
16. Osaki S., Nakagawa T. Classical Maintenance Models // IEEE Transactions on Reliability. 1976. No. 25. Pp. 284–287.
17. Sherif Y. S., Smith M. L. Optimal maintenance models for systems subject to failure — A Review // Naval Research Logistics Quarterly. 1981. No. 28. Pp. 47–74.
18. Valdez-Flores C., Feldman R. M. A survey of preventive maintenance models for stochastically deteriorating single-unit systems // Naval Research Logistics. 1989. No. 36. Pp. 419–446.
19. Cho D. I., Parlar M. A survey of maintenance models for multi-unit systems // European Journal of Operational Research. 1991. No. 51. Pp. 1–23.
20. Campbell J. D., Reyes-Picknell J. V. Uptime: Strategies for Excellence in Maintenance Management. Portland : Productivity Press, 1995. 368 p.
21. Patjurel R. P. Establishment of networking organizational structures [Sozdanie setevykh organizatsionnykh struktur] // Problems of theory and practice of control. 1997. No. 3. Pp. 76–81. ISSN 0234-4505.
22. Evseev D. G., Shherbakov K. G. Service maintenance of traction rolling stock with lifecycle management [Servisnoe obsluzhivanie TPS s upravleniem zhiznennym tsiklom] // World of Transport and Transportation. 2014. No. 3. Pp. 134–139. ISSN 1992-3252.
23. Simulation modeling of production systems [Imitatsionnoe modelirovanie proizvodstvennykh system] / Ed. by A. A. Vavilov. Moscow : Machinery, 1983. 416 p.

УДК 629.4.015

Елена Викторовна Сорокина, ведущий инженер АО НО «Тверской институт вагоностроения» (АО НО «ТИВ»), Тверь, Россия,
 Сергей Львович Самошкин, доктор технических наук, начальник управления научно-технического обеспечения
 и развития АО НО «Тверской институт вагоностроения» (АО НО «ТИВ»), Тверь, Россия,

Олег Сергеевич Самошкин, кандидат технических наук, начальник отдела развития научно-технических
 и инновационных продуктов, корпоративной системы менеджмента качества и бережливого производства
 АО «Федеральная пассажирская компания» (АО «ФПК»), Москва, Россия,

Сергей Дмитриевич Коршунов, кандидат технических наук, главный специалист
 АО НО «Тверской институт вагоностроения» (АО НО «ТИВ»), Тверь, Россия

РАЗРАБОТКА ТЕХНИЧЕСКИХ ТРЕБОВАНИЙ И ВНЕДРЕНИЕ УПРУГИХ МЕЖВАГОННЫХ ПЕРЕХОДОВ НА ОТЕЧЕСТВЕННЫХ ПАССАЖИРСКИХ ВАГОНАХ С УЧЕТОМ ВЕТРОВОЙ И ТЕПЛОВОЙ НАГРУЗКИ

Elena Viktorovna Sorokina, Principal Engineer, JSC Scientific Organization «Tver Institute of Car Engineering», Tver, Russia,
 Sergey Lvovich Samoshkin, DSc in Engineering, Head of Division of Scientific and Technical Support and Development,
 JSC Scientific Organization «Tver Institute of Car Engineering», Tver, Russia,

Oleg Sergeevich Samoshkin, PhD in Engineering, Head of Department of Development of Scientific,
 Technical and Innovative Products, Corporate Quality Management System and Lean Production,
 JSC «Federal Passenger Company», Moscow, Russia,

Sergey Dmitrievich Korshunov, PhD in Engineering, Head Specialist,
 JSC Scientific Organization «Tver Institute of Car Engineering», Tver, Russia

Development of technical requirements and introduction of elastic gangways on domestic passenger cars with the consideration for wind and thermal loads

Аннотация

Рассмотрены недостатки серийных переходных площадок и преимущества упругих межвагонных переходов, которые начали применяться на поездах постоянного формирования и двухвагонных сцепках. Представлены технические требования к упругим межвагонным переходам, учитывающие особенности эксплуатации инновационных вагонов, обусловленные в том числе температурной и ветровой нагрузкой.

Ключевые слова: инновационный пассажирский вагон, упругий межвагонный переход, технические требования, правила эксплуатации, техническое состояние.

Abstract

The paper considers drawbacks of serial gangways and advantages of elastic gangways that started to be applied on regular trains and two-car couplers. The authors present technical requirements to elastic gangways that consider features of operation of innovative cars substantiated by thermal and wind loads in particular.

Keywords: innovative passenger car, elastic gangway, technical requirements, operating rules, technical condition.

DOI: 10.20291/1815-9400-2023-1-20-25

Все пассажирские вагоны поездов дальнего следования и пригородного сообщения оборудованы специальными площадками, предназначенными для безопасного перехода пассажиров и обслуживающего персонала из вагона в вагон. За многолетнюю историю производства пассажирского подвижного состава конструкция переходных площадок претерпела значительную эволюцию. Сегодня на отечественных пассажирских вагонах наибольшее распространение получили упругие переходные площадки баллонного типа.

Переходные площадки относятся к числу основных частей пассажирских вагонов и входят в группу ударно-тяговых приборов. Эта группа также включает в себя автосцепки, поглощающие аппараты, буферы и упругие переходные площадки (рис. 1) [1]. Все они предназначены для соединения вагонов друг с другом и с локомотивом; удержания вагонов на определенном расстоянии друг от друга; передачи и амортизации действия продольных усилий, возникающих при движении поезда и при маневрах, и, как уже было сказано, для перехода пассажиров и обслуживающего персонала из одного вагона в другой по всему составу (кроме локомотива).

Анализ опытных пробегов [2] и данных от различных депо об эксплуатируемых вагонах [3] показал, что они имеют боль-

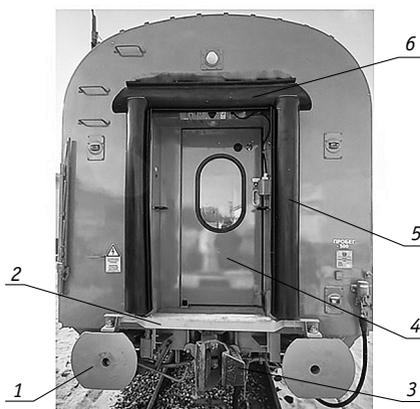


Рис. 1. Расположение ударно-тяговых приборов и элементов переходной площадки на торце вагона:

- 1 — буфер вагона; 2 — откидной мостик (фартук); 3 — автосцепное устройство;
- 4 — торцевая наружная дверь;
- 5 — боковые баллоны; 6 — верхний баллон

шое количество отказов и неисправностей по таким узлам, как резиновые баллоны, механизм подъема фартука, поперечная балка и элементы крепления балки к буферам, установка буферов.

Внедрение в начале XXI в. на железных дорогах инновационных пассажирских вагонов с обшивкой из нержавеющей стали, оснащенных установками кондиционирования, обеззараживания воздуха, экологически чистыми туалетными комплексами, потребовало создания принципиально новых переходных площадок [4, 5].

Эта задача стала еще более актуальной при разработке и введении в эксплуатацию пассажирских поездов постоянного формирования (производство Тверским вагоностроительным заводом моделей 61-4462 и 61-4463), оснащении вагонов беззазорными сцепными устройствами, а также при создании пассажирских вагонов модельного ряда — 2019 для двухвагонных сцепов и внедрении АО «Федеральная пассажирская компания» (АО «ФПК») малолюдных технологий обслуживания [6]. Кроме того, были утверждены дополнительные требования Роспотребнадзора по поддержанию во всем составе единого микроклимата и снижению уровня шума в вагонах при открывании и закрывании тамбурных дверей. Эти требования распространяются и на фирменные поезда, сформированные из новейших моделей двухэтажных пассажир-



Рис. 2. Структура монтажных узлов половины УМВП

ских вагонов (включая двухэтажные вагоны с креслами для сидения). Так возникло направление создания и внедрения герметизированных упругих переходов для инновационных пассажирских вагонов.

Упругие межвагонные переходы (УМВП) представляют собой гибкую часть межвагонных соединений, которые в точности повторяют относительное движение зазоров в покрытии перехода в зоне пола и обеспечивают, таким образом, безопасный и комфортабельный переход пассажиров и обслуживающего персонала из одного вагона в другой, защищают от внешних факторов температурного и ветрового воздействия, проникновения внешнего шума, воздуха и пыли. В связи с повышением скоростей поездов конструкция межвагонного перехода должна способствовать снижению аэродинамического сопротивления при движении вагона. Металлоконструкцию кузова вагона следует рассчитывать на прочность с учетом нагрузок, возникающих как от работы межвагонных переходов, так и от температурного и ветрового воздействия на вагон.

На первом этапе вагоны поездов постоянного формирования и двухвагонные сцепы оснащались УМВП фирмы

HÜBNER (Германия). Структура основных и второстепенных монтажных узлов половины УМВП в комплекте представлена на рис. 2. На рис. 3 основные и второстепенные монтажные узлы, а также конструкционные элементы показаны более подробно, что позволяет оценить полностью собранный УМВП.

Рассмотрим конструкцию двойного волнообразного сильфона в комплекте со сцепной рамой. Он состоит (см. рис. 3) из внутреннего и внешнего волнообразных сильфонов, двух боковых покрытий пола, навесной и сцепной рам. Сцепная и навесная рамы соединены с внутренним и внешним волнообразными сильфонами при помощи силового замыкания. Закрытый по периметру двойной волнообразный сильфон изготовлен из эластичного материала, уложенного волнами, и сильфонных рам (алюминиевых профилей). Волны сильфона представляют собой пришитые друг к другу полоски материала, специально предназначенного для изготовления сильфона, закрепленные по краям стабилизирующими сильфонными рамами (алюминиевыми профилями). Последние служат для стабилизации формы сильфона, а материал обеспечивает его гибкость.

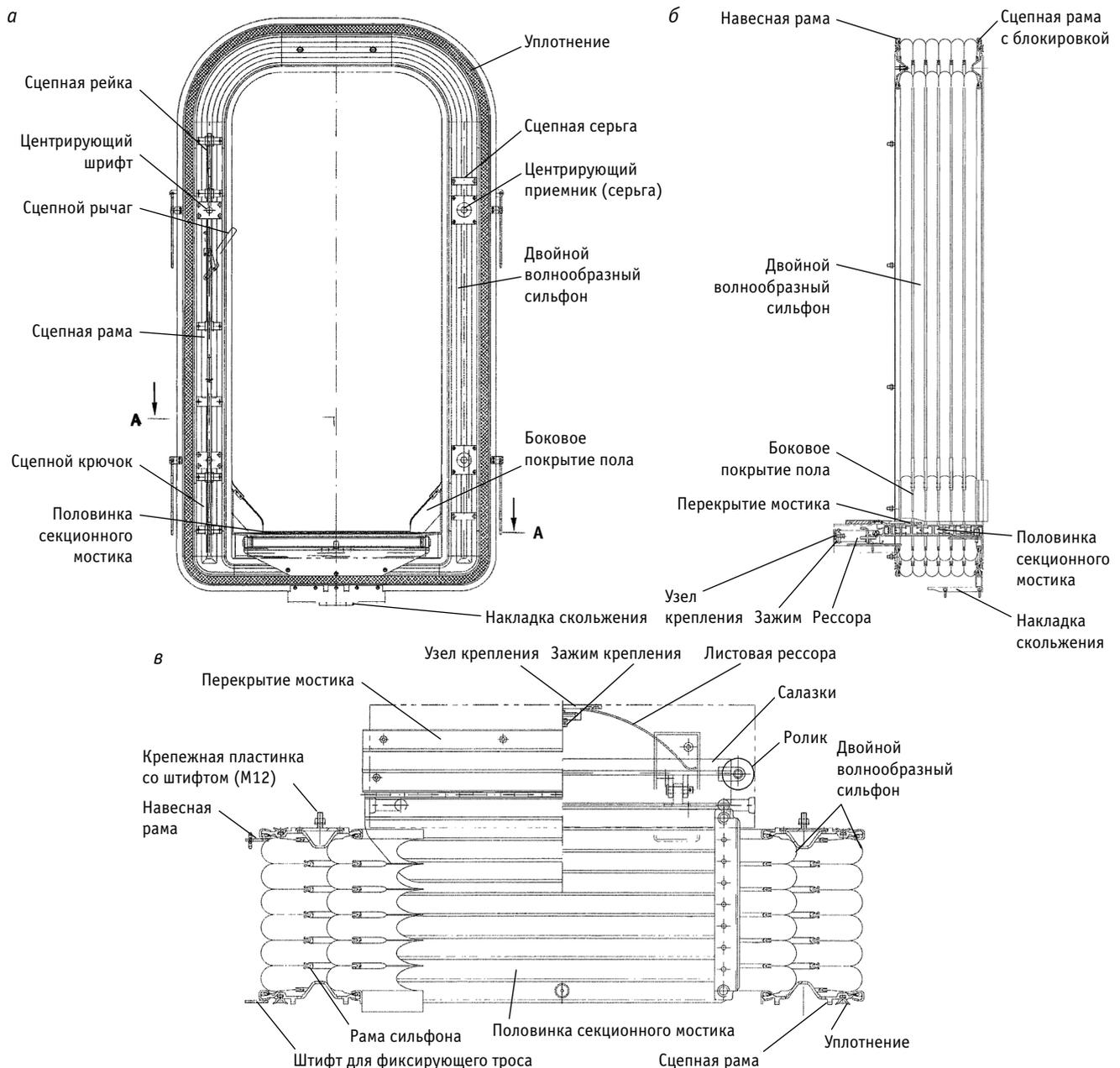


Рис. 3. Половина перехода в комплекте:

а — вид спереди; *б* — вид сбоку; *в* — разрез А-А

Для крепления волнообразного сиффона к торцевой стене вагона с помощью силового замыкания используется навесная рама (см. рис. 3б, в). Она покрыта специальным порошковым слоем, состоит из приваренных друг к другу алюминиевых профилей, в которые по периметру впрессовано уплотнение из профильной резины. Навесная рама устанавливается на торцевую стену вагона посредством крепления штифтов и гаек М12 (в 10 местах) и двух шпилек М10 в верхней части.

Сцепная рама (см. рис. 3а) состоит из двух приваренных друг к другу алюминиевых профилей, защищенных от окисления. Она оснащена блокирующим и центрирующим механизма-

ми, включающими в себя сцепную рейку с крюками, сцепные серьги, центрирующие штифты, центрирующие отверстия и рычаги сцепки. В профиль сцепной рамы по периметру впрессовано уплотнение из резинового профиля (см. рис. 3в).

Боковые покрытия пола, как и волнообразный сиффон, изготовлены из эластичного материала, уложенного волнами, и стабилизирующих алюминиевых профилей. С помощью специальных профилей боковые покрытия крепятся к алюминиевым рамам внутреннего сиффона. В области сцепной рамы боковые покрытия каждой половины перехода соединяются лентой-липкой.

Благодаря секционному мостику (рис. 4) пассажиры и обслуживающий персонал могут свободно и безопасно передвигаться из одного вагона в другой. Мостик сконструирован так, что позволяет переходу в точности повторять движение вагонов относительно друг друга без возникновения зазоров в напольном покрытии.

Монтажный узел, представленный на рис. 4, состоит из самой половинки секционного мостика и салазок (ползунов), которые подвижно соединены друг с другом двумя штифтами. Каждый штифт зафиксирован крепежной шайбой и шплинтом. Половинка секционного мостика включает следующие компоненты: проходной элемент с элементами подвески, проходной элемент, элемент скольжения, две обрамляющие планки, пять проходных элементов и четыре скользящих элемента. Все они крепятся к секционному мостику (половинке) при помощи четырех винтов с цилиндрической головкой и втулок (см. рис. 4). Проходные элементы покрыты специальным противоскользящим покрытием. Комплект салазок состоит из самих салазок (ползуна), к которым шайбами и шплинтами крепятся два ролика, а также из полосы скольжения и двух пластин скольжения, которые закреплены заклепками.

В соответствии с особенностями конструкции отечественных пассажирских вагонов, нормативными требованиями к прочности кузова, а также с учетом условий эксплуатации, отличающихся в южных районах высокой температурной нагрузкой, и с учетом существенной ветровой нагрузки разработаны и согласованы с АО «ФПК» технические требования к УМВП производства фирмы HÜBNER (табл. 1).

Вагоны, оборудованные УМВП, оснащаются беззазорными сцепными устройствами [7] (рис. 5). Сцепное устройство пассажирских вагонов с УМВП включает в себя: БСУ-3, поглощающий аппарат, клин тягового хомута, расцепной привод и центрирующее устройство. Межвагонное БСУ-3 предназначено для использования на вагонах-сцепках и вагонах, эксплуатируемых на поездах постоянного формирования локомотивной тяги, а также на фирменных пассажирских поездах, сформированных из двухэтажных вагонов.

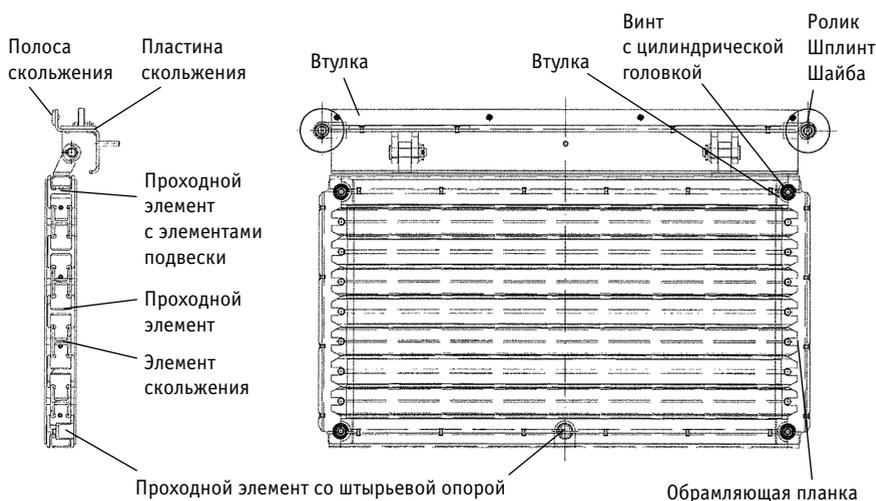


Рис. 4. Половинка секционного мостика в комплекте с салазками

Таблица 1

Технические требования к продукции

Показатель	Значение показателя
<i>Общие характеристики</i>	
Масса половины перехода, кг	180,6±10 %
Расстояние между торцевыми стенами двух сцепленных вагонов в свободном состоянии в зоне установки перехода, мм	776
Нагрузка на секционный мостик, кН/м ²	3, не более
Сосредоточенная нагрузка на переходной мостик, кН	1, не более
Шумопоглощение, дБ	32, не менее
Коэффициент теплопередачи оболочки, Вт/м ² К	3,15, не более
Номинальные размеры внутреннего сечения, мм:	
высота	1940
ширина	870
ширина на уровне секционного мостика	610
<i>Устойчивость к внешним воздействиям</i>	
Устойчивость к воздействию воды под давлением в соответствии с IEC 1133: время изменения давления с 4000 до 1000 Па, с	50, не менее
устойчивость к давлению, Па	±400
рабочие значения температуры, °С	От -50 до +80
<i>Требования к надежности</i>	
Средняя наработка на отказ, км	Не менее 450 000 (пробег до деповского ремонта)
Среднее время восстановления работоспособного состояния перехода при ремонте агрегатным методом специалистами, имеющими соответствующую квалификацию, ч	Не более 2
Полный средний срок службы, лет	Не менее 16
<i>Гарантия</i>	
Продавец гарантирует, что при производстве изделия были использованы высококачественные материалы. В гарантию также входит качество технического исполнения изделия	
Гарантийный срок изделия составляет 24 месяца или 450 000 км в зависимости от того, какое условие наступит прежде, с даты ввода в эксплуатацию изделия, но не более чем 27 месяцев с даты передачи изделия покупателю	



Рис. 5. Внешний вид беззазорного сцепного устройства в сцепленном состоянии

Поскольку вагоны с УМВП и БСУ-3 используются в общем вагонном парке АО «ФПК», рассмотрим различные варианты их оборудования сцепными и переходными устройствами в зависимости от условий эксплуатации (рис. 6). В составе поезда все сцепки одного исполнения должны быть направлены в одну сторону. При развороте вагона съемные части сцепок следует поменять местами. Ориентация направляющего конуса БСУ относительно первого и последнего вагона осуществляется в соответствии с рис. 6. Если необходимо сцепление со сцепкой типа СА-3, то БСУ оснащается съемным устройством — переходником (адаптером).

В зависимости от способа эксплуатации предусмотрены варианты оборудования концов вагона сцепными и переходными устройствами (табл. 2).

Рассмотрим более подробно все способы:

а) при эксплуатации вагона в составе ППФ в сцепе с обоими концами с аналогичными вагонами он оборудуется по обе стороны переходными и сцепными устройствами;

б) если вагон в составе ППФ является первым или последним, то он оборудуется с конца вагона, обращенного к локомотиву, или от состава сцепкой типа СА-3 с поглощающим аппаратом соответствующего исполнения и заглушкой торцевой двери;

в) если вагон отправляется в парк отстоя, на УМВП устанавливается заглушка;

г) при производстве маневровых работ (необходимость сцепления со сцепкой типа СА-3) БСУ-3 оснащается переходником;

д) в случае транспортирования одиночного вагона в аварийных ситуациях (необходимость сцепления со сцепкой типа СА-3) БСУ-3 оснащается переходником;

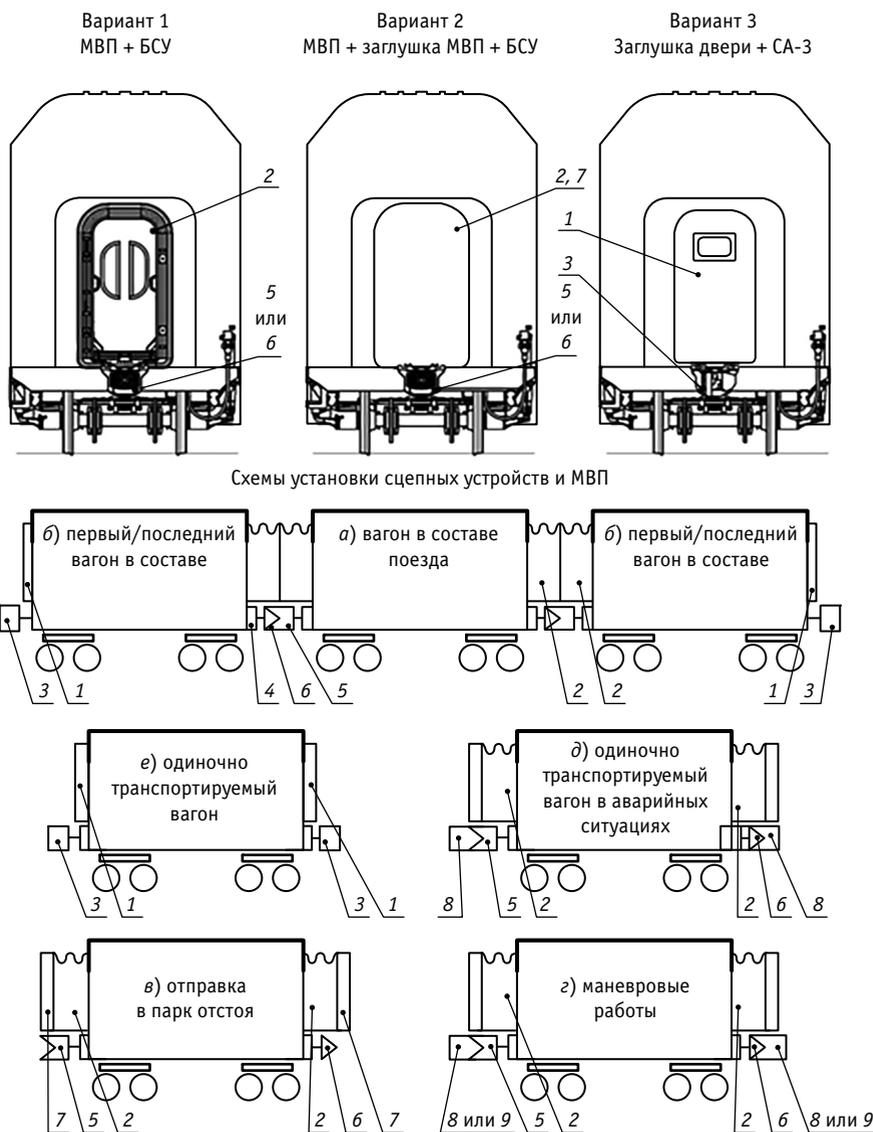


Рис. 6. Варианты оборудования вагона сцепными и переходными устройствами в зависимости от способа эксплуатации и транспортирования:

- 1 — заглушка торцевой двери; 2 — УМВП; 3 — автосцепка СА-3;
- 4 — центрирующая балка; 5 — сцепка 10185.61.10.000 (БСУ-3);
- 6 — сцепка 10185.61.12.000 (БСУ-3, условно показана ориентация направляющего конуса);
- 7 — заглушка УМВП; 8 — переходник; 9 — переходник облегченного типа

е) при транспортировании одиночного вагона он с обоих концов оборудуется сцепкой типа СА-3.

Чтобы не повредить сцепные рамы межвагонных переходов во время сцепления вагонов перед соединением сцепных устройств, половины межвагонных переходов должны быть поджаты к торцевой стене вагона фиксирующими тросами.

При всех переоборудованиях вагонов категорически запрещается расцепление сцепок БСУ-3 до расцепления межвагон-

ного перехода. Расцепление УМВП осуществляется только изнутри.

С начала эксплуатации двухэтажных вагонных сцепов (модельный ряд — 2019) и фирменных пассажирских поездов, сформированных из двухэтажных вагонов в октябре 2019 г., сотрудниками филиалов АО «ФПК» с привлечением АО НО «ТИВ» организовано наблюдение за техническим состоянием вагонов с УМВП в разных условиях эксплуатации с учетом температурной и ветровой нагрузки.

Таблица 2

Варианты оборудования вагона сцепными и переходными устройствами

Варианты эксплуатации вагона	Вариант оборудования торцов вагона (см. рис. 6)	
	Торец 1	Торец 2
а) в составе поезда постоянного формирования (ППФ)	Вариант 1	Вариант 1
б) первый или последний вагон в составе ППФ	Вариант 3: конец вагона, обращенный к локомотиву или от состава	Вариант 1
в) отправка в парк отстоя	Вариант 2	Вариант 2
г) маневровые работы	Вариант 1 + переходник: конец вагона, обращенный к локомотиву, + рукав с подвесом	Вариант 1
д) транспортирование одиночного вагона в аварийных ситуациях	Вариант 1 + переходник: конец вагона, обращенный к локомотиву, + рукав с подвесом	Вариант 1
е) транспортирование одиночного вагона	Вариант 3	Вариант 3

ВЫВОДЫ

1. Анализ работоспособности серийных переходных площадок баллонного типа показал, что эта конструкция не соответствует требованиям, предъявляемым к современным инновационным вагонам, и не отвечает требованиям Роспотребнадзора по созданию единого микроклимата и снижению уровня шума при открывании и закрывании тамбур-

ных дверей. В результате появилось направление по разработке и внедрению герметизированных упругих межвагонных переходов.

2. В АО «ФПК» совместно с ТМХ «Инжиниринг» были проанализированы зарубежные конструкции УМВП, которыми на первом этапе оснащались вагоны поездов постоянного формирования из двухэтажных вагонов и двухвагонных

сцепов. В результате разработаны технические требования к УМВП, учитывающие отечественную нормативную базу, требования к прочности, правила технической эксплуатации в разных климатических условиях, отличающихся в южных районах высокой температурной нагрузкой, обусловленной воздействием избыточной солнечной радиации, а также существенной ветровой нагрузкой на двухэтажные пассажирские вагоны.

3. Для сцепки новых вагонов с вагонами старых конструкций разработаны варианты оборудования инновационных вагонов сцепными и переходными устройствами в зависимости от способа эксплуатации и транспортирования.

4. После ввода в эксплуатацию двухэтажных вагонных сцепов и фирменных пассажирских поездов, сформированных из двухэтажных вагонов, сотрудниками филиалов АО «ФПК» совместно с представителями АО НО «ТИВ» организованы наблюдения, учитывающие температурную, ветровую нагрузку и другие факторы, влияющие на техническое состояние, несущую способность и эксплуатационные характеристики вагонов с УМВП.

Литература

1. Вагоны: Конструкция, теория, расчет / Л. А. Шадур, И. И. Челноков, Л. Н. Никольский [и др.] : под ред. Л. А. Шадура ; 3-е изд., перераб. и доп. Москва : Транспорт, 1980. 440 с.
2. Сорокина Е. В., Грибин В. А., Гурьянов К. П. Результаты испытаний вагонов модели 61-4514 на путях Египетской национальной железной дороги при опытно пробеге // Труды РГУПС. 2022. № 1 (58). С. 81–86. ISSN 1818-5509.
3. Самошкин С. Л., Морозов В. В., Виноградов А. А. Структура и задачи отраслевой службы надежности для освоения производства и эксплуатации пассажирских вагонов // Тяжелое машиностроение. 2000. № 9. С. 5–8. ISSN 1024-7106.
4. Плацкартный пассажирский вагон с новым интерьером. Оценка технических решений и показателей безопасности / А. С. Новохатский, А. Н. Скачков, О. С. Самошкин, С. Д. Коршунов // Железнодорожный транспорт. 2019. № 9. С. 52–55. ISSN 0044-4448.
5. Перспективный пассажирский подвижной состав // К. В. Бобрышев, Ю. В. Корнев, В. С. Покровский, О. С. Самошкин // Железнодорожный транспорт. 2015. № 7. С. 43–45. ISSN 0044-4448.
6. Поярков М. Г., Самошкин О. С. Двухвагонный сцеп пассажирских вагонов: технические решения и уровень комфорта пассажиров // Вагоны и вагонное хозяйство. 2022. № 1 (69). С. 35–38. ISSN 1817-6089.
7. Сорокина Е. В., Пискарев Н. С. Оценка эксплуатационных показателей межвагонного беззазорного сцепного устройства БСУ-ТМ 136 : материалы X Международной научно-практической конференции «Проблемы безопасности на транспорте». Гомель : БелГУТ, 2020. Ч. 5. С. 125–126.

References

1. Wagons. Design, theory, calculation [Vagony: Konstruktsiya, teoriya, raschet] / L. A. Shadur, I. I. Chelnokov, L. N. Nikol'skiy [et al.] : ed by L. A. Shadur ; 3rd ed. Moscow : Transport, 1980. 440 p.
2. Sorokina E. V., Gribin V. A., Guryanov K. P. Test results of the model 61-4514 wagon on the tracks of the egyptian national railway during the trial run [Rezultaty ispytaniy vagonov modeli 61-4514 na putyakh Egipt'skoy natsional'noy zheleznoy dorogi pri opytном probege] // Works of RGUPS. 2022. No. 1 (58). Pp. 81–86. ISSN 1818-5509.
3. Samoshkin S. L., Morozov V. V., Vinogradov A. A. Structure and tasks of branch reliability service for developing production and exploitation of passenger cars [Struktura i zadachi otraslevoy sluzhby nadezhnosti dlya osvoeniya proizvodstva i ekspluatatsii passazhirskikh vagonov] // Heavy machinery. 2000. No. 9. Pp. 5–8. ISSN 1024-7106.
4. Open-plan passenger car with new interior. Assessment of technical solutions and safety indicators [Platskartnyy passazhirskiy vagon s novym inter'ерom. Otsenka tekhnicheskikh resheniy i pokazateley bezopasnosti] / A. S. Novokhatskiy, A. N. Skachkov, O. S. Samoshkin, S. D. Korshunov // Railway Transport. 2019. No. 9. Pp. 52–55. ISSN 0044-4448.
5. Prospective passenger rolling stock [Perspektivnyy passazhirskiy podvizhnoy sostav] / K. V. Bobryshev, Yu. V. Kornev, V. S. Pokrovskiy, O. S. Samoshkin // Railway Transport. 2015. No. 7. Pp. 43–45. ISSN 0044-4448.
6. Poyarkov M. G., Samoshkin O. S. Two-car coupler of passenger cars: technical solutions and level of comfort for passengers [Dvukhvaгонnyy stsep passazhirskikh vagonov: tekhnicheskie resheniya i uroven' komforta passazhirov] // Railway Cars and Carriage Equipment. 2022. No. 1 (69). Pp. 35–38. ISSN 1817-6089.
7. Sorokina E. V., Piskarev N. S. Assessment of operational indicators of gangway gapless grab bar BSU-TM 136 [Otsenka ekspluatatsionnykh pokazateley mezhvagonnogo bezzazornogo stsepnogo ustroystva BSU-TM 136] : proceedings of 10th International scientific and practical conference «Safety problems on transport». Gomel : BSUT, 2020. Part 5. Pp. 125–126.

УДК 629.423:004.4+06

Ольга Геннадьевна Ведерникова, кандидат технических наук, доцент кафедры «Вычислительная техника и автоматизированные системы управления» Ростовского государственного университета путей сообщения (РГУПС), Ростов-на-Дону, Россия,

Олеся Владимировна Игнатьева, кандидат технических наук, доцент, заведующая кафедрой «Вычислительная техника и автоматизированные системы управления» Ростовского государственного университета путей сообщения (РГУПС), Ростов-на-Дону, Россия

РАЗРАБОТКА ИНТЕРАКТИВНОГО ВИРТУАЛЬНОГО ТРЕНАЖЕРА ОСМОТРИКА ВАГОНОВ В СРЕДЕ UNITY НА ПЛАТФОРМЕ STEAMVR

Olga Gennadyevna Vedernikova, PhD in Engineering, Associated Professor, Computer Engineering and Automated Control Systems Department, Rostov State Transport University (RSTU), Rostov-on-Don, Russia,

Olesya Vladimirovna Ignatyeva, PhD in Engineering, Associated Professor, Head of Computer Engineering and Automated Control Systems Department, Rostov State Transport University (RSTU), Rostov-on-Don, Russia

Development of interactive virtual trainer of car inspector in Unity environment on SteamVR platform

Аннотация

Представлен интерактивный тренажер осмотращика вагонов (на примере четырехосного полувагона), использующий возможности виртуальной реальности. Тренажер позволяет выбирать режим осмотра (тренировка или тестирование), а также изучать устройство конструкции вагона и отрабатывать навыки осмотра. Разработка виртуальной реальности выполнялась в Unity при помощи Virtual Samples на платформе SteamVR с использованием VR-шлемов. Трехмерные модели созданы в среде Blender, последующее текстурирование — в программе Substance Painter. При реализации тренажера разработан скрипт для подсветки и мигания изучаемой детали с использованием динамического материала, а также шейдеры двусторонних материалов.

Ключевые слова: виртуальная реальность, интерактивный тренажер, осмотрщик вагонов, четырехосный полувагон, шейдер, скрипт, корутин, префаб.

Abstract

The paper presents an interactive trainer of a car inspector (on the example of a four-axle open-box car) that uses possibilities of virtual reality. The trainer allows selecting an overview mode (training or testing) and studying car design and training inspection skills. Development of virtual reality was carried out in Unity with the use of Virtual Samples on Steam VR platform with the use of VR-helmets. 3-D models are created in Blender environment, subsequent texturing is made in Substance Painter. At realization of a trainer the authors have developed a script for lighting and blinking of a studied part with the use of a dynamic material and shaders for two-sided materials.

Keywords: virtual reality, interactive trainer, car inspector, four-axle open-box car, shader, script, coroutine, prefab.

DOI: 10.20291/1815-9400-2023-1-26-32

ВВЕДЕНИЕ

Интерактивные виртуальные тренажеры становятся все более востребованными при профессиональной подготовке специалистов. Технология виртуальной реальности (VR) благодаря своим тактильным и визуальным особенностям позволяет создавать максимально приближенную к реальным условиям обучающую систему. Применительно к железнодорожному транспорту использование компьютерного моделирования дает возможность рассматривать изучаемые процессы без организационных трудностей, таких, например, как необходимость изготавливать и поставлять в учебное заведение макеты механической части вагонов, объясняющие функционирование и взаимосвязи основных узлов конструкции.

В статье представлен интерактивный виртуальный тренажер осмотращика вагонов на примере четырехосного полувагона, предназначенный для учебного процесса либо для тренингов на предприятии и помогающий отрабатывать навыки без существенных затрат времени.

Тренажер выполняет следующие функции:
предоставляет пользовательское окружение в виде соответствующей локации в среде виртуальной реальности;
предоставляет пользовательский интерфейс для управления процессом обучения и для настройки режимов тренировки;
дает возможность изучать устройство конструкции вагона на примере четырехосного полувагона.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Разработка проекта с использованием виртуальной и дополненной реальности выполнена в редакторе Unity при помощи Virtual Samples. Платформа SteamVR позволяет создавать проекты с использованием VR-шлемов или очков виртуальной реальности [1, 2]. Трехмерные модели для тренажера созданы в среде Blender, их текстурирование — в программе Substance Painter.

Так как проект симулирует работу осмотрщика вагонов, в качестве окружения для игрока создано небольшое депо. Игрок появляется в середине локации, недалеко от въезда в депо (рис. 1). В локации — три железнодорожных пути, на каждом из которых находится четырехосный полувагон [3].

Далее начинается осмотр части вагона. Для этого необходимо правой рукой, в которой находится фонарь, осветить выделенную для осмотра часть вагона, удерживать фонарь в таком состоянии некоторое время, после чего произойдет переход на следующую часть вагона (рис. 2).

Затем необходимо произвести спуск тормозов (рис. 3), для этого нужно потянуть свободной (левой) рукой за спусковой клапан.

После этого следует этап второй позиции осмотра — работа с инструментами. Первый инструмент — ломик Гладуна (рис. 4). Чтобы начать с ним работу, необходимо выбрать его свободной рукой на поясе инструментов, а затем поднести к выделенному объекту.

Следующий инструмент — метр. Принцип действия тот же, что и с ломиком Гладуна. Третий инструмент — молоток (рис. 5), его тоже нужно выбрать свободной рукой на поясе инструментов, а затем стукнуть по колесной паре, чтобы услышать звук удара. Последний инструмент — электронный термометр: его также выбирают свободной рукой на поясе инструментов, наводят на элемент, необходимый для проверки температуры, и нажимают на специальную кнопку.

Изучаемый с помощью интерактивного тренажера четырехосный полувагон имеет две двухосные тележки. Моделирование двухосной тележки — самый трудоемкий процесс, поскольку требуется воспроизвести конструкцию не только рамы, но и наиболее важных узлов, таких как рессорное подвешивание, рычажная тормозная передача и др. Для моделирования использовались референсные изображения — чертежи, содержащие наиболее полные данные о размерах, положении и особенностях деталей (рис. 6), а также методические материалы с исчерпывающей информацией о размерах и особенностях каждого из узлов. Вид готовой модели тележки, созданной в программе Blender3D, представлен на рис. 7.



Рис. 1. Стартовая часть приложения



Рис. 2. Осмотр части вагона

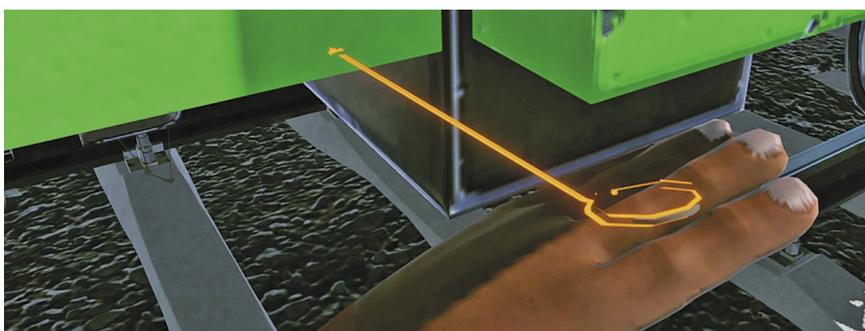


Рис. 3. Спуск тормозов



Рис. 4. Работа с ломиком Гладуна

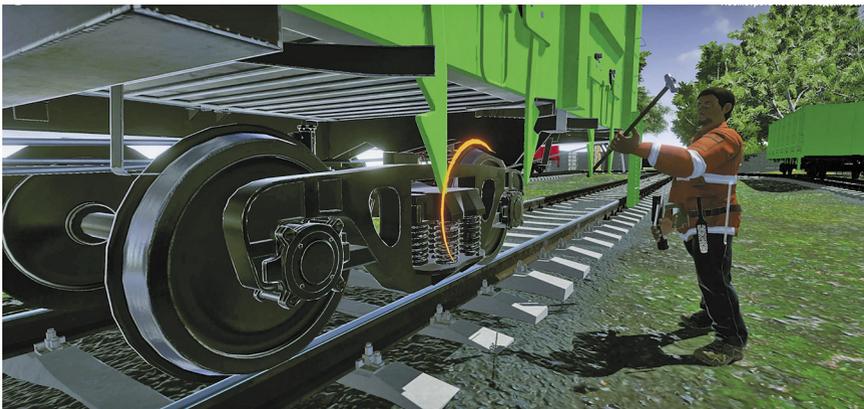


Рис. 5. Работа с молотком

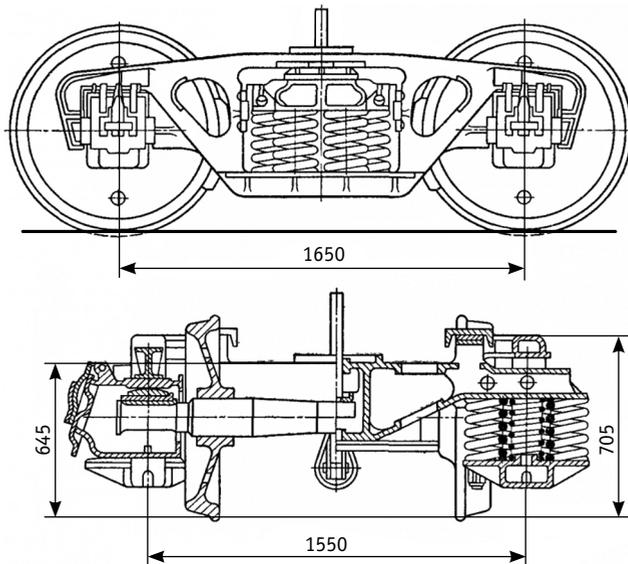


Рис. 6. Схематичный чертеж двухосной тележки

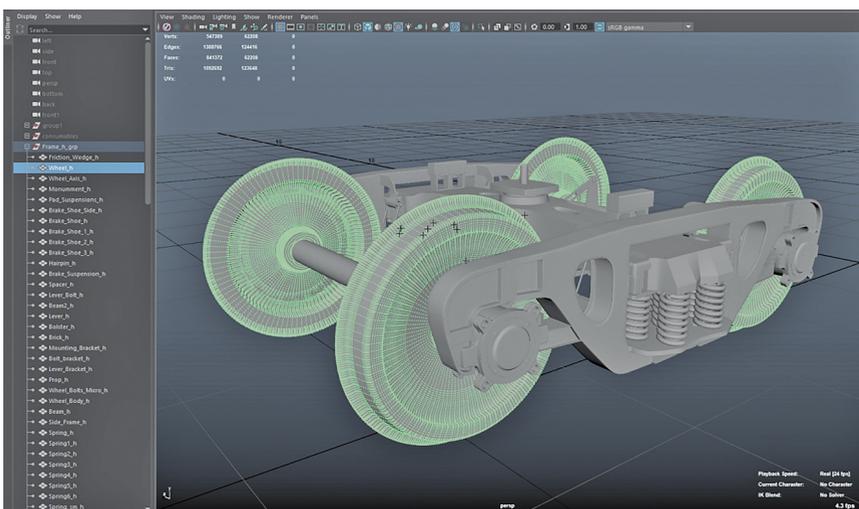


Рис. 7. Вид готовой модели тележки в программе Blender3D

Для финального этапа подготовки моделей — текстурирования — выбран пакет Substance Painter. Процесс текстурирования включает в себя множество этапов: UV-развертывание, настройку текстурных координат, редактирование самого изображения, создание карт нормалей и т.д. В настоящее время самое эффективное PBR-текстурирование — создание набора текстур, включающих в себя карту нормалей, карту шероховатости, карту альбедо [4, 5].

Для достижения качественной визуализации модели тележки выбраны и настроены несколько материалов. Например, учтено, что один и тот же металл на поверхностях качения блестит сильнее, чем на других деталях. Поэтому материал на поверхностях качения сделан более блестящим, а на деталях, подверженных деформации, таких как пружины, менее гладким и местами поврежденным (рис. 8).

Полный вид смоделированного четырехосного полувагона на двухосных тележках представлен на рис. 9

Если UV-развертка и настройка текстурных координат происходит на этапе создания модели, то выбор изображения, его подгонка и обработка выполняются в программах, подобных Substance Painter.

Следующий этап разработки проекта — написание скриптов, позволяющих создать взаимодействие пользователя и модели в виртуальной реальности. Среда разработки Unity дает возможность создавать VR-приложения и имеет в своем арсенале примеры скриптов для корректной работы с VR [6]. Для большей интерактивности и наглядности варианты взаимодействия с деталями модели тележки были реализованы путем касания. Скрипт, который отвечает за подсветку и мигание интересующей детали, создан полностью самостоятельно, так как по умолчанию среда Unity не предлагает никаких предустановленных динамических материалов, в отличие от игрового движка Unreal Engine, где существует вариант создания динамического материала без написания управляющих скриптов. В качестве стандартных же моделей предлагаются только такие примитивы, как куб, сфера, плоскость и др.

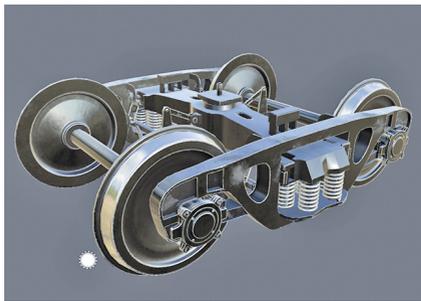


Рис. 8. Готовая модель тележки с нанесенными на нее текстурами, импортированная в Unity3D

Для создания динамического материала с момента старта приложения в скрипте запускался корутин¹, а из цвета материала был выделен в отдельное поле альфа-элемент, отвечающий за прозрачность. На рис. 10 представлен фрагмент разработанного кода для динамического материала с использованием корутинов. В Unity корутины регистрируются и выполняются до первого yield при помощи метода StartCoroutine.

При запуске корутина переменная, ответственная за альфа-канал, начинает уменьшать свое значение с течением времени, а по достижении нуля — увеличиваться. Таким образом была решена проблема отсутствия динамического материала, который необходим для выделения нужной детали.

Так как в Unity по умолчанию не встроены двусторонние материалы и шейдеры² для отображения нормалей в зависимости от угла зрения, то для решения этой проблемы был разработан специальный шейдер на языке GLSL.

Пользовательский интерфейс создавался с помощью элемента PlayerMenu. Для позиционирования элементов меню используется компонент Rect Transform. Если элемент интерфейса является потомком компоновочной группы (Layout Group), тогда он будет автоматически позиционирован там, где нужно, без необходимости делать это вручную. Элементы меню могут иметь свойство растягиваться, если задать необходимые значения. Когда параметры anchorMin и anchorMax в настройках компонента Rect Transform не равны между собой, как показано на рис. 11, то элемент будет растягиваться.

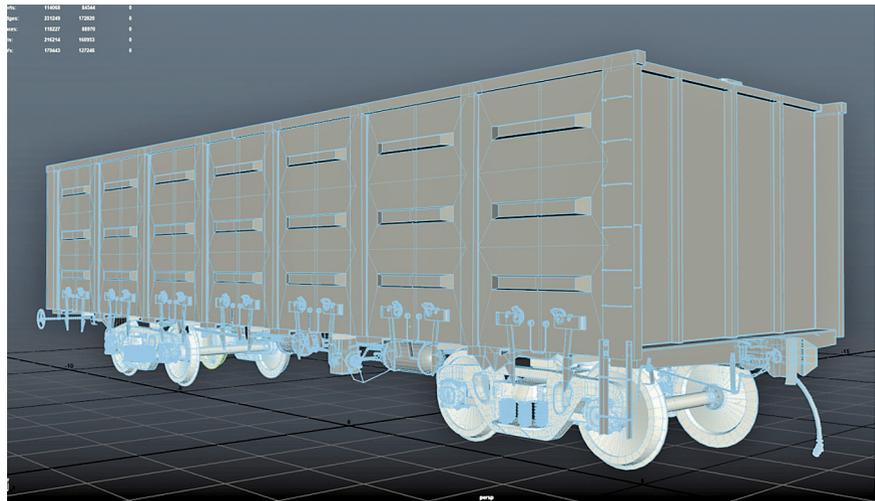


Рис. 9. Модель четырёхосного полувагона

```

void Awake()
{
    mats = GetComponentInChildren<MeshCollider>();
    Pieces = new GameObject[mats.Length];
    foreach(var index in mats)
    {
        Pieces[NumberOfPieces] = mats[NumberOfPieces].gameObject;
        NumberOfPieces++;
    }
}

privatr IEnumerator HighlightingCoroutine()
{
    while (true)
    {
        Pieces[rndItem].GetComponent<MeshRenderer>().material.SetColor
        ("_EmissionColor", newColor(0, clrAm, clrAm, 1));
        clrAm+=dir* dAlpha;

        if (clrAm>=1.0f)
        {
            clrAm=1.0f;
            dir=-1;
        }
        if (clrAm<=0)
        {
            clrAm=0.0f;
            dir=1;
        }
        yield return new WaitForSeconds(0.04f);
    }
}
    
```

Рис. 10. Фрагмент скрипта, управляющего динамическим материалом Highlighting

¹Корутины — система псевдопараллельных потоков в Unity или простые C# итераторы, возвращающие IEnumerator и использующие ключевое слово yield.

²Шейдер — программа-«затенитель», названа так, потому что часто используется для создания эффектов освещения и затенения, поскольку изображение фактуры и шероховатости материала — это в принципе смена освещенных и затененных пикселей. Шейдеры используются и для создания других спецэффектов, по сути это программа, дающая процессору команду, как визуализировать каждый пиксел на экране.

Для того чтобы сделать Rect Transform нерастяжимым, необходимо использовать свойства `anchoredPosition` и `sizeDelta`. Свойство `anchoredPosition` задает начальную позицию компонента, а свойство `sizeDelta` — значение размера компонента с отсутствием возможности растяжения.

Когда необходимо создать элемент Rect Transform с возможностью растяжения, то проще задать координаты позиции элемента, используя свойства `offsetMin` и `offsetMax`. Свойство `offsetMin` определяет координаты левого нижнего угла прямоугольника относительно окна приложения, а свойство `offsetMax` — координаты правого верхнего угла прямоугольника относительно окна приложения.

Так как необходимо устанавливать значительное количество элементов интерфейса, для ускорения процесса был разработан префаб³ элемента интерфейса, который далее используется многократно для инсталляции в меню. Для этого необходимо настроить один элемент интерфейса в сцене, затем перетащить его в Project View, чтобы конвертировать в префаб. Благодаря этому разработка элементов интерфейса и их последующая расстановка были в разы быстрее, чем если бы каждый раз приходилось настраивать элемент отдельно. К примеру, префабом для кнопки использовался игровой объект (Game Object) с дочерним объектом Image и с Button-компонентом, а также дочерний игровой объект с Text-компонентом. Далее их можно настроить так, чтобы они отличались между собой в зависимости от того, что в данный момент нужно сделать.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Запуск приложения осуществляется с рабочего стола при помощи соответствующего ярлыка, а в случае с операционной системой Linux есть возможность реализации автозапуска.

После старта приложения персонаж появляется недалеко от въезда в депо рядом с четырехосным полувагоном. На большом экране перед ним возникает меню, через которое организовано взаимодействие с игровой средой (рис. 12).

Из-за особенностей отображения контента в шлеме виртуальной реальности было решено сделать одну панель интерфейса, а не отдельные панели перед каждым глазом. Разработанная панель интерфейса имеет глобальные координаты с расположенными на ней элементами, такими как счетчик времени, подсказки с названиями деталей и т.д. Префабы элементов интерфейса инстанцируются с использованием метода `Instantiate`. Назначение родительского элемента в качестве вставляемого элемента интерфейса производилось с использованием метода `Transform.SetParent`, при этом значение параметра `worldPositionStays` устанавливалось `false`.

Высота и угол наклона шлема полностью отслеживаются датчиками, поэтому, как только пользователь надевает шлем, высота камеры в сцене устанавливается приблизительно на уровне глаз человека, т.е. на расстоянии от пола до глаз.

Все действия с пунктами меню выполняются путем непосредственного касания контроллером. Сделано это для того, чтобы меню ощущалось частью виртуального мира и усиливало эффект погружения. Все касания любого интерактивного элемента происходят с тактильной отдачей контроллеров, независимо от того, пункт меню это или деталь тележки, которая,

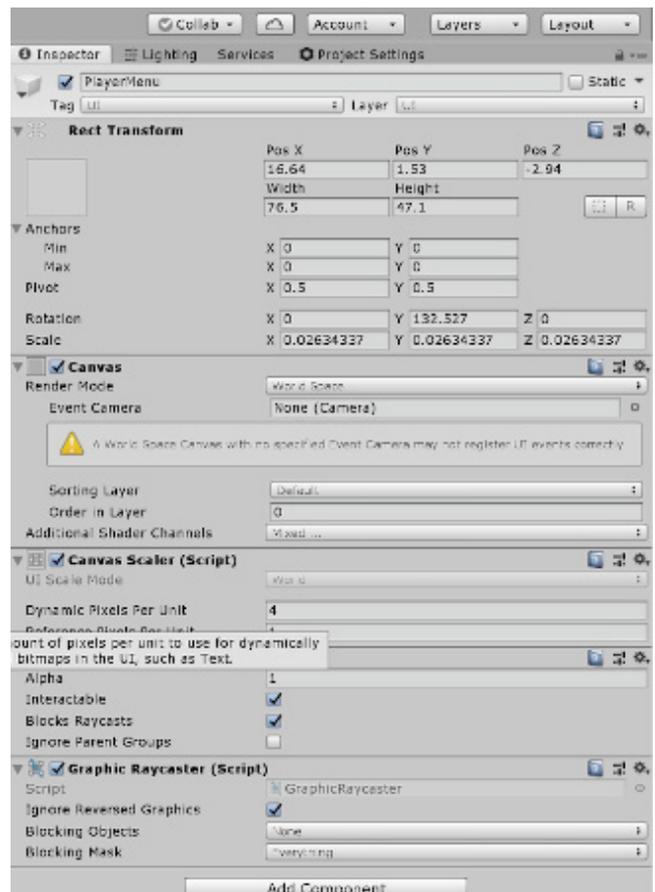


Рис. 11. Параметры элемента PlayerMenu в окне редактора



Рис. 12. Пользовательское меню на экране

в свою очередь, подсвечивается. При касании и взятии в руку любого элемента тележки пользователь видит название этого элемента (рис. 13).

Модели контроллеров заменены на тактильные перчатки, которые также усиливают погружение человека в виртуальную среду.

³Префаб — шаблон объекта, который можно многократно использовать в сценах и различным образом настраивать.

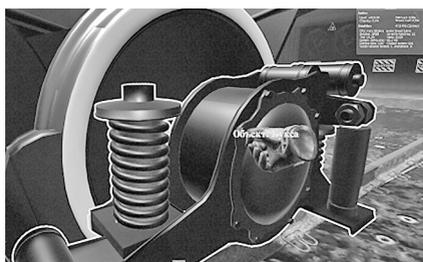


Рис. 13. Пример взаимодействия пользователя с элементом тележки

Как уже упоминалось, каждый элемент, составляющий тележку, интерактивен. В меню, где происходит выбор режимов, находится кнопка «Отмена», которая отменяет все действия пользователя с тележкой, возвращая систему к первоначальному состоянию. Эта функция очень полезна при большом количестве пользователей и позволяет не перезапускать приложение при смене действующего лица или просто начать осмотр и разборки заново.

Когда пользователь надевает шлем виртуальной реальности, на экране монитора/телевизора дублируется изображение из шлема. Все, что делает пользователь (обучающийся), комментируется преподавателем, от него же поступают вопросы и задания во время выполнения свободного осмотра: «Как называется эта деталь?», «Выберите, пожалуйста, один из элементов подвески». По завершении тестирования на усмотрение преподавателя выставляется оценка, зависящая от правильности выполнения задания и затраченного времени. Один из вариантов использования тренажера — лекционное занятие, при этом тренажер выступает в роли методического аудиопособия.

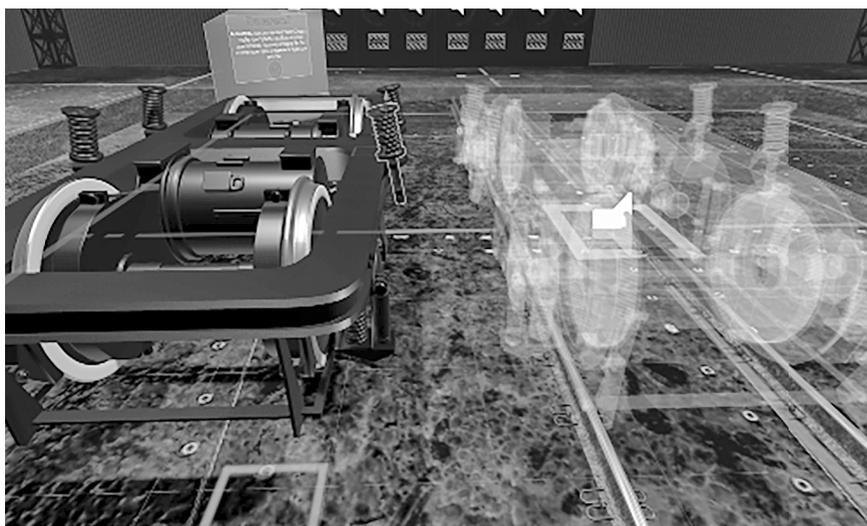


Рис. 14. Демонстрация процесса разработки системы подсказок

В дальнейшем планируется усовершенствовать тренажер: добавить возможность подсчета ошибок, а также ввести систему подсказок, которая будет помогать обучающимся в сложных ситуациях (рис. 14).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленный интерактивный виртуальный тренажер осматривателя вагонов позволяет обучающимся познакомиться с конструкцией четырехосного полувагона, не покидая учебное заведение. Для реализации тренажера создана достаточно подробная 3D-модель двухосной тележки. Используя язык написания шейдеров GLSL, виртуальная реальность разработана в среде Unity3D, созданы 3D-модели, начиная от моделирования и до импортирования, а также их настройки в игровых движках. При разработке тренажера

использованы пять различных программ, с помощью которых создавались текстуры, модели, реалистичные материалы и виртуальная реальность.

Вместе с тем реализованный проект не является финальной версией, планируется его усовершенствование, в частности по использованию не одного шлема, а двух и более, что позволит расширить функционал и тестировать одновременно несколько человек. Кроме того, тренажер может не ограничиваться работой со шлемом HTC Vive, поскольку SteamVR позволяет пользоваться также шлемом Oculus Rift, Lenovo Explorer. Для большей кастомизации предполагается добавить несколько моделей тактильных перчаток вместо одной. Плюс планируется ввести возможность подсчета ошибок, а также создать систему подсказок для помощи учащимся.

Литература

1. Торн А. Искусство создания сценариев в Unity. Москва : ДМК, 2016. 360 с.
2. An Approach to Testing the Hardware Modules of Locomotive Driver Console Simulator / A. V. Chernov, D. N. Chupiy, A. A. Alexandrov, A. M. Miroshnikov // Proceedings of 2018 IEEE East-West Design and Test Symposium, 2018. С. 8524765.
3. Юренко И. К., Шепилова Е. Г., Гречук И. А. Совершенствование бортовых систем управления локомотивов на базе технических средств тренажеро-моделирующих комплексов // Инженерный вестник Дона. 2014. № 2. ISSN 2073-8633. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n2y2014/2452.

References

1. Thorn A. Mastering Unity Scripting [Iskusstvo sozdaniya stsensariyev v Unity]. Moscow : DMK, 2016. 360 p.
2. An Approach to Testing the Hardware Modules of Locomotive Driver Console Simulator / A. V. Chernov, D. N. Chupiy, A. A. Alexandrov, A. M. Miroshnikov // Proceedings of 2018 IEEE East-West Design and Test Symposium, 2018. С. 8524765.
3. Yurenko I. K., Shepilova E. G., Grechuk I. A. Improvement of on-board control systems of locomotives on the basis of technical means of trainer-modeling complexes [Sovershenstvovaniye bortovykh sistem upravleniya lokomotivov na baze tekhnicheskikh sredstv trenazhero-modeliruyushhikh kompleksov] // Engineering Journal of Don. 2014. No. 2. ISSN 2073-8633. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n2y2014/2452.

4. Ведерникова О. Г., Москат Н. А. Расширение и использование редактора визуального программирования для разработки виртуальных тренажеров // Инженерный вестник Дона. 2021. № 1. ISSN 2073-8633. URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2021/6783>.
5. Ведерникова О. Г., Игнатьева О. В. Сравнение подхода классического программирования и визуального программирования при разработке шейдеров исчезновения // Транспорт: наука, образование, производство («Транспорт-2020»). Технические науки. Ростов-на-Дону : Изд-во РГУПС, 2020. С. 43–48.
6. Ведерникова О. Г. Создание начальной популяции в генетическом алгоритме решения задач управления транспортом // Транспорт Урала. 2016. № 2 (49). С. 30–33. DOI: 10.20291/1815-9400-2016-2-30-33. ISSN 1815-9400.

4. Vedernikova O. G., Moskat N. A. Dynamic norms of random and directed mutations in the genetic algorithm [Rasshirenje i ispol'zovanie redakto-ra vizual'nogo programmirovaniya dlya razrabotki virtual'nykh trenazhe-rov] // Engineering Journal of Don. 2021. No. 1. ISSN 2073-8633. URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2021/6783>.
5. Vedernikova O. G., Ignatieva O. V. Comparison of the classical program-ming approach and visual programming during the development of dis-appearence shaders [Sravnenie podkhoda klassicheskogo programmirova-niya i vizual'nogo programmirovaniya pri razrabotke sheyдеров ischezno-veniya] // Transport: science, education, production («Transport-2020»). Technical sciences. Rostov-on-Don: Publishing House of RSTU, 2020. Pp. 43–47.
6. Vedernikova O. G. Creation of initial population in a genetic algorithm for solving transport management problems [Sozdanie nachal'noy populyatsii v geneticheskom algoritme resheniya zadach upravleniya transportom] // Transport of the Urals. 2016. No. 2 (49). Pp. 30–33. DOI: 10.20291/1815-9400-2016-2-30-33. ISSN 1815-9400.

Объем статьи 0,7 авторских листа

УДК 656.225

Андрей Федорович Бородин, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Управление эксплуатационной работой и безопасностью на транспорте» Российского университета транспорта РУТ (МИИТ), Москва, Россия,

Виталий Владимирович Панин, кандидат технических наук, доцент, заместитель генерального директора АО «Институт экономики и развития транспорта» (АО «ИЭРТ»), Москва, Россия,

Евгения Сергеевна Максимова, кандидат технических наук, доцент, первый заместитель директора Института управления и цифровых технологий Российского университета транспорта РУТ (МИИТ), Москва, Россия,

Евгений Александрович Лаханкин, заведующий отделением взаимодействия транспортных систем АО «Институт экономики и развития транспорта» (АО «ИЭРТ»), Москва, Россия

МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К ОРГАНИЗАЦИИ ПЕРЕВОЗОЧНОГО ПРОЦЕССА НА ОСНОВЕ ТЕХНИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

Andrey Fedorovich Borodin, DSc in Engineering, Professor, Head of Control of Operations and Safety on Transport Department, Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia,

Vitaliy Vladimirovich Panin, PhD in Engineering, Associate Professor, Deputy General Director, JSC «Institute of Economics and Development of Transport» (JSC «IEDT»), Moscow, Russia,

Evgeniya Sergeevna Maximova, PhD in Engineering, Associate Professor, First Deputy Director of the Institute of Control and Digital Technologies, Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia,

Evgeniy Alexandrovich Lakhankin, Head of Division of Transportation Systems Interaction, JSC «Institute of Economics and Development of Transport» (JSC «IEDT»), Moscow, Russia

Methodological approaches to organization of transportation process on the basis of technical and technological parameters

Аннотация

В условиях все возрастающего увеличения загруженности железных дорог и дефицита инвестиций первостепенное значение для обеспечения устойчивой эксплуатационной работы приобретают управленческие резервы, основанные на оценке технико-технологических параметров организации перевозочного процесса с учетом ресурсов инфраструктуры, подвижного состава, грузоотправителей и грузополучателей, а также объемов ремонтных и строительно-монтажных работ. В статье представлены результаты разработки технико-технологических параметров управления перевозочным процессом на укрупненных направлениях сети.

Ключевые слова: полигон управления перевозочным процессом, сквозные принципы, полигонные технологии, ресурсы инфраструктуры, надежность, перевозочный процесс, риски.

Abstract

In conditions of growing loading of railways and shortage of investments management reserves based on assessment of technical and technological parameters of organization of transportation process with the consideration for resources of infrastructure, rolling stock, consignors, consignees and volumes of repairs and construction works become of paramount significance for provision of stable operation. The paper presents results of development of technical and technological parameters for operations control on enlarged network lines.

Keywords: operations control polygon, cross-cutting principles, polygon technologies, infrastructure resources, reliability, transportation process, risks.

DOI: 10.20291/1815-9400-2023-1-33-37

Текущая ситуация в транспортной отрасли характеризуется большими изменениями экономической конъюнктуры, преобразованиями структуры и направления следования грузо- и вагонопотоков. Адаптация рынка сопровождается значительным увеличением нагрузки на существующие инфраструктурные мощности, в том числе в связи с заложенными в государственных программах ориентирами развития и ростом объемов грузовых железнодорожных перевозок. Для устойчивой работы транспортного комплекса необходимо согласование и сбалансирование всего многообразия интересов всех участников перевозочного процесса, в том числе ресурсов инфраструктуры, подвижного состава, грузоотправителей и грузополучателей, а также объемов ремонтных и строительно-монтажных работ.

В связи с этим для повышения операционной эффективности и поиска рационального соотношения между задействованными ресурсами и конечными результатами производственной деятельности требуется разработка единых методических подходов к организации перевозочного процесса на основе технико-технологических параметров [1].

Ключевой проблемой на железнодорожном транспорте является трудность выбора технологически и экономически обоснованных решений исходя из сложившейся эксплуатационной обстановки, неоднозначности объемов работы и достоверности информационных потоков [2]. Успешное управление

перевозочным процессом неразрывно связано с наличием своевременной информации о предстоящих событиях, в том числе информации от грузоотправителей и грузополучателей. Чем выше уровень качества планирования и контроля, тем меньше реальных резервов требуется для обеспечения необходимой надежности работы транспортной системы.

Роль аналитических моделей в поддержке принятия управленческих решений приобретает новое значение. В трудах ряда авторов [3–5] рассматриваются существующие оптимизационные модели для железнодорожного транспорта. Роль каждого класса моделей обсуждается в связи с его функциональными возможностями в общей деятельности по планированию эксплуатационной работы железных дорог. Методы моделирования и управления транспортными потоками в зависимости от сложившейся эксплуатационной обстановки повышают надежность и качество принимаемых решений [6–8].

Чтобы уйти от идеологии управления перевозочным процессом, основанной на отчетных данных прошлых периодов, информации о текущем состоянии транспортной системы на начало расчетного периода и вероятностных аналитических оценках, необходимо использовать оптимизационные модели, которые позволяют прогнозировать развитие эксплуатационной обстановки, выявлять узкие места и предстоящие затруднения в работе, своевременно принимать управляющие решения. Это требует радикальных научных разработок, основанных на информационном подходе и предполагающих использование интеллектуальных систем управления и координации транспортных процессов [9, 10].

На этапе внедрения сквозных принципов управления перевозочным процессом возникает необходимость в рациональных решениях повышения эффективности использования железнодорожной инфраструктуры [5]. Это мотивирует на поиск технологических решений, позволяющих оптимизировать использование существующей инфраструктуры и подвижного состава для повышения показателей основной производственной деятельности. В данном случае для реализации требуемых функциональных возможностей проактивного управления необходима разработка модели организации перевозочного процесса на основе технико-технологических параметров для всех его участников.

В то же время в контексте применения новой полигонной модели необходимо скорректировать существующую систему эксплуатационных показателей железных дорог, а также сформировать методологические подходы к экономической оценке последствий устранения или снижения потерь, вызванных нерациональным использованием имеющихся ресурсов. Система управления полигоном должна предполагать качественный переход от классических принципов автоматизированного управления движением к интеллектуализации технологических процессов, цифровой инфраструктурной карте и организации транспортного процесса в автоматическом режиме [2, 11].

Трансформация модели организации и управления эксплуатационной работой на сети железных дорог ОАО «РЖД» и переход на сквозные принципы вызвали необходимость в разработке методических подходов к организации перевозочного процесса на основе технико-технологических параметров, в том числе:

обоснования оптимального порядка продвижения вагонопотоков в увязке с технологическими процессами работы железнодорожных путей необщего пользования (порты, паромные переправы, погрузо-выгрузочные производственные комплексы);

формирования системы анализа среднесуточного поступления и сдачи груженых и порожних вагонов по межполигонным, внутридорожным и внешним стыковым пунктам с дифференциацией по категориям (груз портовой, транзитный, местный);

формирования (определения) целевого состояния управления эксплуатационной работой и параметров инфраструктуры в направлении портов;

актуализации системы количественных и качественных показателей эксплуатационной работы.

Эксплуатационная работа в условиях полигонных технологических и организационных основ перевозочного процесса — плана формирования и графика движения поездов, внедрения комплексной интегрированной технологии управления движением грузовых поездов по расписанию, расширения границ оперативного планирования поездной работы и увеличения полигона следования транзитных поездов без технологических стоянок [12, 13]. Управление эксплуатационной работой осуществляется с учетом сквозных принципов на укрупненных направлениях сети железных дорог ОАО «РЖД» с возможностью концентрации диспетчерского управления и инженерно-технического персонала и с учетом экстерриториальных подходов.

В ходе годового и месячного планирования производственной деятельности ОАО «РЖД» решается задача компромиссного управления по обеспечению, с одной стороны, предъявляемых объемов грузовых и пассажирских перевозок, а с другой стороны, необходимого объема реконструктивных работ, направленных на развитие инфраструктуры и ремонтных работ по обеспечению необходимого коэффициента ее готовности. От величины объемов ремонтных и реконструктивных работ W зависят (рис. 1):

потери объемов перевозок из-за закрытия устройств при ведении работ $\Delta U'$;

риски неосвоения объемов перевозок из-за несвоевременного проведения этих работ $\Delta U''$.

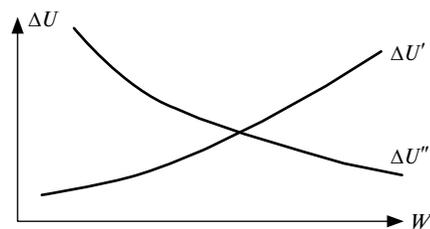


Рис. 1. Зависимости составляющих изменения объемов перевозок от объема ремонтных и реконструктивных работ

Потребные инфраструктурные и перевозочные ресурсы R увеличиваются с ростом разброса параметров организации перевозок, в общем виде характеризуемых среднеквадратичны-

ми отклонениями σ_n (рис. 2). При этом уменьшение доступных ресурсов вызывает снижение надежности перевозочного процесса H (на рис. 2 $H_1 > H_2 > H_3$). Разработанные технико-технологические модели содержат комплекс решений, включающих совокупность вектор-функций параметров технологии X , системы планирования S , системы управления G , которые при их совместном действии обеспечивают уменьшение разброса параметров организации перевозок $F(X, S, G) = \sigma_n \rightarrow \min$ с проверкой выполнения ограничений на обеспечение заданных объемов перевозок $U \geq U^*$, на расходы $Z \leq Z^*$ и на допустимый уровень надежности перевозочного процесса $H^* \leq H \leq 1$.

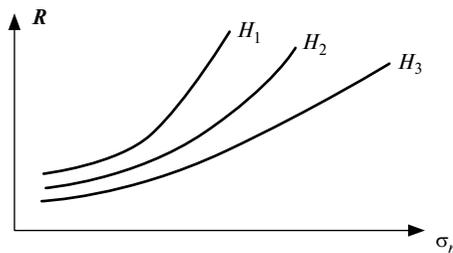


Рис. 2. Зависимости потребных ресурсов и надежности перевозочного процесса от разброса параметров организации перевозок

При реализации перевозочного процесса на основе технико-технологических параметров возникают технологические, а вместе с ними и экономические эффекты за счет следующих факторов:

снижения времени нахождения составов (поездов) и локомотивов на технических станциях (сортировочных и участковых);

уменьшения количества поездов, временно отставленных от движения, в связи с использованием логистических технологий при регулировании погрузки и продвижения поездов в адрес морских портов на полигоне в целом;

снижения рисков нарушения сроков доставки грузов;

увеличения участковой скорости вследствие единого управления предоставлением «окон» по технологии «в едином створе» на полигоне в целом;

увеличения участковой скорости в результате повышения ритмичности и равномерности движения поездов;

снижения пробега локомотивов в одиночном следовании в связи с расширением «полигона планирования».

Для успешной реализации единых методических подходов должна быть достигнута организационно-управленческая и технологическая готовность, а критерии оптимизации эксплуатационной работы должны учитывать не только интересы ОАО «РЖД» — экономику процессов, производительность локомотивного парка и диспетчерского персонала, но и интересы заказчиков, связанные со стоимостью перевозки, объемом и сроками доставки грузов. Методические подходы, основанные на технико-технологических параметрах эксплуатационной работы, позволяют получить технологические эффекты за счет повышения эксплуатационных и экономических показателей работы железнодорожного транспорта и, следовательно, производственной эффективности всех участников перевозочного процесса.

Литература

1. Прокофьева Е. С., Панин В. В. Единые принципы взаимодействия эксплуатационной работы железнодорожных грузовых перевозок // Мир транспорта. 2019. Т. 17. № 5 (84). С. 186–198. ISSN 1992-3252.
2. Sirina N., Yushkova S. Polygon Principles for Integrative Digital Rail Infrastructure Management // Transportation Research Procedia. 2021. Vol. 54. Pp. 208–219. DOI: 10.1016/j.trpro.2021.02.066.
3. Assad A. Models for rail transportation // Transportation Research. Part A: General. 1980. Vol. 14. Issue 3. Pp. 205–220. DOI: 10.1016/0191-2607(80)90017-5.
4. Kramer S., Assad A. Alternating priority versus FCFS scheduling in a two-class queueing system // Operations Research Letters. 2012. Vol. 40. Issue 6. Pp. 506–509. DOI: 10.1016/j.orl.2012.08.009.
5. The Planning of Investment Activities in Field of Railway Transport with Support of Simulation Tools / J. Čamaj, E. Nedeliaková, A. Šperka, L. Ližbetinová // Transportation Research Procedia. 2021. Vol. 53. Pp. 39–49. DOI: 10.1016/j.trpro.2021.02.005.
6. Ke G. Y., Verma M. A framework to managing disruption risk in rail-truck intermodal transportation networks // Transportation Research. Part E : Logistics and Transportation Review. 2021. Vol. 153. DOI: 10.1016/j.tre.2021.102340.
7. Zhang R., Lu L., Wenliang J. Reliability analysis on railway transport chain // International Journal of Transportation Science and Technology. 2019. Vol. 8. Issue 2. Pp. 192–201. DOI: 10.1016/j.ijst.2018.11.004.

References

1. Prokofeva E. S., Panin V. V. Uniform principles of organization of rail freight transportation operations [Edinye printsipy vzaimodeystviya ekspluatatsionnoy raboty zheleznodorozhnykh gruzovykh perevozok] // World of Transport and Transportation. 2019. Vol. 17. No. 5 (84). Pp. 186–198. ISSN 1992-3252.
2. Sirina N., Yushkova S. Polygon Principles for Integrative Digital Rail Infrastructure Management // Transportation Research Procedia. 2021. Vol. 54. Pp. 208–219. DOI: 10.1016/j.trpro.2021.02.066.
3. Assad A. Models for rail transportation // Transportation Research. Part A: General. 1980. Vol. 14. Issue 3. Pp. 205–220. DOI: 10.1016/0191-2607(80)90017-5.
4. Kramer S., Assad A. Alternating priority versus FCFS scheduling in a two-class queueing system // Operations Research Letters. 2012. Vol. 40. Issue 6. Pp. 506–509. DOI: 10.1016/j.orl.2012.08.009.
5. The Planning of Investment Activities in Field of Railway Transport with Support of Simulation Tools / J. Čamaj, E. Nedeliaková, A. Šperka, L. Ližbetinová // Transportation Research Procedia. 2021. Vol. 53. Pp. 39–49. DOI: 10.1016/j.trpro.2021.02.005.
6. Ke G. Y., Verma M. A framework to managing disruption risk in rail-truck intermodal transportation networks // Transportation Research. Part E : Logistics and Transportation Review. 2021. Vol. 153. DOI: 10.1016/j.tre.2021.102340.
7. Zhang R., Lu L., Wenliang J. Reliability analysis on railway transport chain // International Journal of Transportation Science and Technology. 2019. Vol. 8. Issue 2. Pp. 192–201. DOI: 10.1016/j.ijst.2018.11.004.
8. Štefancová V., Nedeliaková E., López-Escobar C. Connection of Dynamic Quality Modeling and Total Service Management in Railway Trans-

8. Štefancová V., Nedeliaková E., López-Escolanob C. Connection of Dynamic Quality Modeling and Total Service Management in Railway Transport Operation // Procedia Engineering. 2017. Vol. 192. Pp. 834–839. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.06.144.
9. Liebchen C., Schülldorf H. A collection of aspects why optimization projects for railway companies could risk not to succeed — A multi-perspective approach // Journal of Rail Transport Planning & Management. 2019. Vol. 11. DOI: 10.1016/j.jrtpm.2019.100149.
10. Алгоритмические решения задач эффективного использования и развития железнодорожной инфраструктуры и перевозочных ресурсов / А. Ф. Бородин, В. В. Панин, Е. С. Прокофьева, Р. Ф. Сайбатов // Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО «РЖД». 2019. № 3. С. 28–39. ISSN 2304-9642.
11. Осминин А. Т., Сотников Е. А. Основные факторы и условия перехода на полигонную систему управления // Железнодорожный транспорт. 2017. № 5. С. 22–27. ISSN 0044-4448.
12. Долгосрочная программа развития открытого акционерного общества «Российские железные дороги» до 2025 года : утв. распоряжением Правительства Российской Федерации от 19.03.2019 г. № 466-р.
13. Инструктивные указания по организации вагонопотоков на железных дорогах ОАО «РЖД» : утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 29.12.2018 г. № 2872/р.
- port Operation // Procedia Engineering. 2017. Vol. 192. Pp. 834–839. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.06.144.
9. Liebchen C., Schülldorf H. A collection of aspects why optimization projects for railway companies could risk not to succeed — A multi-perspective approach // Journal of Rail Transport Planning & Management. 2019. Vol. 11. DOI: 10.1016/j.jrtpm.2019.100149.
10. Algorithmic solutions for the problems of efficient use and development of railway infrastructure and transportation resources [Алгоритмические решения задач эффективного использования и развития железнодорожной инфраструктуры и перевозочных ресурсов] / А. Ф. Бородин, В. В. Панин, Е. С. Прокофьева, Р. Ф. Сайбатов // Bulletin of Joint Scientific Council of JSC Russian Railways. 2019. No. 3. Pp. 28–39. ISSN 2304-9642.
11. Osminin A. T., Sotnikov E. A. Main factors and conditions of transition on polygon control system [Osnovnye faktory i usloviya perekhoda na poligonnyuyu sistemu upravleniya] // Railway Transport. 2017. No. 5. Pp. 22–27. ISSN 0044-4448.
12. Long-term development program of the JSC «Russian Railways» up to 2025 [Dolgosrochnaya programma razvitiya otkrytogo aktsionernogo obshhestva «Rossiyskie zheleznyye dorogi» do 2025 goda] : approved by the Order of the Government of the Russian Federation dated 19.03.2019 No. 466-r.
13. Guidelines on car traffic organization on the JSC «RZD» railways [Instruktivnye ukazaniya po organizatsii vagonopotokov na zheleznykh dorogakh ОАО «RZhD»] : approved by the Order of JSC «RZD» dated 29.12.2018. No. 2872/r.

Объем статьи 0,53 авторских листа

УДК 656.222.6

Александр Эрнстович Александров, доктор технических наук, профессор кафедры «Управление эксплуатационной работой» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,
Игорь Александрович Ковалев, кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление эксплуатационной работой» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,
Вадим Юрьевич Пермикин, кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление эксплуатационной работой» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,
Александр Владимирович Сурин, кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление эксплуатационной работой» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,
Владислав Владиславович Лесных, аспирант кафедры «Управление эксплуатационной работой» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия

ВЕРИФИКАЦИЯ ОПТИМИЗАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ПЕРЕРАБОТКИ ВАГОНПОТОКОВ НА СОРТИРОВОЧНОЙ СТАНЦИИ МЕТОДОМ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Alexander Ernstovich Alexandrov, DSc in Engineering, Professor, Operations Management Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,
Igor Alexandrovich Kovalev, PhD in Engineering, Associate Professor, Operations Management Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,
Vadim Yuryevich Permikin, PhD in Engineering, Associate Professor, Operations Management Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,
Alexander Vladimirovich Surin, PhD in Engineering, Associate Professor, Operations Management Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,
Vladislav Vladislavovich Lesnykh, postgraduate student, Operations Management Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia

Verification of optimization model of car traffic processing at marshalling station by simulation modeling

Аннотация

Текущее планирование работы сортировочных станций осуществляется, как правило, с применением эвристических алгоритмов и имитационного моделирования. Повысить качество планирования возможно на основе моделей строгой оптимизации. Авторами при помощи метода частично целочисленного линейного программирования (Mixed Integer Linear Program — MILP) построены математическая и компьютерная модели процесса переработки вагонопотоков на сортировочной станции. В представленной статье рассмотрены вопросы верификации оптимизационной модели с использованием имитационного моделирования.

Ключевые слова: сортировочная станция, математическая модель, частично целочисленное линейное программирование, имитационная модель, оптимизационная модель, оптимальное решение, верификация, валидация.

Abstract

As a rule, current planning of operation of marshalling station is carried out with the use of heuristic algorithms and simulation modeling. It is possible to improve the quality of planning on the basis of strict optimization models. With the use of the mixed integer linear programming method the authors have created a mathematical and a computer model of car traffic processing at a marshalling station. The paper considers questions of verification of the optimization model with the use of simulation modeling.

Keywords: marshalling station, mathematical model, mixed integer linear programming, simulation model, optimization model, optimal solution, verification, validation.

DOI: 10.20291/1815-9400-2023-1-37-41

В решении задач управления транспортом широкое распространение получили модели, основанные на аппарате линейного программирования. Вместе с тем, поскольку многие из таких моделей не учитывают динамические характеристики транспортного процесса, нередко решение, реализуемое на практике, оказывается неоптимальным. Чтобы разрешить эту проблему, доктор технических наук, профессор П. А. Козлов разработал модель, которая получила название динамической транспортной задачи с задержками (ДТЗЗ) [1]. Однако известные постановки ДТЗЗ не позволяли достоверно моделировать мультитерминальные потоки в тех задачах, в которых происходит их разделение на составляющие потоки и объединение простых потоков в мультитерминальные. В таких задачах, как, например, расформирование-формирование составов поездов, необходимо учитывать некоторые логические условия, обеспечивающие правильное отображение станционной технологии. В подобных случаях может помочь метод частично целочисленных задач линейного программирования (Mixed Integer Linear Program — MILP), который применяется для решения практических проблем при управлении транспортными потоками и широко описан в научной литературе [2–4].

В своих предыдущих исследованиях авторы разработали оптимизационную потоковую модель переработки вагонопотоков на сортировочной станции [5] с использованием MILP и динамической транспортной задачи с задержками. После этого была сделана логическая верификация оптимизационной модели [6] и установлено, что решение оптимизационной модели соответствует содержательной постановке задачи и может быть преобразовано в технологический график плана работы сортировочной станции. Предлагаемая вниманию статья посвящена верификации и валидации оптимизационной модели на примере реальной сортировочной станции.

При создании модели необходимо убедиться в том, что она максимально точно соответствует реальному объекту. Имеется в виду не полное соответствие прототипу, а соответствие в области свойств, отвечающих задачам исследования. В нашем случае такой областью является технология оперативного управления эксплуатационной работой железнодорожной станции. Определяющее свойство этого управления — многовариантность. Причем на практике всегда может быть реализован только один вариант, что делает фактически неприемлемыми экспериментальные проверки на реальном объекте, так как любая ошибка способна привести к недопустимому ущербу. На моделируемой сортировочной станции в реальном процессе оперативного текущего планирования используется имитационная модель, которая за длительный период эксплуатации доказала свою достоверность [7]. Поэтому, по мнению авторов, верификация на ее основе во многом позволит выполнить и требование валидации (под валидацией понимается соответствие решения оптимизационной модели возможному ходу реального технологического процесса).

На первом этапе необходимо сравнить решение оптимизационной модели с решением имитационной модели. Если они

совпадут, то смысла в использовании оптимизационной модели нет. Ожидается, что математически строгое оптимальное решение будет лучше, чем рациональное решение имитационной модели, полученное на основе эвристического подхода. Основная цель состоит в том, чтобы сократить время нахождения вагонов на станции, т. е. снизить суммарные вагоно-часы простоя транзитного вагона с переработкой. В технологическом смысле решения будут отличаться очередностью обработки составов поездов, прибывших в расформирование, и составов своего формирования.

На втором этапе необходимо проверить решение оптимизационной модели с помощью имитационного эксперимента. Сделать проверку позволит широкий набор результатов, который выдает имитационная система. Если эксперимент подтвердит, что вариант, рассчитанный оптимизационной моделью, лучший по основному показателю и выполним, значит, достоверность разработанной модели подтверждена самым оптимальным из доступных на практике способов.

Очевидно, что данные для расчета на оптимизационной и имитационной моделях должны быть одними и теми же. К таким данным относятся расписание прибытия на станцию поездов и разложение составов по плану формирования станции.

Отличие решений оптимизационной и имитационной моделей в первую очередь обусловлено разной очередностью обработки составов в парке приема и разной последовательностью расформирования составов на сортировочной горке. Это обстоятельство определяет то, что и последовательность моментов окончания накопления составов в сортировочном парке будет существенно отличаться.

Как видно из рис. 1 и 2, на которых представлены результаты расчетов на имитационной и оптимизационной моделях, эти решения не совпадают: оптимизационная модель существенно изменяет последовательность расформирования составов, и оптимальная последовательность далека от работы по принципу *Fi-FO* (первый прибыл — первый расформирован). Простой в парке приема возрастают и по общей величине превосходят таковые в варианте расчета на имитационной модели (табл. 1). Однако для эффективной работы основной технологической линии сортировочной станции важное значение имеет период накопления состава в сортировочном парке, который, в свою очередь, зависит от времени ожидания замыкающей группы. Именно с точки зрения сокращения ожидания замыкающей группы решение оптимизационной модели является лучшим.

Далее необходимо провести эксперимент на имитационной модели, в котором реализована последовательность обработки составов на всех этапах, полученная из решения оптимизационной модели. Возможность реализации такой последовательности подтверждена, а параметры технологического процесса уточнены. О моделировании технологического процесса в имитационной модели дает представление рис. 3.

Технологическая эффективность варианта, рассчитанного на имитационной модели, подтверждается сравнением показателей из табл. 1. В частности, сумма вагоно-часов, главный целевой показатель, почти на 200 вагоно-часов меньше: для периода текущего планирования работы это существенная

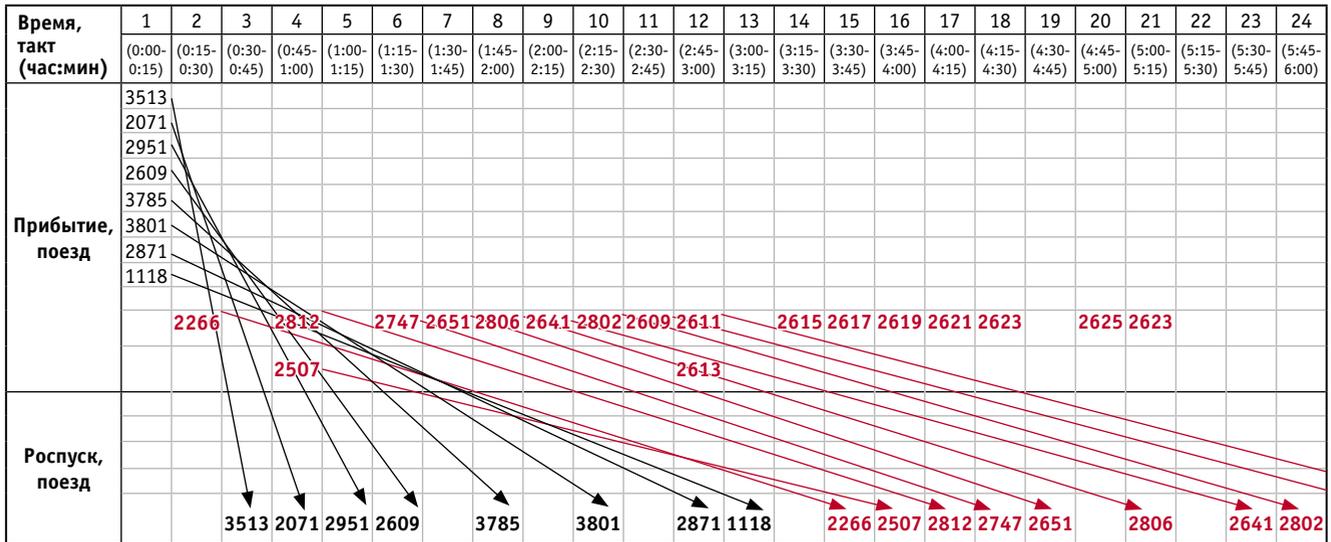


Рис. 1. Очередность расформирования по результатам расчета на имитационной модели

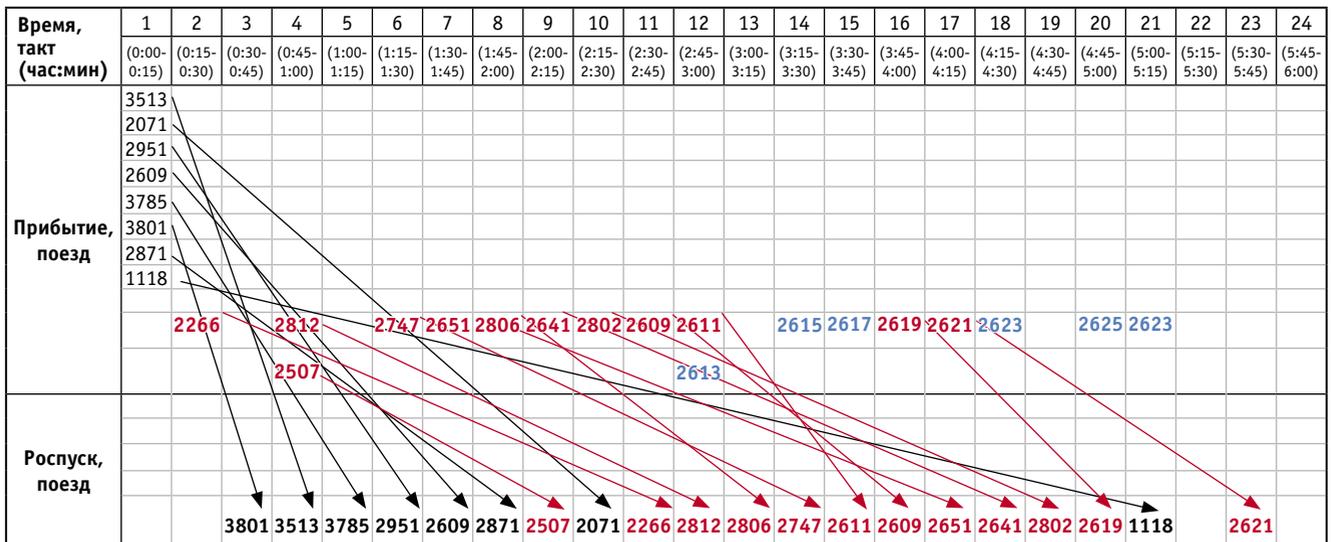


Рис. 2. Очередность расформирования по результатам расчета на оптимизационной модели

экономия — 6 ч в одной сортировочной системе. В имитационной модели по результатам расчета расформировано большее количество составов по сравнению с оптимизационной моделью. Но анализ показывает, что решение оптимизационной модели может быть откорректировано в этом отношении без ущерба для главного показателя. Причина длительного нахождения расформированных составов в парке прибытия заключается в том, что они не изменяют количество сформированных составов.

Авторы видят перспективы предлагаемого подхода в совместном использовании оптимизационной и имитационной моделей. Первая будет формировать решение по порядку обработки составов на сортировочной станции, а вторая станет инструментом для проверки решения оптимизационной модели, а также для детализации и корректировки. При этом рабочий план станции будет строиться на основе имитационной

Таблица 1

Основные показатели расчета моделей

Показатель	Имитационная модель	Оптимизационная модель, уточненная на имитационной модели
Расформировано составов, шт.	16	14
Сформировано составов, шт.	12	13
Вагоно-часы:		
на станции в целом	9824,8	9639,77
в парке прибытия	2762,83	3122,6
в сортировочном парке	5196,1	4898,65
в парке отправления	1647,2	1372,85

модели, воспроизводящей технологическую последовательность результатов оптимизационной модели. Однако нельзя не отметить, что здесь возникает проблема, связанная с подготовкой большого пакета исходных данных сразу для двух моделей, формирование которого в оперативной обстановке

невозможно. По мнению авторов, решить эту проблему можно за счет разработки автоматизированной подсистемы формирования исходных данных. Создание такой системы представляет собой отдельную трудоемкую задачу, которая и станет направлением дальнейших исследований.

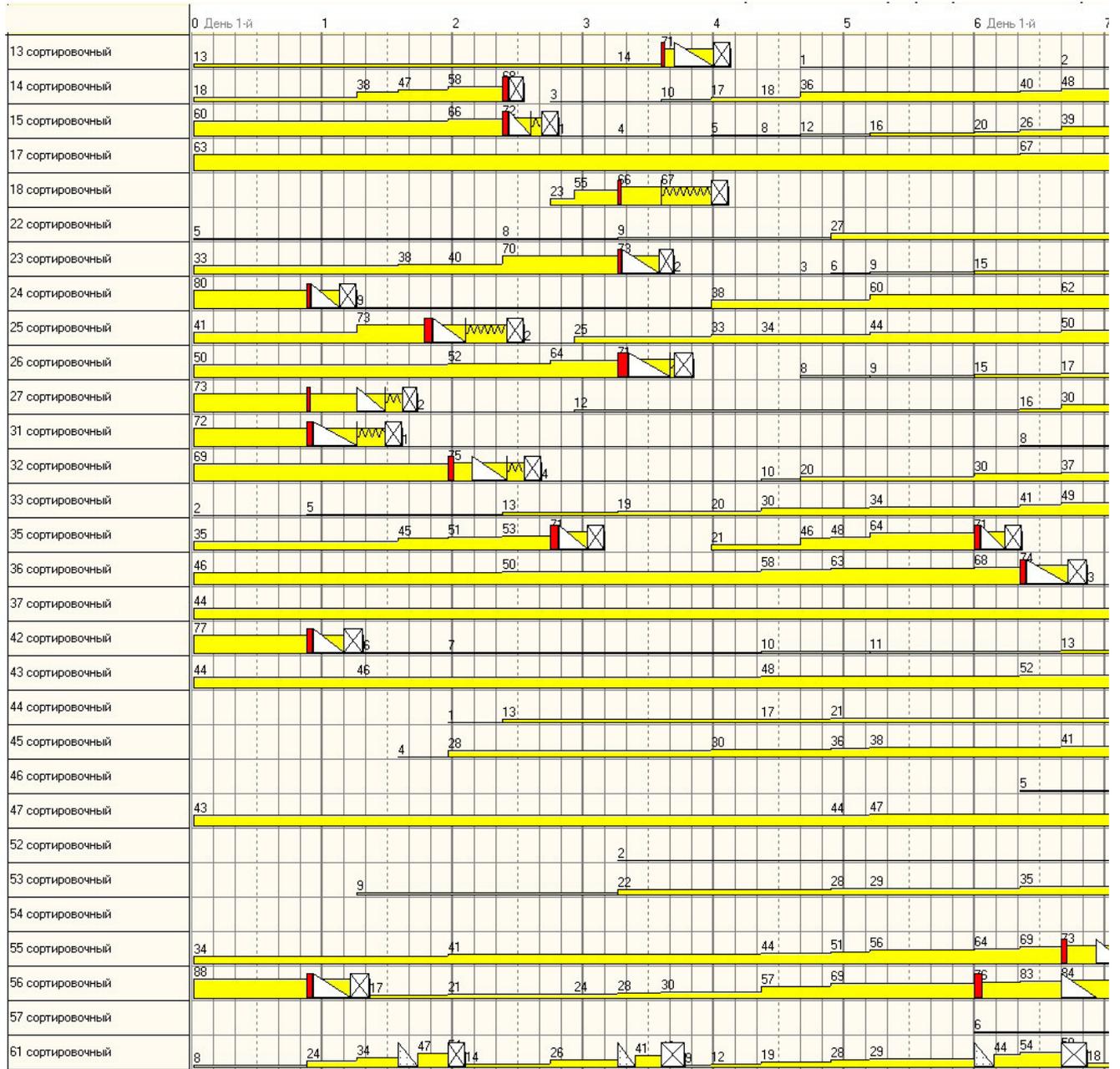


Рис. 3. Фрагмент суточного плана-графика по результатам расчета на имитационной модели

Литература

1. Козлов П. А. Теоретические основы, организационные формы, методы оптимизации гибкой технологии транспортного обслуживания заводов черной металлургии : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Липецк, 1986. 377 с.
2. A MILP model for quasi-periodic strategic train timetabling / G. Sartor, C. Mannino, T. Nygreen, L. Bach // Omega. 2022. 116(1):102798. DOI: 10.1016/j.omega.2022.102798.
3. A Mixed-integer Linear Program for Real-time Train Platforming Management / R. García-Ródenas, M. Luz. López-García, L. Cadarso, E. Codina // Transportation Research Procedia. 2022. Vol. 62. Pp. 815–823. DOI: 10.1016/j.trpro.2022.02.101.
4. Mojtaba H., Petering M. E. H., Bergmann D. R. Mixed integer programming for minimizing the period of a cyclic railway timetable for a single track with two train types // Computers & Industrial Engineering. 2013. Vol. 66. Issue 1. Pp. 171–185. DOI: 10.1016/j.cie.2013.06.003.
5. Модель основной технологической линии сортировочной станции / А. Э. Александров, А. Г. Галкин, В. Ю. Пермикин, Е. Н. Тимухина // Транспорт Урала. 2018. № 4 (59). С. 7–12. DOI: 10.20291/1815-9400-2018-4-7-12. ISSN 1815-9400.
6. Логическая верификация оптимизационной модели переработки вагонопотоков на сортировочной станции / А. Э. Александров, И. А. Ковалев, В. Ю. Пермикин [и др.] // Транспорт Урала. 2022. № 2 (73). С. 17–22. DOI: 10.20291/1815-9400-2022-2-17-22. ISSN 1815-9400.
7. Козлов П. А., Александров А. Э. Автоматизированный программный комплекс расчета, регистрации и отображения работы сортировочной станции // Железнодорожный транспорт. 2003. № 9. С. 65–67. ISSN 0044-4448.

References

1. Kozlov P. A. Theoretical basis, organizational forms, methods of optimization of flexible transport service methods at ferrous metallurgy plants [Teoreticheskie osnovy, organizatsionnye formy, metody optimizatsii gibkoy tekhnologii transportnogo obsluzhivaniya zavodov chernoy metallurgii] : DSc in Engineering Thesis. Lipetsk, 1986. 377 p.
2. A MILP model for quasi-periodic strategic train timetabling / G. Sartor, C. Mannino, T. Nygreen, L. Bach // Omega. 2022. 116(1):102798. DOI: 10.1016/j.omega.2022.102798.
3. A Mixed-integer Linear Program for Real-time Train Platforming Management / R. García-Ródenas, M. Luz. López-García, L. Cadarso, E. Codina // Transportation Research Procedia. 2022. Vol. 62. Pp. 815–823. DOI: 10.1016/j.trpro.2022.02.101.
4. Mojtaba H., Petering M. E. H., Bergmann D. R. Mixed integer programming for minimizing the period of a cyclic railway timetable for a single track with two train types // Computers & Industrial Engineering. 2013. Vol. 66. Issue 1. Pp. 171–185. DOI: 10.1016/j.cie.2013.06.003.
5. Model of marshalling station main processing line [Model' osnovnoy tekhnologicheskoy linii sortirovochnoy stantsii] / A. E. Alexandrov, A. G. Galkin, V. Yu. Permikin, E. N. Timukhina // Transport of the Urals. 2018. No. 4 (59). Pp. 7–12. DOI: 10.20291/1815-9400-2018-4-7-12. ISSN 1815-9400.
6. Logic verification of optimization model of car traffic processing at marshalling station [Logicheskaya verifikatsiya optimizatsionnoy modeli pererabotki vagonopotokov na sortirovochnoy stantsii] / A. E. Alexandrov, I. A. Kovalev, V. Yu. Permikin [et al.] // Transport of the Urals. 2022. No. 2 (73). Pp. 17–22. DOI: 10.20291/1815-9400-2022-2-17-22. ISSN 1815-9400.
7. Kozlov P. A., Alexandrov A. E. Automated program complex for calculation, registration and representation of operation of a marshalling station [Avtomatizirovanny programmny kompleks rascheta, registratsii i otobrazheniya raboty sortirovochnoy stantsii] // Railway Transport. 2003. No. 9. Pp. 65–67. ISSN 0044-4448.

Объем статьи 0,55 авторских листа

УДК 656.021.8

Сергей Валентинович Бушуев, кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,

Николай Сергеевич Голочалов, аспирант кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия

АНАЛИЗ СПОСОБОВ ПОВЫШЕНИЯ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

Sergey Valentinovich Bushuev, PhD in Engineering, Associate Professor, Railway Automation, Telemechanics and Communication Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,

Nikolay Sergeevich Golochalov, postgraduate student, Railway Automation, Telemechanics and Communication Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia

Analysis of ways to increase traffic capacity of railways

Аннотация

Представлен обзор существующих и перспективных способов повышения пропускной способности железных дорог. Проанализированы исследования, статьи и монографии, посвященные этому вопросу. Выполнено обобщение способов повышения пропускной способности в виде диаграммы. Рассмотрены организационно-технические и реконструктивные мероприятия, позволяющие использовать и расширять имеющиеся резервы пропускной способности железных дорог, а также перспективные технологии, с помощью которых можно создавать ее новые резервы.

Ключевые слова: пропускная способность, провозная способность, повышение скоростей, межпоездной интервал, соединенный поезд, виртуальная сцепка.

Abstract

The paper presents an overview of existing and perspective ways to increase a traffic capacity of railways. The authors have analysed studies, papers and monographs dedicated to this question. They have generalized ways to increase the traffic capacity in the form of a chart. The authors have considered organizational, technical and reconstructive measures that allow using and widening existing reserves of traffic capacity of railways, as well as perspective technologies that allow creating new reserves of traffic capacity.

Keywords: traffic capacity, carrier capacity, increase of speed, train-to-train interval, united train, virtual coupling.

DOI: 10.20291/1815-9400-2023-1-42-50

ВВЕДЕНИЕ

Железнодорожные перевозки всегда занимали особое место в экономике России. Спрос на грузовые перевозки в восточном направлении растет еще с 2013 г., а в настоящее время этот тренд усиливается. Кроме того, правительством Российской Федерации поставлена задача по развитию пропускной способности коридора Север — Юг. Также отмечаются тенденции роста и пассажирских перевозок, косвенно оказывающие влияние на возможности грузоперевозок.

Для обслуживания растущих объемов перевозок необходимо развивать провозную и пропускную способность железных дорог: в первую очередь — за счет использования имеющихся резервов, во вторую — за счет устранения узких мест. Если эти меры окажутся недостаточными, возможен переход к комплексному усилению инфраструктуры направления. Первый шаг к решению обозначенных задач — анализ опыта по повышению пропускной способности, именно этому и посвящена статья.

ПРОПУСКНАЯ И ПРОВОЗНАЯ СПОСОБНОСТЬ

Одним из первых решений по использованию резервов для повышения провозной способности стало увеличение длины и, как следствие, массы поездов, что позволило исключить неполносоставные и неполновесные поезда в графике, так как у локомотивов была недоиспользованная мощность (двигатели локомотивов развивались с опережающим темпом). При этом было установлено, что повышение длины поезда до определенного значения снижает число пропускаемых составов: технологические операции с такими поездами предусматривают занятие горловины, что приводит к увеличению станционных интервалов [1].

В рамках статьи рассматриваются способы повышения пропускной способности. Выделяют две основные группы способов: организационно-технические, реализация которых не требует крупных капиталовложений, и реконструктивные, связанные со значительными инвестициями в переустройство инфраструктуры железных дорог [2].

Для наглядного представления о способах повышения пропускной способности можно использовать метод изображения причинно-следственных связей — диаграмму Исикавы (рис. 1). Исследуемая проблема обозначается основной стрелкой, а влияющие на нее факторы являются примыканиями разного уровня. Так, на рис. 1 рассматриваемые способы повышения пропускной способности (примыкания 2-го уровня) показаны пунктиром.

Мероприятия, направленные на повышение пропускной способности, могут приводить к ее увеличению (развитие инфраструктуры) или к повышению уровня ее использования (снятие ограничений и использование резервов). На практике эти мероприятия нередко применяются совместно [3]. Например, в статье [4] повысить обоснованность комплексных проектов развития предлагается с помощью метода оценки перевозочной мощности — баланса, позволяющего совместить растущие объемы перевозок, высокие темпы развития инфраструктуры и ремонтных работ.

Исследования, направленные на оценку эффекта повышения пропускной способности от применения комплексных мероприятий, часто выполняют для конкретного участка. Например, в [5] рассматриваются мероприятия по развитию участка Восточно-Сибирской, а в [6, 7] — участков Дальневосточной железной дороги.

Интерес представляют также работы, в которых изучаются отдельные аспекты повышения пропускной способности. Например, в [8] рассматривается совершенствование систем интервального регулирования движения поездов и обозначаются необходимые дополнительные меры, совместная реализация которых приведет к увеличению пропускной способности.

ПОВЫШЕНИЕ СКОРОСТЕЙ ДВИЖЕНИЯ

Д. Ю. Левин в монографии [3] представляет результаты анализа скоростемерных лент локомотивов (состояние на 2009–2010 гг.) по выполнению заложенной в график скорости:

при следовании на код «З» фактическая ходовая скорость ниже расчетной на 20 %, а графической — на 8 %;

при следовании на код «Ж» фактическая ходовая скорость ниже расчетной на 46 %, а графической — на 38 %;

при следовании на код «КЖ» фактическая ходовая скорость ниже расчетной на 63 %;

при сквозном пропуске по станции фактическая скорость в среднем на 5–6 км/ч меньше, чем при движении по перегону.

Это объясняется прежде всего разной квалификацией машинистов, неодинаково реагирующих на показания светофоров. Отмечается, что невыполнение скоростного режима при движении «под зеленый, на зеленый» снижает пропускную способность на 8 %.

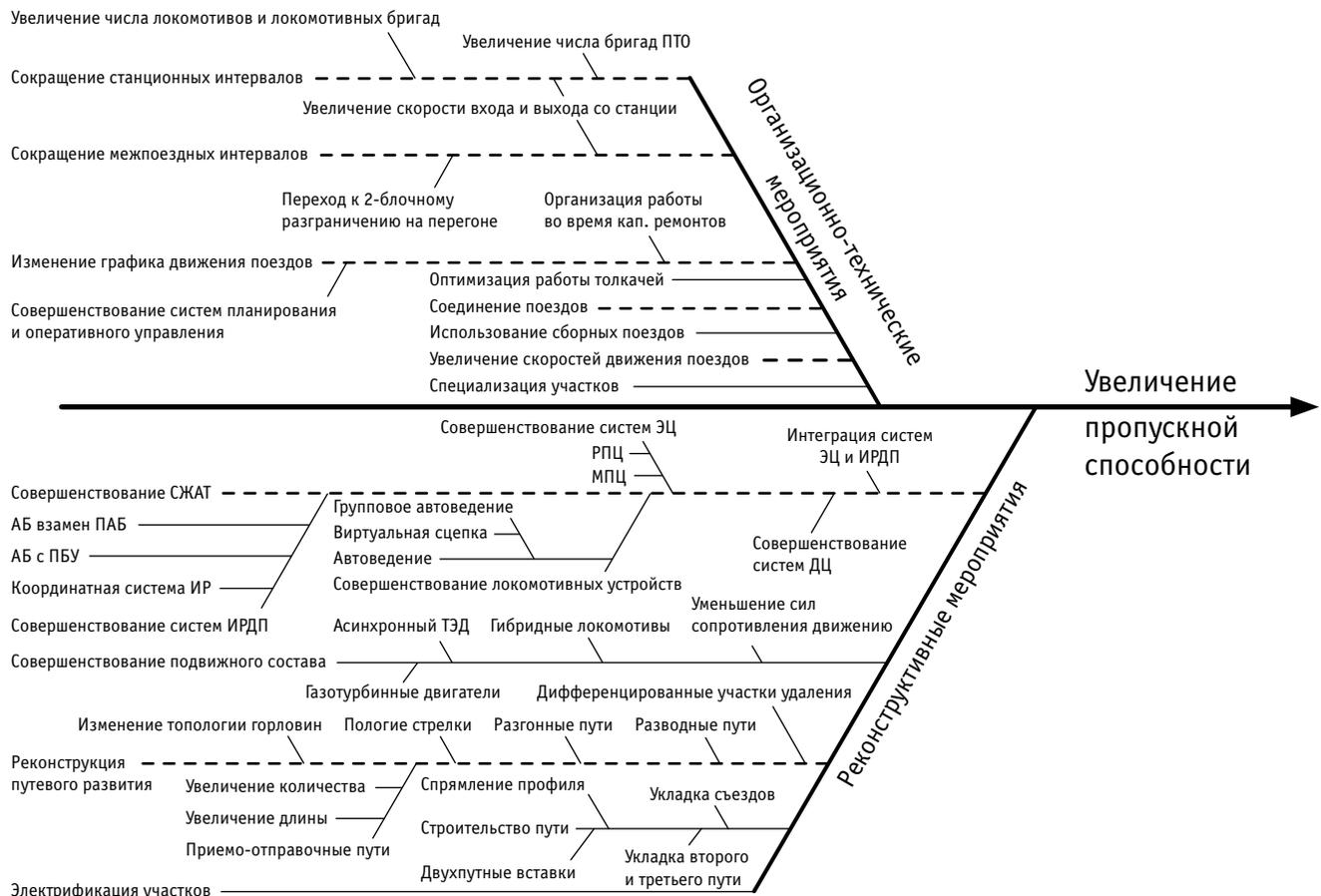


Рис. 1. Способы увеличения пропускной способности

В работе [9] приводится анализ выполнения показателя участковой скорости на Северо-Кавказской железной дороге, среди причин снижения скорости отмечены следующие:

наличие большого количества цистерн и порожних вагонов, которые уменьшают устойчивость поезда, тем самым ограничивая максимальные скорости движения;

значительное влияние пассажирского движения на грузовое, особенно из-за изменения расписания в летний период; неравномерный подход поездов, приводящий к простоям составов в ожидании локомотива;

квалификация и загрузка персонала.

Повышение скоростей движения приводит к улучшению использования существующей пропускной способности. Увеличить скорость можно за счет полного использования мощности локомотива, однако не стоит рассматривать недоиспользование мощности как ошибку: повышать массу и длину поезда следует после выполнения оптимизационных расчетов, иначе последствия могут привести к износу инфраструктуры и ухудшению безопасности движения [3]. Мощность современных локомотивов можно расходовать на повышение и их массы, и скорости движения. Например, в [10] сравнивается эффект от повышения массы и от увеличения скорости для одного типа локомотива. Сравнение показывает, что увеличение скорости дает прибавку 30 % пропускной способности, при этом энергопотребление меньше, чем у поезда повышенной массы.

При движении по участку возникают ситуации, когда впереди идущий поезд пакета следует на боковой путь, а идущий позади должен проследовать станцию насквозь. Как показывает анализ скоростемерных лент [3], при этом второй поезд начинает снижать скорость даже с учетом расчетного межпоездного интервала 8 мин, который должен исключать данную ситуацию. Поезд, снижающий скорость, увеличивает свое время хода по блок-участку, тем самым нарушая заложенный межпоездный интервал, а значит, если за ним следует еще один поезд, он тоже будет вынужден снизить скорость из-за появления кода «Ж» на локомотивном светофоре. При этом отмечается, что в 75 % случаев появления кода «Ж» кратковременно и сменяется кодом «З», а машинисты при смене показания сразу начинают снижение скорости на первой ступени служебного торможения, так как не имеют информации о фактическом состоянии впереди лежащего участка пути.

Снизить влияние данного эффекта можно за счет увеличения скорости входа на станцию и выхода с нее, а также за счет скорости проследования станции. Поэтому учеными ВНИИЖТ [11] были разработаны стрелочные переводы марки 1/9, 1/11 с повышенной скоростью движения по отклонению. Переустройство стрелочных переводов соответствующей марки крестовины позволила повысить скорость движения в горловине (без ее удлинения) в 1,6–2 раза и уменьшить межпоездные интервалы на 30 %.

Повышение скоростей движения связано не только с использованием резервов для грузовых поездов, но и с влиянием пассажирских и высокоскоростных поездов на график движения. Оценка влияния пассажирского и высокоскоростного движения на грузовое осуществляется с помощью коэффици-

ента съема. В работе [12] изучаются зависимости провозной и пропускной способности от скорости движения пассажирских и грузовых поездов. Представленная модель показывает нелинейную зависимость, авторы отмечают, что при расчетах не учтены технологические особенности (график, нормы веса и длины), а также условия безопасности движения.

Эффекты от увеличения скорости можно оценить при помощи эксплуатационных и экономических показателей [13, 14]: повышение скорости приводит к уменьшению оборота вагона и снижению себестоимости перевозок. Однако с увеличением скорости возрастают затраты на энергоснабжение, поэтому задача повышения скоростей движения на участке носит оптимизационный характер.

СОЕДИНЕННЫЙ ПОЕЗД И «ВИРТУАЛЬНАЯ СЦЕПКА»

Один из способов повышения расчетной пропускной и провозной способности железных дорог — технология ведения соединенных поездов. Впервые ее начали применять во время капитального ремонта еще в 1970 г. как кратковременный способ форсирования пропускной способности, что позволяло увеличивать «окна» и быстрее восстанавливать график. Для использования на постоянной основе в качестве способа освоения возрастающих объемов перевозок технология не подходила по следующим причинам:

технические станции не были готовы к работе со сверхдлинными поездами;

отсутствовали технические средства синхронизации тяги и торможения локомотивов.

Использование соединенных поездов после реконструкции (удлинения путей) лимитирующих станций позволило повысить размеры движения на 36 % [1].

В настоящее время средняя полезная длина приемо-отправочных путей увеличилась, а самое главное, появились разработки, позволяющие автоматизировать движение поездов с распределенной тягой (ИСАВП-РТ, Консул-Т) [15, 16].

Оценка эффективности применения соединенных поездов на постоянной основе, выполненная в работе [17], показала, что пропускная способность при этом снижается на 1–8 %, а провозная возрастает на 4–27 % в зависимости от ходовой скорости и доли соединенных поездов. Аналогичные выводы, основанные на результатах анализа эксплуатации соединенных поездов, сделаны и в работах [18, 19]. Использование технологии актуально для участков, исчерпывающих возможности пропускной и провозной способности, связано с индивидуальными особенностями участка и требует технико-экономических обоснований. Отмечается необходимость реконструкции путевого развития, а также проверки по обеспечению межпоездного интервала устройствами электроснабжения.

Варианты реконструкции под соединенные поезда рассматриваются в [20] на основе анализа работы станции. Сделано заключение, что узким местом становится горловина, поэтому необходимо строительство вытяжного пути, а также удлинение приемо-отправочного пути, чтобы исключить занятые горловины составом.

Методики экономической оценки технологии соединенного поезда выполнены в работах [21, 22], показано, что особен-

но эффективно применение технологии во время технологических «окон» и капитальных ремонтов.

К основным недостаткам соединенных поездов можно отнести значительные затраты времени на физическое соединение поездов и возможное занятие при этом перегона.

С развитием локомотивных устройств и ростом покрытия участков железных дорог радиосвязью становятся возможными поездки по технологии «виртуальной сцепки» [23–25]. В настоящее время эта технология за счет режима автоведения позволяет повысить скорость движения и точность выполнения графика, тем самым улучшая использование существующих возможностей инфраструктуры. В будущем можно добиваться увеличения пропускной способности от применения «виртуальной сцепки» за счет значительного сокращения межпоездного интервала.

Технология «виртуальной сцепки» обеспечивает движение двух и более последовательно идущих поездов в режиме автоведения с учетом динамических свойств впереди идущего поезда за счет организации постоянного обмена информацией между локомотивами по радиоканалу [26].

Технологию ведения соединенного поезда и «виртуально» соединенных поездов часто сравнивают в связи с использованием на локомотивах системы автоматизированного ведения: для соединенного поезда это управление распределенной тягой, для «виртуальной сцепки» — управление ведомым поездом в режиме автоведения.

Для обеспечения интенсивного движения при применении технологий соединенного поезда или «виртуальной сцепки» важно оптимизировать использование ресурсов систем тягового электроснабжения. Этот вопрос по результатам опытных поездок изучается в работах [27–29], авторы делают следующие выводы: «виртуальная сцепка» расходует меньше энергии, при этом обеспечивает меньшие потери, меньшую температуру в контактной и отсасывающей сети, чем соединенный поезд.

Оценка возможностей тяговой подстанции по обеспечению уменьшенного межпоездного интервала и сравнение оптимального межпоездного интервала по условиям электроснабжения для нерегулируемой и регулируемой систем тягового электроснабжения приведены в работе [30]. Показано, что устройства автоматического регулирования напряжения позволяют на рассматриваемом участке сократить межпоездной интервал с 15 до 7 мин.

Согласно результатам опытных поездок по технологии «виртуальной сцепки», рассмотренных в работах [31, 32], пропускная способность участка повышается на 10–15 % без строительства инфраструктуры. Однако авторы отмечают, что при сокращении межпоездного интервала критическими становятся моменты входа на станцию и выхода со станции, горловины могут стать ограничивающим фактором для эффективного применения технологии «виртуальной сцепки».

МЕЖПОЕЗДНОЙ ИНТЕРВАЛ

Одной из характеристик пропускной способности линий со специализацией главных путей по направлениям является межпоездной интервал. Существующая организация движения «под зеленый, на зеленый» основана на том, что между поездами

сохраняется расстояние, равное трем блок-участкам (трем тормозным путям), — так поезда могут следовать постоянно с максимально разрешенной скоростью, если будет обеспечена синхронность движения. В реальных условиях межпоездные интервалы все время изменяются, что обусловлено разной квалификацией машинистов (реакция на смену показаний или проезд участка с ограничением скорости), разным планом и профилем пути (отличающиеся по длине блок-участки) [3].

Согласно действующей методике расстановки проходных светофоров, длина блок-участков определяется двумя составляющими:

необходимостью обеспечения одинакового времени хода по блок-участкам (для выполнения расчетного межпоездного интервала);

необходимостью выполнения полного служебного торможения в пределах одного блок-участка.

Расстановка проходных сигналов осуществляется по кривой времени хода, основываясь на участке с наихудшими условиями для движения, т.е. он будет определять расстановку сигналов на протяжении всего перегона, а значит, существует возможность изменить методику расстановки проходных светофоров так, чтобы сократить длину блок-участков. Альтернативным способом становится расстановка проходных сигналов по тормозным путям. Например, в работе [33] на основе сравнения способов расстановки сигналов показано, что при расстановке по тормозным путям число блок-участков увеличивается, а межпоездной интервал сокращается примерно на 10 %.

На межпоездной интервал можно повлиять непосредственно через системы интервального регулирования движением поездов. Так, в работе [34] аналитически оценивается влияние различных типов систем интервального регулирования на пропускную способность и отмечается, что наличие защитного участка за светофором с запрещающим показанием значительно снижает пропускную способность. В работах [35, 36] ученые НИИАС оценивают влияние межпоездного интервала на пропускную способность с помощью моделирования железнодорожных участков и делают вывод о необходимости путей разгона или параллельных вставок для обеспечения отправления с уменьшенным интервалом. Однако определение зависимостей межпоездного интервала от длин разгонного пути и параллельных вставок не дается.

С развитием локомотивных систем безопасности становится возможным сокращение межпоездного интервала за счет дополнительной информации о впереди лежащем участке пути [37], обеспечивающей безопасное сближение попутно следующих поездов. К таким системам относятся локомотивные комплексы безопасности БЛОК, САУТ, позволяющие выполнять прицельное торможение в автоматическом режиме. Использование этих комплексов совместно с современными системами интервального регулирования дает возможность сократить межпоездной интервал за счет организации движения по принципу подвижного блок-участка [38].

Системы интервального регулирования с подвижными блок-участками в результате сокращения межпоездного интервала обеспечивают повышение пропускной способности почти на 15 % [39–41], однако требуют капиталовложений

в переоборудование перегонов. Автоблокировка с подвижным блок-участком постоянно развивается, в частности, она адаптирована для высокоскоростного движения за счет повышения значности локомотивного светофора (отображается состояние до 6 блок-участков, а также буквенные и цифровые индексы, уточняющие разрешенную скорость) [42, 43].

Наименьший межпоездной интервал можно обеспечить при отказе от проходных светофоров, рельсовых цепей и при переходе на принцип управления по координате хвоста впередиидущего поезда. Координатная система интервального регулирования возможна при расширении функций локомотивных устройств безопасности и повышении точности позиционирования подвижных единиц спутниковыми навигационными системами. Разработке алгоритмического и методического обеспечения координатной системы посвящены работы [44, 45], в которых отражены основные принципы функционирования этих систем, предложены их функциональные схемы. Аналитический расчет интервала попутного следования при управлении на хвост поезда с учетом условий передачи информации по радиоканалу и экстренного торможения впередиидущего поезда приведен в [46]. На данный момент совершенствуются локомотивные устройства безопасности и передачи данных по радиоканалу [47].

ТЕХНОЛОГИЯ РАБОТЫ

Изменение технического оснащения участка для повышения пропускной способности может сказаться на технологии работы станций и перегонов, например на изменении коэффициента съема либо увеличении несинхронности подачи поездов [48, 49].

Важным аспектом реализации пропускной способности являются капитальные ремонты, оказывающие значительное воздействие на технологию работы участка и направления в целом. Например, в работах [50, 51] изучается влияние времени закрытия перегона и разных способов восстановления графика. В статье [52] авторы отмечают, что и на сам процесс выполнения «окна» оказывают воздействие многие факторы, такие как техническое состояние путевых машин, их задействование

в других работах, согласованность служб, выполняющих работы, неравномерность движения и влияние пассажирских поездов, вплоть до отмены «окон». Для снижения потерь в организации «окон» и влияния на них человеческого фактора необходимо использовать автоматизированную систему анализа и планирования выполнения «окон».

Значительное влияние на пропускную способность может оказывать работа технических станций. Так, в [53–56] авторы исследуют зависимость пропускной способности участка от времени занятия путей технической станции и делают вывод о том, что в первую очередь необходимо избавляться от узких мест, не всегда увеличение числа путей будет приводить к повышению пропускной способности, так как возможна нехватка тягового обеспечения.

Оценка узких мест при сокращении межпоездного интервала производилась с помощью имитационного моделирования участка Свердловской железной дороги учеными УрГУПС в рамках научно-исследовательской работы [57]. Было установлено, что наиболее сдерживающий элемент — загрузка бригад ПТО, а также путевое развитие некоторых станций, поэтому без изменения технического оснащения ограничивающих станций дальнейшее увеличение пропускной способности за счет средств интервального регулирования невозможно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Повышение пропускной способности относится к тем задачам, которые требуют комплексного подхода, включая моделирование, оценку рисков, технико-экономические и оптимизационные расчеты. Наряду с классическими способами повышения пропускной способности появляются новые, в основе которых лежит усиление влияния бортовых систем автоматики на процесс интервального регулирования. В настоящее время применение технологии «виртуальной сцепки» на двух поездах является реальностью, проходят испытания группового ведения поездов. В будущем возможен переход на координатную систему интервального регулирования, которая позволит максимально сближать поезда, обеспечивая при этом безопасность движения.

Литература

1. Макарошкин А. М., Дьяков Ю. В. Использование и развитие пропускной способности железных дорог. Москва : Транспорт, 1981. 287 с.
2. Управление эксплуатационной работой на железнодорожном транспорте / Под ред. В. И. Ковалева и А. Т. Осминина. Москва : УМЦ ЖДТ, 2009. 440 с.
3. Левин Д. Ю., Павлов В. Л. Расчет и использование пропускной способности железных дорог : монография. Москва : УМЦ ЖДТ, 2011. 364 с.
4. Оценка баланса провозной способности полигонов сети железных дорог / А. Ф. Бородин, В. В. Панин, М. А. Агеева [и др.] // Вестник ВНИИЖТ. 2022. Т. 81. № 2. С. 158–169. ISSN 2223-9731.
5. Комплекс организационно-технических и реконструктивных мероприятий, направленных на улучшение показателей работы

References

1. Makarochkin A. M., Dyakov Yu. V. Utilization and enhancement of traffic capacity of railways [Ispol'zovanie i razvitiye propusknoy sposobnosti zheleznikh dorog]. Moscow : Transport, 1981. 287 p.
2. Operations control on railway transport [Upravlenie ekspluatatsionnoy rabotoy na zheleznodorozhnom transporte] / Ed. by V. I. Kovalev & A. T. Osminin. Moscow : UMTs ZhDT, 2009. 440 p.
3. Levin D. Yu., Pavlov V. L. Calculation and use of railway capacity [Raschet i ispol'zovanie propusknoy sposobnosti zheleznikh dorog] : monograph. Moscow : UMTs ZhDT, 2011. 364 p.
4. Assessment of transportation capacity balance of railway network polygons [Otsenka balansa provoznoy sposobnosti poligonov seti zheleznikh dorog] / A. F. Borodin, V. V. Panin, M. A. Ageeva [et al.] // VNIIZhT Scientific Journal. 2022. Vol. 81. No. 2. Pp. 158-169. ISSN 2223-9731.
5. The complex of organizational and technical and reconstructive measures aimed at improving the performance of the area based on the study of systemic relations and regularities of functioning of railway transport system [Kompleks organizatsionno-tekhnicheskikh i rekonstruktivnykh

- участка на основе исследования системных связей и закономерностей функционирования железнодорожной транспортной системы / В. А. Оленцевич, В. Е. Гозбенко, С. К. Каргапольцев, Г. Н. Крамынина // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2019. № 3 (63). С. 171–179. DOI: 10.26731/1813-9108.2019.3(63).171-179. ISSN 1813-9108.
6. Баленко В. В., Каликина Т. Н., Кейно М. Ю. Анализ мероприятий, необходимых для повышения пропускной способности Восточного полигона // Вестник института тяги и подвижного состава. 2016. № 12. С. 100–103.
 7. Бородин А. Ф., Сторчак М. В. Научная оценка перспектив модернизации Восточного полигона сети Российских железных дорог // Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО «РЖД». 2017. № 2. С. 65–73. ISSN 2304-9642.
 8. Розенберг Е. Н., Озеров А. В., Панферов И. А. О комплексном подходе к решению задачи повышения пропускной способности // Автоматика, связь, информатика. 2022. № 8. С. 2–6. ISSN 0005-2329.
 9. Зубков В. Н., Рязанова Е. В., Чеботарева Е. А. Скорость движения поездов — индикатор качества перевозок пассажиров и грузов // Железнодорожный транспорт. 2017. № 3. С. 45–51. ISSN 0044-4448.
 10. Курбасов А. С. Увеличение скоростей перевозки грузов как фактор повышения экономической эффективности железных дорог // Железнодорожный транспорт. 2010. № 4. С. 71–73. ISSN 0044-4448.
 11. Сотников Е. А., Холодняк П. С. Эффективность повышения скорости движения поездов по стрелочным горловинам станций на боковой путь // Вестник ВНИИЖТ. 2014. № 1. С. 25–29. ISSN 2223-9731.
 12. Бессоненко С. А., Климова Е. В., Югрин О. П. Влияние скоростей движения поездов на показатели работы железной дороги // Железнодорожный транспорт. 2017. № 3. С. 54–57. ISSN 0044-4448.
 13. Шарапов С. Н. Экономическая оценка повышения установленных скоростей движения грузовых поездов // Железнодорожный транспорт. 2017. № 3. С. 25–29. ISSN 0044-4448.
 14. Виноградов С. А., Новгородцева А. В. О влиянии скорости движения грузовых поездов на эксплуатационные показатели // Железнодорожный транспорт. 2017. № 3. С. 15–18. ISSN 0044-4448.
 15. Сай В. М., Жироухов Е. И. Повышение провозной способности напряженных участков железных дорог // Наука и транспорт. 2006. № 5. С. 22–25. ISSN 2306-9112.
 16. Голиков А. Ф., Рудых Е. А. Использование современных программно-аппаратных средств при вождении поездов повышенной массы и длины на Забайкальской железной дороге Восточного полигона // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. 2018. Т. 2. С. 231–234.
 17. Сотников Е. А., Холодняк П. С. Изменения пропускной и провозной способностей высокозагруженных направлений при организации движения соединенных поездов на постоянной основе // Вестник ВНИИЖТ. 2019. Т. 78. № 5. С. 259–265. ISSN 2223-9731.
 18. Кузьмина Н. А. Исследование условий для вождения соединенных поездов на полигоне ДВЖД // International Journal of Advanced Studies. 2020. Vol. 10. No. 3. Pp. 46–63. ISSN 2227-930X.
 19. мероприятий, направленных на улучшение показателей работы участка на основе исследования системных связей и закономерностей функционирования железнодорожной транспортной системы / В. А. Оленцевич, В. Е. Гозбенко, С. К. Каргапольцев, Г. Н. Крамынина // Modern technologies. System analysis. Modeling. 2019. No. 3 (63). Pp. 171–179. DOI: 10.26731/1813-9108.2019.3(63).171-179. ISSN 1813-9108.
 6. Balenko V. V., Kalikina T. N., Keyno M. Yu. Analysis of measures to increase the capacity of far eastern railroad [Analiz meropriyatiy, neobkhodimyykh dlya povysheniya propusknoy sposobnosti Vostochnogo poligona] // Herald of the Traction and Rolling Stock Institute. 2016. No. 12. Pp. 100–103.
 7. Borodin A. F., Storchak M. V. Scientific assessment of the modernizing prospects for the Eastern operating domain of the Russian Railways network [Nauchnaya otsenka perspektiv modernizatsii Vostochnogo poligona seti Rossiyskikh zheleznykh dorog] // Bulletin of Joint Scientific Council of JSC Russian Railways. 2017. No. 2. Pp. 65–73. ISSN 2304-9642.
 8. Rozenberg E. N., Ozerov A. V., Panferov I. A. Integrated approach to increase railway capacity [O kompleksnom podkhode k resheniyu zadachi povysheniya propusknoy sposobnosti] // Automation, communication, informatics. 2022. No. 8. Pp. 2–6. ISSN 0005-2329.
 9. Zubkov V. N., Ryzanova E. V., Chebotareva E. A. Speed of trains is an indicator of quality of passenger service and freight transportation [Skorost' dvizheniya poezdov — indikator kachestva perevozok passazhirov i gruzov] // Railway Transport. 2017. No. 3. Pp. 45–51. ISSN 0044-4448.
 10. Kurbasov A. S. Increase of goods transportation speed as a factor of increase of economic efficiency of railways [Uvelichenie skorostey perevozki gruzov kak faktor povysheniya ekonomicheskoy effektivnosti zheleznykh dorog] // Railway Transport. 2010. No. 4. Pp. 71–73. ISSN 0044-4448.
 11. Sotnikov E. A., Kholodnyak P. S. Speed increase efficiency of trains following the diverging paths of station necks' turnouts [Effektivnost' povysheniya skorosti dvizheniya poezdov po strelochnym gorlovinam stantsiy na bokovoy put'] // VNIIZhT Scientific Journal. 2014. No. 1. Pp. 25–29. ISSN 2223-9731.
 12. Bessonenko S. A., Klimova E. V., Yugrina O. P. Influence of train speed on operational indicators of a railway [Vliyaniye skorostey dvizheniya poezdov na pokazateli raboty zheleznoy dorogi] // Railway Transport. 2017. No. 3. Pp. 54–57. ISSN 0044-4448.
 13. Sharapov S. N. Economic assessment of increasing the governed speeds of movement of freight trains [Ekonomicheskaya otsenka povysheniya ustanovlennykh skorostey dvizheniya gruzovykh poezdov] // Railway Transport. 2017. No. 3. Pp. 25–29. ISSN 0044-4448.
 14. Vinogradov S. A., Novgorodtseva A. V. On influence of train speed on operational indicators [O vliyaniy skorosti dvizheniya gruzovykh poezdov na ekspluatatsionnye pokazateli] // Railway Transport. 2017. No. 3. Pp. 15–18. ISSN 0044-4448.
 15. Say V. M., Zhiroukhov E. I. Increase of carrier capacity of intense sections of railways [Povyseniye provoznoy sposobnosti napryazhennykh uchastkov zheleznykh dorog] // Science and Transport. 2006. No. 5. Pp. 22–25. ISSN 2306-9112.
 16. Golikov A. F., Rudykh E. A. The use of modern hardware and software at handling of freight trains with increased weight and length at the Zabaikal Railway of the Eastern polygon [Ispol'zovanie sovremennykh programmo-apparatnykh sredstv pri vozhenii poezdov povyshennoy massy i dliny na Zabaykal'skoy zheleznoy doroge Vostochnogo poligona] // Transport infrastructure of the Siberian Region. 2018. Vol. 2. Pp. 231–234.
 17. Sotnikov E. A., Kholodnyak P. S. Changes in the carriage and traffic capacity along highly busy routes in case of traffic scheduling for permanently linked multiple trains [Izmeneniya propusknoy i provoznoy sposobnostey vysokozagruzhennykh napravleniy pri organizatsii dvizheniya soedinennykh poezdov na postoyannoy osnove] // VNIIZhT Scientific Journal. 2019. Vol. 78. No. 5. Pp. 259–265. ISSN 2223-9731.
 18. Kuz'mina N. A. Study of conditions for driving connected trains on the first range [Issledovanie usloviy dlya vozheniya soedinennykh poezdov na poligone DVZhD] // International Journal of Advanced Studies. 2020. Vol. 10. No. 3. Pp. 46–63. ISSN 2227-930X.
 19. Byshlyago A. A., Dudakova A. V. About of the organization of railway traffic with united freight train in order to increase a low-traffic capacity of Baykal-Amur railroad [Ob organizatsii propuska soedinennykh poezdov v tselyakh povysheniya provoznoy i propusknoy sposobnostey Baykalo-Amur-

19. Бышляго А. А., Дудакова А. В. Об организации пропуска соединенных поездов в целях повышения провозной и пропускной способностей Байкало-Амурской магистрали // Молодая наука Сибири. 2018. № 1 (1). С. 1–7. ISSN 2658-610X.
20. Егорова Е. В., Куклева Н. В. Обоснование вариантов повышения пропускной способности станции при работе с соединенными поездами // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке. 2016. Т. 1. С. 159–162.
21. Сокращение срока доставки грузов за счет организации движения соединенных грузовых поездов в период предоставления «окон» / О. В. Москвичев, В. И. Александров, Е. В. Александров [и др.] // Наука и образование транспорту. 2018. Т. 1. С. 95–97.
22. Климова Е. В. Методика оценки эффективности формирования и пропуска соединенных грузовых поездов на участках и полигонах железных дорог // Вестник СГУПС. 2015. № 4 (35). С. 19–23. ISSN 1815-9265.
23. Румянцев С. В. Вождение поездов в системе интервального регулирования по технологии «виртуальная сцепка» // Локомотив. 2019. № 12 (756). С. 2–3. ISSN 0869-8147.
24. Дежков М. А., Кисельгоф Г. К. Технология «виртуальная сцепка» для интервального регулирования движения поездов // Автоматика, связь, информатика. 2021. № 11. С. 28–30. ISSN 0005-2329.
25. Шухина Е. Е., Кисельгоф Г. К. Развитие локомотивных систем безопасности и управления // Железнодорожный транспорт. 2020. № 4. С. 51–54. ISSN 0044-4448.
26. Бушуев С. В., Гундырев К. В., Голочалов Н. С. Повышение пропускной способности участка железной дороги с применением технологии виртуальной сцепки // Автоматика на транспорте. 2021. Т. 7. № 1. С. 7–20. ISSN 2412-9186.
27. Эффективность пропуска спаренных грузовых поездов / В. А. Эсаулов, Б. И. Давыдов, К. Н. Никитенко, А. Г. Лазарев // Наука и техника транспорта. 2022. № 2. С. 69–78. ISSN 2074-9325.
28. Оценка совместимости системы тягового электроснабжения при внедрении интервального регулирования движения поездов по технологии «виртуальная сцепка» / Н. П. Асташков, В. А. Оленцевич, Ю. И. Белоголов, В. В. Кашковский // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2020. № 3 (67). С. 173–180. DOI: 10.26731/1813-9108.2020.3(67). 173-180. ISSN 1813-9108.
29. Оценка энергетической эффективности электровозов ЗЭС5К при использовании технологии интервального регулирования движения по типу «виртуальная сцепка» / С. В. Власьевский, О. А. Малышева, Н. Г. Шабалин, В. В. Семченко // Вестник ВНИИЖТ. 2020. Т. 79. № 1. С. 17–25. ISSN 2223-9731.
30. Баева И. А. Влияние снижения времени межпоездного интервала на технико-энергетические показатели системы тягового нерегулируемого и регулируемого электроснабжения // Инновационный транспорт. 2020. № 1 (35). С. 51–55. DOI: 10.20291/2311-164X-2020-1-51-55. ISSN 2311-164X.
31. Оленцевич В. А., Упырь Р. Ю., Антипина А. А. Эффективность внедрения интервального регулирования движения поездов по системе «виртуальная сцепка» на участке // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2020. № 2 (66). С. 182–189. DOI: 10.26731/1813-9108.2020.2(66).182-189. ISSN 1813-9108.
- skoy magistrali] // Young Science of Siberia. 2018. No. 1 (1). Pp. 1–7. ISSN 2658-610X.
20. Egorova E. V., Kukleva N. V. Justification options to improve throughput of the station during the work with the united trains [Obosnovanie variantov povysheniya propusknoy sposobnosti stantsii pri rabote s soedinennymi poezdami] // Scientific, technical and economic cooperation of the Asia-Pacific countries in the XXI century. 2016. Vol. 1. Pp. 159–162.
21. Decrease of goods delivery time by organization of united trains service in period of breaks in train schedule [Sokrashhenie sroka dostavki грузов за schet organizatsii dvizheniya soedinennykh gruzovykh poezdov v period predostavleniya «okon»] / O. V. Moskvichev, V. I. Alexandrov, E. V. Alexandrov [et al.] // Science and education for transport. 2018. Vol. 1. Pp. 95–97.
22. Klimova E. V. The Method of Estimating of the Efficiency of Coupled Freight Trains Formation and Their Handling on the Railroad Sections and Railway Operating Domains [Metodika otsenki effektivnosti formirovaniya i propuska soedinennykh gruzovykh poezdov na uchastkakh i poligonakh zheleznykh dorog] // The Siberian Transport University Bulletin. 2015. No. 4 (35). Pp. 19–23. ISSN 1815-9265.
23. Rumyantsev S. V. Train handling in the system of interval control by the «virtual coupling» technology [Vozhdenie poezdov v sisteme interval'nogo regulirovaniya po tekhnologii «virtual'naya stsepka»] // Locomotive. 2019. No. 12 (756). Pp. 2–3. ISSN 0869-8147.
24. Dezhkov M. A., Kisel'gof G. K. Virtual coupling technology for interval regulation of train traffic [Tekhnologiya «virtual'naya stsepka» dlya interval'nogo regulirovaniya dvizheniya poezdov] // Automation, communication, informatics. 2021. No. 11. Pp. 28–30. ISSN 0005-2329.
25. Shukhina E. E., Kisel'gof G. K. Development of locomotive safety and control systems [Razvitie lokomotivnykh sistem bezopasnosti i upravleniya] // Railway Transport. 2020. No. 4. Pp. 51–54. ISSN 0044-4448.
26. Bushuev S. V., Gundyrev K. V., Golochalov N. S. Increasing the capacity of the railway section with the use of virtual coupling technology [Povyshenie propusknoy sposobnosti uchastka zheleznoy dorogi s primeneniem tekhnologii virtual'noy stsepki] // Automation on Transport. 2021. Vol. 7. No. 1. Pp. 7–20. ISSN 2412-9186.
27. Efficiency of passing double freight trains [Effektivnost' propuska sparnykh gruzovykh poezdov] / V. A. Esaulov, B. I. Davydov, K. N. Nikitenko, A. G. Lazarev // Science and Technology in transport. 2022. No. 2. Pp. 69–78. ISSN 2074-9325.
28. Evaluation of the compatibility of the traction power supply system during implementation of train traffic separation using the «virtual coupling» technology [Otsenka sovmestimosti sistemy tyagovogo elektro-snabzheniya pri vnedrenii interval'nogo regulirovaniya dvizheniya poezdov po tekhnologii «virtual'naya stsepka»] / N. P. Astashkov, V. A. Olen-tsevich, Yu. I. Belogolov, V. V. Kashkovskiy // Modern technologies. System analysis. Modeling. 2020. No. 3 (67). Pp. 173–180. DOI: 10.26731/1813-9108.2020.3(67).173-180. ISSN 1813-9108.
29. Energy efficiency assessment of the 3ES5K electric locomotives when using interval regulation technology in the form of «virtual coupling» [Otsenka energeticheskoy effektivnosti elektrovozov 3ES5K pri ispol'zovani-i tekhnologii interval'nogo regulirovaniya dvizheniya po tipu «virtual'naya stsepka»] / S. V. Vlasyshevskiy, O. A. Malysheva, N. G. Shabalin, V. V. Semchenko // VNIIZhT Scientific Journal. 2020. Vol. 79. No. 1. Pp. 17–25. ISSN 2223-9731.
30. Baeva I. A. The effect of time reducing of train-to-train margin on the technical and energy indicators of the system of traction unregulated and regulated power supply [Vliyanie snizheniya vremeni mezhpoezd-nogo intervala na tekhniko-energeticheskie pokazateli sistemy tyagovogo nereguliruемого i reguliruемого elektro-snabzheniya] // Innotrans. 2020. No. 1 (35). Pp. 51–55. DOI: 10.20291/2311-164X-2020-1-51-55. ISSN 2311-164X.
31. Olen-tsevich V. A., Upyr' R. Yu., Antipina A. A. The efficiency of implemen-tation of train movement separation according to a «virtual coupling» system at a section [Effektivnost' vnedreniya interval'nogo regulirovaniya dvizheniya poezdov po sisteme «virtual'naya stsepka» na uchastke] // Modern technologies. System analysis. Modeling. 2020. No. 2 (66). Pp. 182–189. DOI: 10.26731/1813-9108.2020.2(66).182-189. ISSN 1813-9108.

32. Капустин Н. И., Капустина Е. П., Потрахов С. Д. Интервальное регулирование движения поездов на полигонах сети железных дорог // Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте. Компьютерное и математическое моделирование (ИСУЖТ-2019) : труды Восьмой научно-технической конференции, Москва, 21 ноября 2019 г. Москва : АО «НИИАС», 2019. С. 70–74.
33. Кокурин И. М. Решения задач интервального разграничения поездов // Автоматика на транспорте. 2021. Т. 7. № 3. С. 438–451. ISSN 2412-9186.
34. Васильев А. Б. Влияние систем интервального регулирования движения поездов на межпоездной и станционный интервалы // Вестник транспорта Поволжья. 2014. № 4 (46). С. 86–96. ISSN 1997-0722.
35. Использование пропускной способности станций при интервальном регулировании движения поездов / А. Ф. Бородин, Г. Г. Горбунов, А. Ю. Соколов [и др.] // Железнодорожный транспорт. 2021. № 2. С. 29–36. ISSN 0044-4448.
36. Сокращение интервала следования поездов на МЦК / И. Р. Гургендидзе, Д. С. Склярчук, В. С. Лобанова, А. И. Кузьмин // Железнодорожный транспорт. 2020. № 4. С. 48–50. ISSN 0044-4448.
37. Левин Д. Ю., Соколова В. Б. Резервы пропускной способности железных дорог // Мир транспорта. 2018. Т. 16. № 5. С. 146–159. ISSN 1992-3252.
38. Куренков П., Солоп И., Чеботарева Е. Подвижные блок-участки и виртуальные сцепки как инновационные составляющие транспортно-логистической инфраструктуры // Логистика. 2021. № 1 (170). С. 30–34. ISSN 2219-7222.
39. Воронин В. А., Воробьев В. В., Есырев С. Н. АЛСО с подвижными блок-участками // Автоматика, связь, информатика. 2011. № 6. С. 44–45. ISSN 0005-2329.
40. Гордиенко А. А., Зубков В. Н., Мусиенко Н. Н. Повышение пропускной способности на лимитирующих участках Северо-Кавказской железной дороги за счет интервального регулирования движения поездов // Транспорт и логистика: стратегические приоритеты, технологические платформы и решения в глобализованной цифровой экономике : сборник научных трудов III Международной научно-практической конференции. Ростов-на-Дону : РГУПС, 2019. С. 98–102.
41. Инновационные элементы инфраструктуры железнодорожного комплекса: оценка технологий и показателей эксплуатационной работы / В. А. Воронин, С. А. Филипченко, П. В. Куренков [и др.] // Транспорт: наука, техника, управление. 2021. № 3. С. 18–22. ISSN 0236-1914.
42. Воронин В. А. Многозначная АЛС на участках АЛСО с ПБУ // Автоматика, связь, информатика. 2022. № 7. С. 2–5. ISSN 0005-2329.
43. Воронин В. А., Малахин Н. Б. О современных системах интервального регулирования в пределах станции // Автоматика, связь, информатика. 2014. № 3. С. 12–14. ISSN 0005-2329.
44. Новиков В. Г. Координатная система интервального регулирования движения поездов с расширенными функциональными возможностями локомотивного устройства : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва, 2011. 23 с.
45. Шаманов В. И. Системы интервального регулирования движения поездов с цифровыми радиоканалами // Автоматика на транспорте. 2018. Т. 4. № 2. С. 223–240. ISSN 2412-9186.
32. Kapustin N. I., Kapustina E. P., Potrakhov S. D. Interval control of train movement on railway polygons [Interval'noe regulirovanie dvizheniya poezdov na poligonakh seti zheleznykh dorog] // Intelligent control systems on railway transport. Computer and mathematical modeling (ISUZhT-2019) : proceedings of 8th scientific and technical conference, Moscow, 21 November, 2019. Moscow : JSC «NIIAS», 2019. Pp. 70–74.
33. Kokurin I. M. Solution of problems for interval train separation [Resheniya zadach interval'nogo razgranicheniya poezdov] // Automation on Transport. 2021. Vol. 7. No. 3. Pp. 438–451. ISSN 2412-9186.
34. Vasilyev A. B. Impact of trains movement interval regulation on train-to-train and station intervals [Vliyaniye sistem interval'nogo regulirovaniya dvizheniya poezdov na mezhpoezdnoy i stantsionnyy intervaly] // Bulletin of transport of the Volga region. 2014. No. 4 (46). Pp. 86–96. ISSN 1997-0722.
35. Utilization of traffic capacity of stations at interval control of train movement [Ispol'zovaniye propusknoy sposobnosti stantsiy pri interval'nom regulirovanii dvizheniya poezdov] / A. F. Borodin, G. G. Gorbunov, A. Yu. Sokolov [et al.] // Railway Transport. 2021. No. 2. Pp. 29–36. ISSN 0044-4448.
36. Decrease of train-to-train interval at the Moscow Central Ring [Sokrascheniye intervala sledovaniya poezdov na MTsK] / I. R. Gurgendize, D. S. Sklyarchuk, V. S. Lobanova, A. I. Kuzmin // Railway Transport. 2020. No. 4. Pp. 48–50. ISSN 0044-4448.
37. Levin D. Yu., Sokolova V. B. Reserves for increasing railway capacity [Rezervy propusknoy sposobnosti zheleznykh dorog] // World of Transport and Transportation. 2018. Vol. 16. No. 5. Pp. 146–159. ISSN 1992-3252.
38. Kurenkov P., Solop I., Chebotareva E. Mobile block sections and virtual hitches as innovative components of transport and logistics infrastructure [Podvizhnye blok-uchastki i virtual'nye stsepki kak innovatsionnye sostavlyayushhie transportno-logicheskoy infrastruktury] // Logistics. 2021. No. 1 (170). Pp. 30–34. ISSN 2219-7222.
39. Voronin V. A., Vorobyev V. V., Esyrev S. N. ACS with movable block sections [ALSO s podvizhnymi blok-uchastkami] // Automation, communication, informatics. 2011. No. 6. Pp. 44–45. ISSN 0005-2329.
40. Gordienko A. A., Zubkov V. N., Musienko N. N. Increase of traffic capacity on limiting sections of the North Caucasus Railway railway by means of interval control of train movement [Povysheniye propusknoy sposobnosti na limitiruyushhikh uchastkakh Severo-Kavkazskoy zheleznoy dorogi za schet interval'nogo regulirovaniya dvizheniya poezdov] // Transport and logistics: strategic priorities, technological platforms and solutions in global digital economy : collection of scientific papers of 3rd International research and practice conference. Rostov-on-Don : RSTU, 2019. Pp. 98–102.
41. Innovative infrastructure elements railway complex: assessment of technologies and operational performance indicators [Innovatsionnye elementy infrastruktury zheleznodorozhnogo kompleksa: otsenka tekhnologii i pokazateley ekspluatatsionnoy raboty] / V. A. Voronin, S. A. Filipchenko, P. V. Kurenkov [et al.] // Transport: science, equipment, management. 2021. No. 3. Pp. 18–22. ISSN 0236-1914.
42. Voronin V. A. Multivalued ACS on sections with movable block sections [Mnogoznachnaya ALS na uchastkakh ALSO s PBU] // Automation, communication, informatics. 2022. No. 7. Pp. 2–5. ISSN 0005-2329.
43. Voronin V. A., Malakhin N. B. On modern systems of interval control within the framework of a station [O sovremennykh sistemakh interval'nogo regulirovaniya v predelakh stantsii] // Automation, communication, informatics. 2014. No. 3. Pp. 12–14. ISSN 0005-2329.
44. Novikov V. G. Coordinate system of interval control of train movement with extended functional possibilities of a locomotive device [Koordinatnaya sistema interval'nogo regulirovaniya dvizheniya poezdov s rasshirennyimi funktsional'nymi vozmozhnostyami lokomotivnogo ustroystva] : Synopsis of PhD in Engineering Thesis. Moscow, 2011. 23 p.
45. Shamanov V. I. Systems interval regulation of traffic c trains with digital radio channels [Sistemy interval'nogo regulirovaniya dvizheniya poezdov s tsifrovymi radiokanalami] // Automation on Transport. 2018. Vol. 4. No. 2. Pp. 223–240. ISSN 2412-9186.
46. Baranov L. A. Evaluation of metro train succession time for safety systems based on radio channel [Otsenka intervala poputnogo sledovaniya metro-poezdov dlya sistem bezopasnosti na baze radiokanala] // World of Transport and Transportation. 2015. Vol. 13. No. 2 (57). Pp. 6–19. ISSN 1992-3252.

46. Баранов Л. А. Оценка интервала попутного следования метропоездов для систем безопасности на базе радиоканала // Мир транспорта. 2015. Т. 13. № 2 (57). С. 6–19. ISSN 1992-3252.
47. Шухина Е. Е., Низовский А. В. Системы обеспечения безопасности движения поездов на базе радиоканала // Автоматика, связь, информатика. 2016. № 10. С. 25–26. ISSN 0005-2329.
48. Кириллова С. Ю., Николаев К. Ю. К определению коэффициентов съема пропускной способности участков железных дорог // Вестник ВНИИЖТ. 2020. Т. 79. № 4. С. 230–238. ISSN 2223-9731.
49. Сотников Е. А., Шенфельд К. П. Неравномерность грузовых перевозок в современных условиях и ее влияние на требуемую пропускную способность участков // Вестник ВНИИЖТ. 2011. № 5. С. 3–9. ISSN 2223-9731.
50. Варианты организации пропуска поездов при капитальном ремонте технических устройств на двухпутных линиях / В. В. Яхимович, А. В. Дмитренко, Г. И. Суханов, А. Н. Рожков // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2012. № 3 (35). С. 176–183. ISSN 1813-9108.
51. Тимченко В. С. Комплексная оценка пропускной способности железнодорожной линии в условиях реконструкции на основе имитации // Развитие территориальных социально-экономических систем: вопросы теории и практики: сборник научных статей XV Международной научно-практической конференции молодых ученых. Екатеринбург: Институт экономики УрО РАН, 2017. С. 164–167.
52. Зубков В. Н., Дутаев А. В. Способы повышения пропускной способности участков дороги в периоды предоставления «окон» для выполнения ремонтных работ // Вестник РГУПС. 2008. № 1 (29). С. 83–88. ISSN 0201-727X.
53. Мехедов М. И., Мугинштейн Л. А. О процессе взаимодействия технических станций и перегонов при пропуске поездопотоков // Вестник ВНИИЖТ. 2020. Т. 79. № 2. С. 59–65. ISSN 2223-9731. ISSN 2223-9731.
54. Мехедов М. И., Мугинштейн Л. А. О проблемах организации движения и эффективности использования пропускных способностей станций // Железнодорожный транспорт. 2015. № 7. С. 20–27. ISSN 0044-4448.
55. Мугинштейн Л. А., Мехедов М. И. Вопросы организации стабильного пропуска транзитных грузовых поездов на направлениях железных дорог с учетом технических и технологических особенностей работы технических станций и перегонов // Вестник ВНИИЖТ. 2016. Т. 75. № 1. С. 3–11. ISSN 2223-9731.
56. Мугинштейн Л. А., Мехедов М. И. Методические подходы к выявлению факторов, влияющих на стабильность пропуска поездопотоков // Вестник ВНИИЖТ. 2014. № 2. С. 24–32. ISSN 2223-9731.
57. Управление потоком поездов на основе интеллектуализации локомотива и цифровой радиосвязи: отчет о НИР / УрГУПС: рук. Бушуев С. В. Екатеринбург, 2020. № гос. регистрации АААА-А20-120042190034-0.
47. Shukhina E. E., Nizovskiy A. V. Communications-based train protection systems [Sistemy obespecheniya bezopasnosti dvizheniya poezdov na baze radiokanala] // Automation, communication, informatics. 2016. No. 10. Pp. 25–26. ISSN 0005-2329.
48. Kirillova S. Yu., Nikolaev K. Yu. To the determination of the capacity descheduling coefficients of railway sections [K opredeleniyu koeffitsientov s"ema propusknoy sposobnosti uchastkov zheleznykh dorog] // VNIIZhT Scientific Journal. 2020. Vol. 79. No. 4. Pp. 230–238. ISSN 2223-9731.
49. Sotnikov E. A., Shenfeld K. P. Irregularity of freight transportation under contemporary conditions and its influence on required traffic capacity of line sections [Neravnomernost' gruzovykh perevozok v sovremennykh usloviyakh i ee vliyaniye na potrebnuyu propusknyuyu sposobnost' uchastkov] // VNIIZhT Scientific Journal. 2011. No. 5. Pp. 3–9. ISSN 2223-9731.
50. Variants of organization of trains admission at major repairs of technical devices on double-track lines [Varianty organizatsii propuska poezdov pri kapital'nom remonte tekhnicheskikh ustroystv na dvukhputnykh liniyakh] / V. V. Yakhimovich, A. V. Dmitrenko, G. I. Sukhanov, A. N. Rozhkov // Modern technologies. System analysis. Modeling. 2012. № 3 (35). Pp. 176–183. ISSN 1813-9108.
51. Timchenko V. S. Complex assessment of traffic capacity of railway line in conditions of reconstruction on the basis of simulation [Kompleksnaya otsenka propusknoy sposobnosti zheleznodorozhnoy linii v usloviyakh rekonstruktsii na osnove imitatsii] // Development of territorial social and economic systems: questions of theory and practice: collection of papers of XV International research and practice conference of young scientists. Ekaterinburg: IE UB RAS, 2017. Pp. 164–167.
52. Zubkov V. N., Dutaev A. V. Ways to increase traffic capacity of railway sections in periods of breaks in train schedule for repairs [Sposoby povysheniya propusknoy sposobnosti uchastkov dorogi v periody predostavleniya «okon» dlya vypolneniya remontnykh rabot] // Vestnik RGUPS. 2008. No 1 (29). Pp. 83–88. ISSN 0201-727X.
53. Mekhedov M. I., Muginshiteyn L. A. On the process of interaction of technical stations and hauls when passing train flows [O protsesse vzaimodeystviya tekhnicheskikh stantsiy i peregonov pri propuske poezdopotokov] // VNIIZhT Scientific Journal. 2020. Vol. 79. No. 2. Pp. 59–65. ISSN 2223-9731.
54. Mekhedov M. I., Muginshiteyn L. A. On problems of organization of service and efficiency of utilization of traffic capacities of stations [O problemakh organizatsii dvizheniya i effektivnosti ispol'zovaniya propusknykh sposobnostey stantsiy] // Railway Transport. 2015. No. 7. Pp. 20–27. ISSN 0044-4448.
55. Muginshiteyn L. A., Mekhedov M. I. Issues of organization of stable passage of transit freight trains on the railway lines in accordance with technical and technological features of operation of technical stations and running sections [Voprosy organizatsii stabil'nogo propuska tranzitnykh gruzovykh poezdov na napravleniyakh zheleznykh dorog s uchedom tekhnicheskikh i tekhnologicheskikh osobennostey raboty tekhnicheskikh stantsiy i peregonov] // VNIIZhT Scientific Journal. 2016. Vol. 75. No. 1. Pp. 3–11. ISSN 2223-9731.
56. Muginshiteyn L. A., Mekhedov M. I. Methodological approaches to revelation of factors influencing the stability of train flow handling [Metodicheskie podkhody k vyyavleniyu faktorov, vliyayushchikh na stabil'nost' propuska poezdopotokov] // VNIIZhT Scientific Journal. 2014. No. 2. Pp. 24–32. ISSN 2223-9731.
57. Control of train traffic on the basis of intellectualization of a locomotive and digital radio communications [Upravlenie potokom poezdov na osnove intellektualizatsii lokomotiva i tsifrovoy radiosvyazi]: report on research / USURT: project chairman Bushuev S. V. Ekaterinburg, 2020. State registration No. АААА-А20-120042190034-0.

Объем статьи 1,4 авторских листа

УДК 621.391

Руслан Рифович Юсупов, кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» Самарского государственного университета путей сообщения (СамГУПС), Самара, Россия,

Алексей Сергеевич Хохрин, аспирант кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» Самарского государственного университета путей сообщения (СамГУПС), Самара, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ КОРРЕЛЯЦИОННОГО ПРИЕМНИКА С КВАДРАТУРНЫМИ КАНАЛАМИ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ЛОКОМОТИВНОЙ СИГНАЛИЗАЦИИ НЕПРЕРЫВНОГО ТИПА В НОМИНАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Ruslan Rifovich Yusupov, PhD in Engineering, Associate Professor, Automation, Telemechanics and Communication in Railway Transport Department, Samara State Transport University (SSTU), Samara, Russia,

Alexey Sergeevich Khokhrin, postgraduate student, Automation, Telemechanics and Communication in Railway Transport Department, Samara State Transport University (SSTU), Samara, Russia

Study of operation of correlation receiver with quadrature continuously working automatic cab signalling channels in nominal conditions of operation

Аннотация

В статье рассматривается процесс функционирования корреляционного приемника с квадратурными каналами (КПКК) в номинальных условиях эксплуатации, т. е. когда на входе приемника действует только полезный сигнал, уровень которого соответствует номинальному напряжению на входе блока электроники БЭЛ2М2 комплексного локомотивного устройства безопасности КЛУБ-У. Исследования проводились при помощи имитационного моделирования в среде Simulink. Эксперимент на модели показал, что в ряде случаев происходит нарушение нормальной работы приемника из-за несовершенства алгоритма расчета плавающего порога принятия решения. Корректировка алгоритма обеспечила правильную работу приемника в рассматриваемых условиях. Также было определено, что реальная чувствительность приемника соответствует нормативным требованиям.

Ключевые слова: автоматическая локомотивная сигнализация, корреляционный приемник, квадратурный канал, квадратурный коррелятор, кодовая комбинация, пороговая чувствительность, имитационная модель, плавающий порог принятия решения.

Abstract

Development and implementation of receivers of CWACS channels on a microelectronic elemental base with digital processing of signals allowed using complicated methods (for example, correlation, non-linear) that couldn't be realized on an analogue elemental base. One of the devices, in which the similar methods are applied, is a correlation receiver with quadrature channels. The paper considers its operation in nominal conditions. The study was carried out by simulation modeling in the Simulink environment. An experiment on the model showed that the normative operation of the receiver in some cases is violated because of the imperfection of an algorithm for calculation of a floating threshold of decision making. Adjustment of the algorithm provided correct operation of the receiver in the considered conditions. Moreover, the authors have revealed that real sensitivity of the receiver match normative requirements.

Keywords: automatic cab signalling, correlation receiver, quadrature channel, quadrature correlator, code pattern, ultimate sensitivity, simulation model, floating threshold of decision making.

DOI: 10.20291/1815-9400-2023-1-51-58

ВВЕДЕНИЕ

Разработка и внедрение приемных устройств канала автоматической локомотивной сигнализации непрерывного типа (АЛСН) на микроэлектронной элементной базе с цифровой обработкой сигналов позволили использовать сложные (например, корреляционные, нелинейные) методы обработки и приема сигналов, принципиально не реализуемые на аналоговой элементной базе. Одно из устройств, в котором применяются подобные методы, — ранее предложенный автоами корреляционный приемник с квадратурными каналами (КПКК) [1].

Цель исследования, рассматриваемого в статье, заключалась в качественной оценке процесса функционирования КПКК в номинальных условиях эксплуатации и в определении соответствия его характеристик предъявляемым требованиям. Под номинальными понимались условия, когда на входе приемника отсутствуют помехи (принимается только полезный сигнал), а уровень принимаемого сигнала соответствует номинальному напряжению на входе блока электроники БЭЛ2М2 комплексного локомотивного устройства безопасности КЛУБ-У от приемных катушек на несущей частоте 50 Гц (280 мВ действующего значения напряжения при электротяге постоянного тока [2], что соответствует 400 мВ амплитудного значения сигнала АЛСН).

Согласно поставленной цели решались следующие задачи:

разработка имитационной модели установки для экспериментального исследования и оценки качества процесса функционирования КПКК в номинальных условиях эксплуатации;

определение пороговой чувствительности КПКК;

оценка величины искажений временных параметров сигнала на выходе КПКК.

Основным методом для достижения поставленной цели стало экспериментальное исследование при помощи имитационного моделирования на ЭВМ. Структурная схема экспериментальной установки показана на рис. 1.



Рис. 1. Структурная схема установки для исследования КПКК

В состав установки, помимо самого КПКК, входят генератор сигналов АЛСН (ГС АЛСН), а также устройство измерения и индикации (УИИ) (многоканальный осциллограф).

На основе структурной схемы (см. рис. 1) в среде Simulink [3] построена имитационная модель установки для исследования КПКК, блок-схема которой представлена на рис. 2. В имитационной модели все сигналы формируются и обрабатываются с частотой дискретизации 2 кГц — аналогу существующему приемнику канала АЛСН комплексного локомотивного устройства безопасности КЛУБ-У.

Имитационная модель генератора сигналов АЛСН, построенная на основе программы [4], позволяет формировать кодовые сигналы АЛСН для кодовых комбинаций «З», «Ж» и «КЖ» с длительностями кодового цикла 1,6 и 1,86 с, с произвольными частотой и начальной фазой несущей сигналов. Формирование сигналов осуществляется путем амплитудной манипуляции гармонической несущей прямоугольными видеоимпульсами огибающей сигнала. На рис. 3 представлены осциллограммы, поясняющие процесс формирования сигнала АЛСН (кодовой комбинации «З» с несущей частотой 50 Гц и длительностью кодового цикла 1,6 с). На осциллограммах сверху вниз показаны:

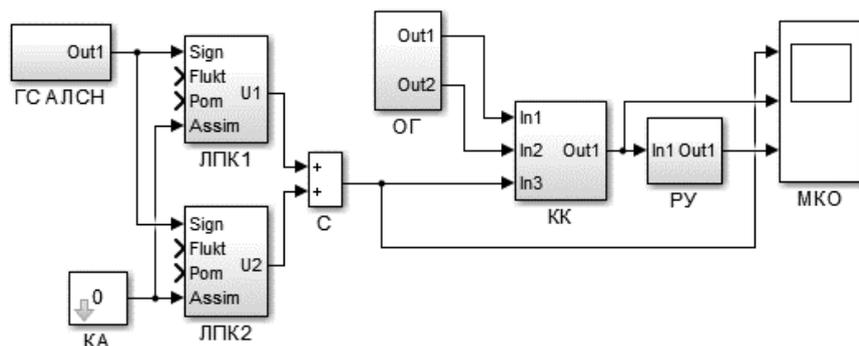


Рис. 2. Блок-схема имитационной модели установки для исследования КПКК

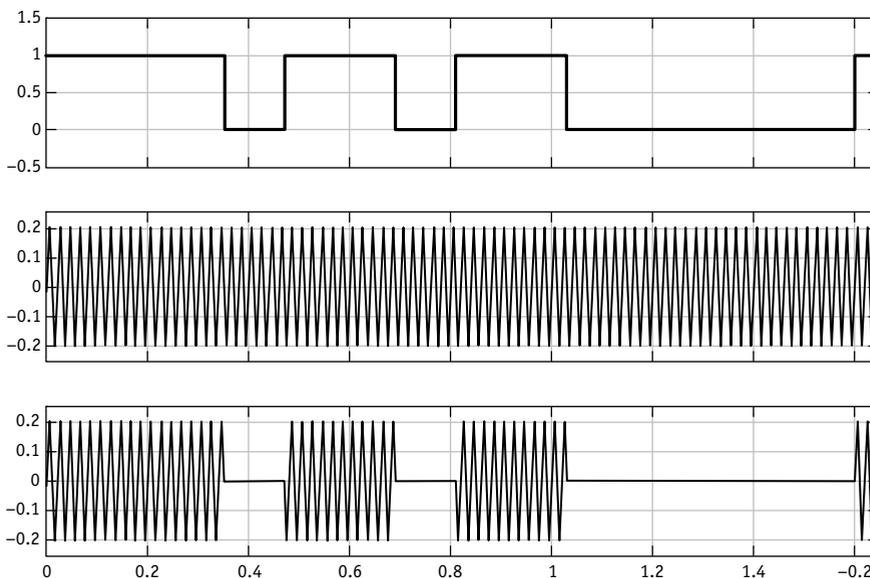


Рис. 3. Осциллограммы, поясняющие процесс формирования сигнала АЛСН

манипулирующий сигнал огибающей; непрерывное гармоническое колебание несущей; амплитудно-манипулированный сигнал АЛСН.

На всех осциллограммах рис. 3 и последующих рисунков по оси абсцисс показано модельное время (в секундах), по оси ординат — напряжение сигналов на входах или выходах блоков модели (в вольтах).

В состав имитационной модели КПКК входят:

блок коэффициента асимметрии (КА), в котором пользователь может вручную задавать в относительных единицах коэффициент асимметрии приемного тракта канала АЛСН; асимметрия приемного тракта включает в себя продольную асимметрию рельсовой линии, асимме-

трию электрических и магнитных параметров локомотивных приемных катушек ПК1 и ПК2, а также асимметрию их расположения относительно рельсов, обусловленную несимметрией их подвеса на локомотиве и колебаниями кузова локомотива в процессе движения;

модели локомотивных приемных катушек ЛПК1 и ЛПК2, в них учитывается согласное включение катушек для сигнала АЛСН и встречное — для помех, индуцируемых тяговым током;

сумматор (С), имитирующий последовательное согласное (для сигнала АЛСН) включение ЛПК1 и ЛПК2;

опорный генератор (ОГ), формирующий два опорных гармонических колебания с различающимися на 90° начальными фазами для двух квадратурных каналов;

Таблица 1

Определение пороговой чувствительности КПКК

Длительность кодовой комбинации, с	Тип кодовой комбинации	Пороговая чувствительность, мВ СКЗ	Критерий определения чувствительности
1,6	З	171,83	2
	Ж	170,40	2
	КЖ	176,00	2
1,86	З	171,83	2
	Ж	171,83	2
	КЖ	190,20	2

квадратурный коррелятор (КК), формирующий на своем выходе мгновенные значения огибающей принимаемого кодового сигнала АЛСН;

пороговое решающее устройство (РУ) с динамическим порогом принятия решения, формирующее на выходе КПКК логические импульсы принимаемой кодовой комбинации числового кода АЛСН.

Блок МКО на рис. 2 представляет собой многоканальный осциллограф с возможностью произвольного масштабирования сигналов по амплитуде и времени.

На имитационной модели установки для исследования КПКК были проведены эксперименты, направленные на решение сформулированных задач.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОРОГОВОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ КПКК

Пороговую чувствительность КПКК определяли как минимальное среднеквадратическое значение (СКЗ) сигнала на входе приемника, при котором он еще способен различать импульсы и интервалы кодовой комбинации (приемник работоспособен), при этом конкретные значения длительностей импульсов и интервалов не важны. В качестве выходной величины использован сигнал с выхода РУ, по осциллограмме которого определялась работоспособность приемника. В качестве входной величины, определяющей изменения выходной величины, принято СКЗ сигнала на входе приемника (на выходе блока С).

Методика определения пороговой чувствительности состоит в следующем. Эксперимент начинается с подачи на вход КПКК сигнала АЛСН с амплитудным значением 400 мВ, что соответствует СКЗ 283 мВ в импульсе сигнала, и с помощью МКО визуально оценивается качество работы КПКК по осциллограмме его выходного сигнала. Затем последовательно уменьшается амплитуда сигнала с шагом 1 мВ до тех пор, пока КПКК не потеряет работоспособность (перестанет безошибочно формировать логические импульсы и интервалы кодового сигнала на своем выходе).

Критерием потери работоспособности считается:

несоответствие количества импульсов на выходе приемника принимаемой кодовой комбинации;

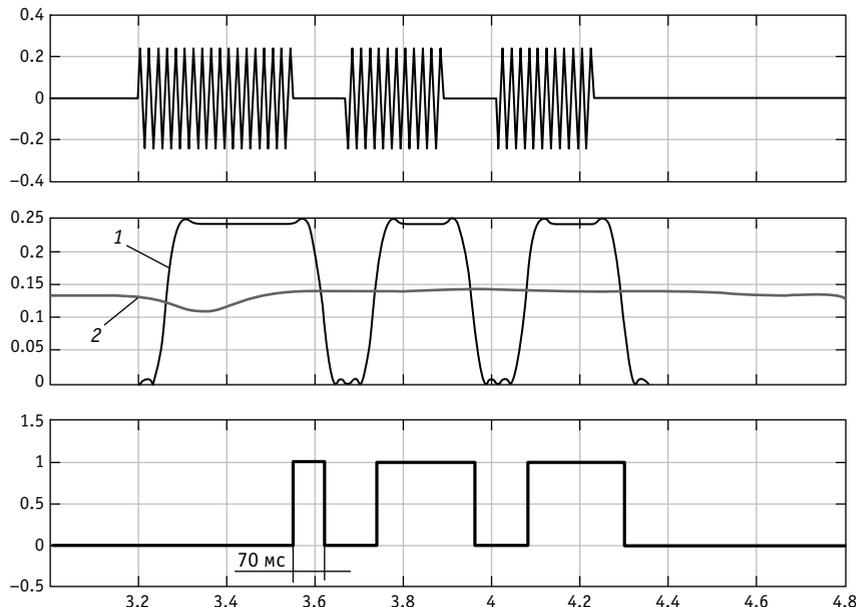


Рис. 4. Осциллограммы, демонстрирующие корректную работу приемника при амплитуде входного сигнала 243 мВ

при соответствии количества импульсов длительность любого импульса кодовой комбинации на выходе КПКК менее 70 мс.

Ограничение по минимальной длительности импульса обусловлено тем, что локомотивный дешифратор не гарантирует корректную дешифрацию импульсов длительностью менее 70 мс вследствие ограничения быстродействия реле-счетчиков по времени притяжения якоря порядка 60–70 мс [2]. Минимальное СКЗ сигнала, при котором приемник еще сохраняет работоспособность, определяет его пороговую чувствительность. Результаты исследования представлены в табл. 1.

В качестве примера рассмотрим определение пороговой чувствительности КПКК при приеме кодовой комбинации

«З» длительностью 1,6 с. На рис. 4 показаны осциллограммы, демонстрирующие корректную работу приемника при амплитуде входного сигнала 243 мВ (171,83 мВ СКЗ), а на рис. 5 — осциллограммы, демонстрирующие потерю работоспособности по второму критерию (длительность первого импульса уменьшилась ниже 70 мс) при амплитуде входного сигнала 242 мВ (171,12 мВ СКЗ). На обоих рисунках сверху вниз показаны осциллограммы сигналов:

- на входе приемника;
- огибающая сигнала на выходе КК (кривая 1) и динамический порог принятия решения (кривая 2);
- на выходе РУ приемника.

Таким образом, пороговая чувствительность приемника оказалась равной 190,2 мВ СКЗ. Согласно [2], пороговая

чувствительность локомотивного приемника канала АЛСН в устройстве КЛУБ-У при несущей частоте сигнала 50 Гц должна составлять 180–220 мВ СКЗ. Следовательно, пороговая чувствительность корреляционного приемника с квадратурными каналами соответствует данному требованию.

ОЦЕНКА ВЕЛИЧИНЫ ИСКАЖЕНИЙ ВРЕМЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ СИГНАЛА НА ВЫХОДЕ КПК

В качестве выходных величин в эксперименте приняты длительности импульсов и интервалов сигнала на выходе приемника. Их удобно оценивать по осциллограммам выходного сигнала приемника, полученным с помощью МКО. Наиболее информативна при этом кодовая комбинация «3», имеющая в своей структуре наибольшее количество импульсов и интервалов различной длительности. Соответственно в эксперименте определялись следующие временные параметры кодового сигнала АЛСН (кодовой комбинации «3» с нормативными длительностями кодового цикла 1,6 и 1,86 с): $\tau_{им1}$ — длительность первого импульса; $\tau_{ин1}$ — длительность первого интервала; $\tau_{им2}$ — длительность второго импульса; $\tau_{ин2}$ — длительность второго интервала; $\tau_{им3}$ — длительность третьего импульса; $\tau_{ин3}$ — длительность третьего интервала.

Входная величина — напряжение сигнала (его СКЗ) на входе приемника. В качестве минимального выбрано значение этого напряжения, соответствующее пороговой чувствительности приемника, — 190 мВ. Затем напряжение 190 мВ увеличивали с шагом 5–10 мВ до тех пор, пока временные параметры импульсов и интервалов кодовой комбинации не переставали изменяться.

Результаты эксперимента сведены в табл. 2–7 и сопоставлены с нормативными значениями длительностей импульсов и интервалов [2].

Данные табл. 2–7 показывают, что во всех кодовых комбинациях с изменением уровня входного сигнала изменяется только длительность первого импульса и последнего (длинного) интервала, длительности остальных импульсов и интервалов не меняются.

В табл. 2–7 в графе « $\tau_{им1}$ » данные вида «10/130/210» показывают, что имеет

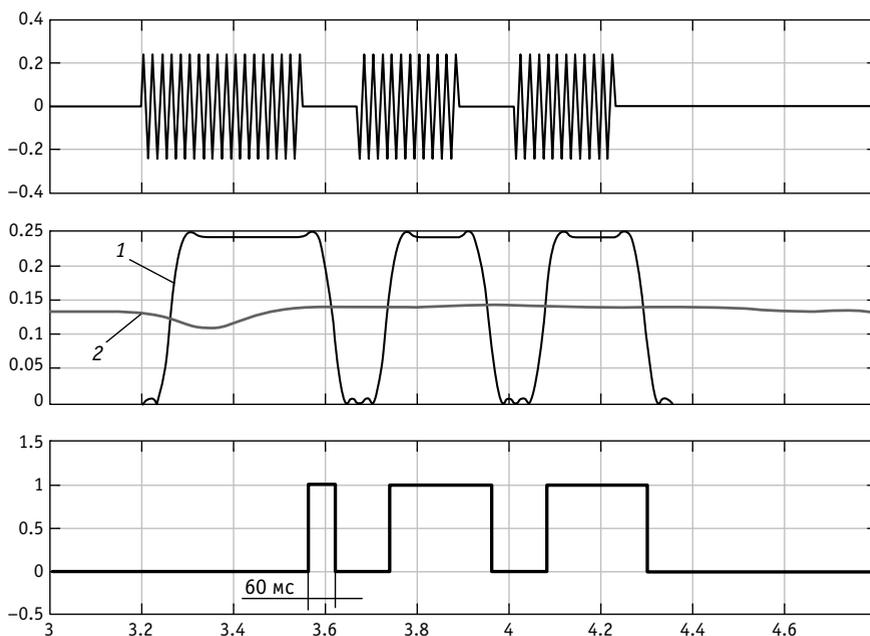


Рис. 5. Осциллограммы, демонстрирующие потерю работоспособности приемника при амплитуде входного сигнала 242 мВ

Таблица 2

Результаты измерения временных параметров выходного сигнала для кодовой комбинации «3» длительностью 1,6 с

Напряжение входного сигнала, амплитудное значение (СКЗ), мВ	Временные параметры, мс					
	$\tau_{им1}$	$\tau_{ин1}$	$\tau_{им2}$	$\tau_{ин2}$	$\tau_{им3}$	$\tau_{ин3}$
268,7 (190)	190	120	220	120	220	730
277,2 (196)	200	120	220	120	220	720
278,6 (197)	10/130/210	120	220	120	220	570
282,8 (200)	20/110/220	120	220	120	220	570
297,0 (210)	40/60/250	120	220	120	220	570
304,0 (215)	60/20/270	120	220	120	220	570
305,0 (216)	350	120	220	120	220	570
311,1 (220)	350	120	220	120	220	570
Нормативные значения временных параметров	350	120	220	120	220	570

место дробление первого импульса на импульс длительностью 10 мс, интервал длительностью 130 мс и импульс длительностью 210 мс. Подобная ситуация представлена на осциллограммах рис. 6.

На рис. 6 сверху вниз показаны: сигнал на входе приемника; огибающая сигнала на выходе КК (кривая 1), плавающий порог принятия решения (кривая 2) и порог ограничения чувствительности приемника (прямая 3); сигнал на выходе приемника.

Во всех рассмотренных случаях дробление первого импульса имело характер, подобный представленному на рис. 6.

Анализ осциллограмм показал, что причиной дробления импульса является снижение (провал) в конце длинного интервала кодового сигнала величины напряжения $U_{ппр}$ плавающего порога принятия решения ниже напряжения $U_{пoch}$ порога ограничения чувствительности приемника, заданного в модели на уровне 195 мВ.



Таблица 3

Результаты измерения временных параметров выходного сигнала для кодовой комбинации «Ж» длительностью 1,6 с

Напряжение входного сигнала, амплитудное значение (СКЗ), мВ	Временные параметры, мс			
	$\tau_{им1}$	$\tau_{ин1}$	$\tau_{им2}$	$\tau_{ин2}$
268,7 (190)	200	120	380	900
282,8 (200)	220	120	380	880
325,3 (230)	260	120	380	840
367,7 (260)	290	120	380	810
410,1 (290)	310	120	380	790
418,6 (296)	320	120	380	780
420,0 (297)	10/60/320	120	380	710
424,3 (300)	10/60/320	120	380	710
438,4 (310)	20/40/330	120	380	710
452,5 (320)	30/20/340	120	380	710
454,0 (321)	390	120	380	710
466,7 (330)	390	120	380	710
Нормативные значения временных параметров	380	120	380	720

Таблица 4

Результаты измерения временных параметров выходного сигнала для кодовой комбинации «КЖ» длительностью 1,6 с

Напряжение входного сигнала, амплитудное значение (СКЗ), мВ	Временные параметры, мс	
	$\tau_{им1}$	$\tau_{ин1}$
268,7 (190)	70	730
277,2 (196)	80	720
278,6 (197)	10/130/90	570
282,8 (200)	20/110/100	570
297,0 (210)	40/60/130	570
304,0 (215)	60/20/150	570
305,5 (216)	230	570
311,1 (220)	230	570
Нормативные значения временных параметров	230	570

Таблица 5

Результаты измерения временных параметров выходного сигнала для кодовой комбинации «З» длительностью 1,86 с

Напряжение входного сигнала, амплитудное значение (СКЗ), мВ	Временные параметры выходного сигнала, мс					
	$\tau_{им1}$	$\tau_{ин1}$	$\tau_{им2}$	$\tau_{ин2}$	$\tau_{им3}$	$\tau_{ин3}$
268,7 (190)	170	120	240	120	240	970
282,8 (200)	190	120	240	120	240	950
353,6 (250)	240	120	240	120	240	900
424,3 (300)	270	120	240	120	240	870
495,0 (350)	290	120	240	120	240	850
523,3 (370)	300	120	240	120	240	840
524,7 (371)	300	120	240	120	240	840
526,1 (372)	10/50/300	120	240	120	240	780
537,4 (380)	10/40/310	120	240	120	240	780
551,5 (390)	20/20/320	120	240	120	240	780
558,6 (395)	30/10/320	120	240	120	240	780
560,0 (396)	360	120	240	120	240	780
579,8 (410)	360	120	240	120	240	780
Нормативные значения временных параметров	350	120	240	120	240	790

Для устранения дробления первого импульса кодовой комбинации необходимо исключить на временном промежутке его существования снижение $U_{ппр}$ ниже $U_{поч}$ за счет корректировки алгоритма вычисления порога принятия решения.

На возникновение указанного провала влияют две величины, используемые в алгоритме расчета плавающего порога, изменять которые можно независимо друг от друга. Первая величина — коэффициент крутизны падения плавающего порога $K_{кп}$, численно равный отношению текущего значения $U_{ппр}$ к его предыдущему значению (в предыдущем цикле расчета порога принятия решения). Вторая величина — размер M буфера FIFO, содержащего значения последних отсчетов огибающей сигнала. По содержащимся в этом буфере отсчетам огибающей рассчитывается текущее значение плавающего порога принятия решения. Чем больше значение M , тем дольше будет удерживаться порог принятия решения после окончания импульса сигнала.

Исходя из вышесказанного были проведены два эксперимента. Цель первого — определить минимальное значение $K_{кп}$, при котором прекращается дробление первого импульса кодовой комбинации, цель второго — определить минимальное значение M , при котором дробление первого импульса также прекращается.

Первый эксперимент. В рассмотренном выше исследовании значение $K_{кп}$ было принято равным 0,968. При обновлении значения $U_{ппр}$ каждые 10 мс (при частоте $f_{до}$ дискретизации огибающей сигнала на выходе КК, равной 100 Гц) такое значение $K_{кп}$ позволяет повысить чувствительность приемника в $1/(K_{кп}^{до}) = 25,8$ раза за 1 с при резком снижении уровня сигнала на входе приемника. Это значение $K_{кп}$ обусловлено тем, что на практике при проезде локомотивом изолирующего стыка и начале приема сигнала смежной рельсовой цепи уровень сигнала на входе локомотивного приемника может изменяться в 20–25 раз [5].

Согласно [2], время восстановления нормальной чувствительности усилителя УК-25/50М-Д аппаратуры АЛСНВ-1-Д при резком уменьшении напряжения сигнала частотой 50 Гц с 3,5 до 0,280 В (в 12,5 раза) должно составлять не более 1,5

Таблица 6

Результаты измерения временных параметров выходного сигнала для кодовой комбинации «Ж» длительностью 1,86 с

Напряжение входного сигнала, амплитудное значение (СКЗ), мВ	Временные параметры, мс			
	$\tau_{им1}$	$\tau_{ин1}$	$\tau_{им2}$	$\tau_{ин2}$
268,7 (190)	170	120	600	970
282,8 (200)	190	120	600	950
353,6 (250)	240	120	600	900
495,0 (350)	290	120	600	850
523,3 (370)	300	120	600	840
524,7 (371)	300	120	600	840
526,1 (372)	10/50/300	120	600	780
537,4 (380)	10/40/310	120	600	780
551,5 (390)	20/20/320	120	600	780
558,6 (395)	30/10/320	120	600	780
560,0 (396)	360	120	600	780
565,7 (400)	360	120	600	780
Нормативные значения временных параметров	350	120	600	790

Таблица 7

Результаты измерения временных параметров выходного сигнала для кодовой комбинации «КЖ» длительностью 1,86 с

Напряжение входного сигнала, амплитудное значение (СКЗ), мВ	Временные параметры, мс	
	$\tau_{им1}$	$\tau_{ин1}$
268,7 (190)	130	800
282,8 (200)	150	780
297,0 (210)	170	760
311,1 (220)	190	740
322,4 (228)	200	730
323,9 (229)	10/90/200	630
339,4 (240)	20/60/220	630
353,6 (250)	40/20/240	630
355,0 (251)	300	630
367,7 (260)	300	630
Нормативные значения временных параметров	300	630

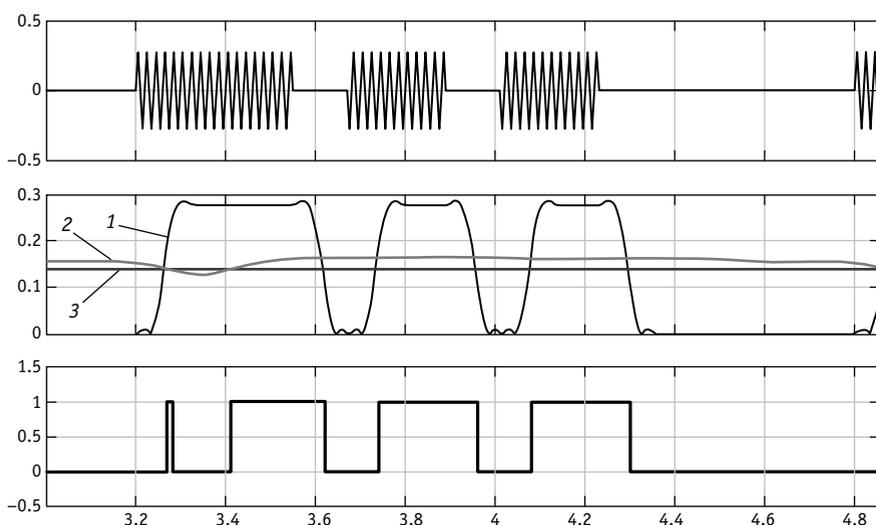


Рис. 6. Осциллограммы, демонстрирующие дробление первого импульса кодовой комбинации «З» длительностью 1,6 с

и не менее 0,6 с. При $K_{кп} = 0,968$ в КПКК порог принятия решения снизится в 131,4 раза за 1,5 с, а за 0,6 с — в 7 раз.

Методика проведения эксперимента следующая. Увеличиваем $K_{кп}$ начиная со значения 0,968 с шагом 0,001 до тех пор, пока не прекратятся дробление и временное искажение первого импульса кодовой комбинации. Для каждой кодовой комбинации эксперимент выполняется на том уровне сигнала, на котором начинается дробление первого импульса (см. табл. 2–7). Результаты эксперимента приведены в табл. 8.

Как видно из табл. 8, минимальное значение $K_{кп}$, при котором отсутствуют дробление и временное искажение первого импульса, равно 0,981. Анализ осциллограмм показал, что увеличение значения $K_{кп}$ с 0,968 до 0,981 приводит к увеличению времени восстановления нормальной чувствительности приемника на 680 мс — до 2,3 с. Это негативно скажется на устойчивости его работы при проезде изолирующих стыков.

Второй эксперимент. В рассмотренном выше исследовании значение размера M буфера FIFO, содержащего значения последних отсчетов огибающей сигнала, принято равным 64, т.е. соответствует длительности временного интервала расчета плавающего порога 640 мс. При такой длительности возникают дробление и временное искажение первого импульса кодовой комбинации.

Методика проведения эксперимента заключается в следующем. Увеличиваем M начиная со значения 64 с шагом 1 до значения, при котором прекратятся дробление и временное искажение первого импульса. Для каждой кодовой комбинации эксперимент выполняется на том уровне сигнала, на котором начинается дробление первого импульса (см. табл. 2–7). Результаты эксперимента приведены в табл. 9.

Как видно из табл. 9, минимальное значение M , при котором отсутствуют дробление и временное искажение первого импульса на всех кодовых комбинациях, равно 76. При этом длительность временного интервала, по которому рассчитывается плавающий порог, увеличивается с 640 до 760 мс, т.е. на 120 мс. Анализ осциллограмм показал, что повышение значения M с 64 до 76 приво-

дит к увеличению времени перестройки порога принятия решения (с момента окончания последнего импульса сигнала до момента снижения порога в 25 раз) на 150 мс.

Таким образом, устранить дробление и временное искажение первого импульса кодовой комбинации можно двумя способами:

за счет увеличения коэффициента крутизны падения плавающего порога с 0,968 до 0,981, что приведет к увеличению времени перестройки порога в 25 раз — на 680 мс;

за счет увеличения размера буфера для расчета плавающего порога с 64 до 76, что приведет к увеличению времени перестройки порога в 25 раз — на 150 мс.

Наименьшее увеличение времени перестройки порога наблюдается при втором способе, следовательно, он больше подходит для устранения дробления и временных искажений первого импульса кодовой комбинации. Поэтому было принято решение использовать именно этот способ.

На рис. 7 в качестве примера показано восстановление нормальной работоспособности приемника после изменения алгоритма его работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование на имитационной модели процесса функционирования корреляционного приемника сигналов АЛСН с квадратурными каналами показало его работоспособность при приеме сигнала без помех и соответствие нормативной чувствительности.

Дальнейшие исследования и совершенствование рассмотренного приемника могут быть связаны с оценкой качества его функционирования при воздействии помех различного вида и повышением помехоустойчивости. Для повышения помехоустойчивости при воздействии импульсных помех корреляционный приемник сигналов АЛСН с квадратурными каналами может быть, например, дополнен схемой ШОУ либо схемой бланкирования, а при воздействии гармонических помех — устройством коррекции огибающей либо блоком с зоной нечувствительности [6–12].

Таблица 8

Результаты первого эксперимента

Длительность кодовой комбинации, с	Тип кодовой комбинации	Подобранное значение $K_{\text{КП}}$	Время восстановления нормальной чувствительности приемника при резком уменьшении сигнала, с	
			в 12,5 раза	в 25 раз
1,6	З	0,981	1,32	1,68
	Ж	0,973	0,92	1,18
	КЖ	0,981	1,32	1,68
1,86	З	0,971	0,86	1,10
	Ж	0,971	0,86	1,10
	КЖ	0,976	1,04	1,33

Таблица 9

Результаты второго эксперимента

Длительность кодовой комбинации, с	Тип кодовой комбинации	Минимальное значение M
1,6	З	70
	Ж	67
	КЖ	70
1,86	З	76
	Ж	74
	КЖ	68

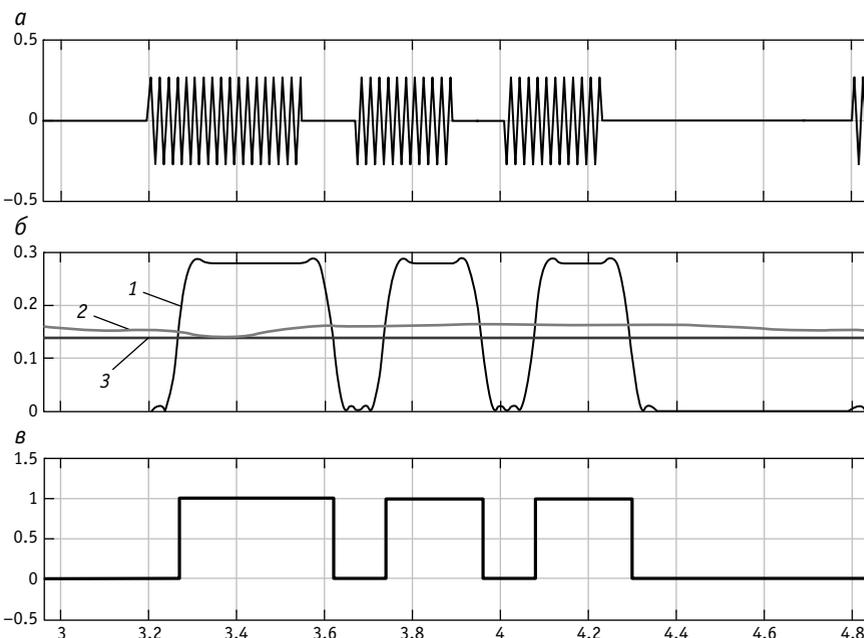


Рис. 7. Пример восстановления нормальной работоспособности приемника при приеме кодовой комбинации «З» длительностью 1,6 с:

a — сигнал на входе приемника; b — огибающая сигнала на выходе КК (кривая 1), плавающий порог принятия решения (кривая 2) и порог ограничения чувствительности приемника (прямая 3); v — сигнал на выходе приемника

Отдельный актуальный вопрос — исследование качества функционирования корреляционного приемника сигналов АЛСН с квадратурными каналами при нестабильности частот опорного и несущего колебаний, а также с учетом случайного характера начальных фаз этих колебаний.

Для достижения максимального эффекта в повышении качества функционирования приемного устройства канала АЛСН также представляет интерес процесс функционирова-

ния корреляционного приемника сигналов АЛСН с квадратурными каналами в связке с корреляционным дешифратором кодовых комбинаций АЛСН [13, 14]. Одной из задач этого исследования может быть оптимизация параметров корреляционного приемника сигналов АЛСН с квадратурными каналами для согласования временных параметров сигналов на выходе приемника с характеристиками корреляционно-го дешифратора.

Литература

1. Юсупов Р. Р., Хохрин А. С. Корреляционный приемник с квадратурными каналами для автоматической локомотивной сигнализации непрерывного типа АЛСН // Транспорт Урала. 2022. № 3 (74). С. 49–54. DOI: 10.20291/1815-9400-2022-3-49-54. ISSN 1815-9400.
2. Сороко В. И., Фотькина Ж. В. Аппаратура железнодорожной автоматики и телемеханики. Москва : ПЛАНЕТА, 2013. 1016 с.
3. Стефанова И. А. Моделирование систем телекоммуникаций в системе MATLAB+Simulink. Самара : Изд-во ПГУТИ, 2018. 112 с.
4. Программа формирования кодового сигнала АЛСН / Р. Р. Юсупов, В. Б. Леушин : программа для ЭВМ 2007613357 Российская Федерация. № 2007612372 ; заявл. 13.06.2007 ; опубл. 10.08.2007.
5. Особенности каналов автоматической локомотивной сигнализации магистральных железных дорог / В. Б. Леушин, Р. Р. Юсупов. Самара : СамГУПС, 2007. 115 с.
6. Приемное устройство автоматической локомотивной сигнализации / В. Б. Леушин, Р. Р. Юсупов, К. Э. Блачев : патент на полезную модель 165420 Российская Федерация. № 2015155567/11; заявл. 23.12.2015; опубл. 20.10.2016, Бюл. № 29.
7. Ионин М. А., Колодина Н. Д., Хохрин А. С. Об особенностях применения в локомотивном приемнике канала АЛСН схемы blankирования и схемы шоу // Дни студенческой науки : сборник материалов 49-й научной конференции. Самара : СамГУПС, 2022. С. 125–128.
8. Юсупов Р. Р., Хохрин А. С., Леушин В. Б. Комбинированный приемник сигналов автоматической локомотивной сигнализации // Наука и образование транспорту. 2021. № 1. С. 325–329.
9. Сабанцев А. В., Хохрин А. С., Юсупов Р. Р. Исследование функционирования комбинированного приемника сигналов АЛСН с blankированием и схемой ШОУ при воздействии импульсных помех // Дни студенческой науки : сборник материалов 49-й научной конференции. Самара : СамГУПС, 2022. С. 137–141.
10. Фомин А. Ф., Ваванов Ю. В. Помехоустойчивость систем железнодорожной радиосвязи. Москва : Транспорт, 1987. 295 с.
11. Голяницкий И. А., Годунов В. И. Многопозиционные системы оптимальной обработки негауссовых процессов. Москва : Изд-во МАИ, 1997. 624 с.
12. Venskauskas K. K., Krestianinov V. V. The ship electromagnetic environment and methods of improving EMC characteristics of ship radioelectronics equipment : Proceedings of 1984 International Symposium on EMC. Tokyo, 1984. Pp. 178–183.
13. О корреляционной дешифрации кодовых комбинаций сигнала АЛСН / Р. Р. Юсупов, В. Б. Леушин, А. С. Хохрин, А. Д. Солодова // Наука и образование транспорту. 2020. № 1. С. 302–306.
14. Анализ функционирования корреляционного дешифратора сигналов АЛСН в номинальных условиях эксплуатации / Р. Р. Юсупов, В. Б. Леушин, А. С. Хохрин, А. Д. Солодова // Наука и образование транспорту. 2020. № 1. С. 306–310.

References

1. Yusupov R. R., Khokhrin A. S. Correlation receiver with quadrature channels for continuously working automatic cab signalling [Korrelyatsionnyy priemnik s kvadraturnymi kanalami dlya avtomaticheskoy lokomotivnoy signalizatsii nepreryvnogo tipa ALSN] // Transport of the Urals. 2022. No. 3 (74). Pp. 49–54. DOI: 10.20291/1815-9400-2022-3-49-54. ISSN 1815-9400.
2. Soroko V. I., Fotkina Zh. V. Equipment of railway automation and telemechanics [Apparatura zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki]. Moscow : PLANETA, 2013. 1016 p.
3. Stefanova I. A. Modeling of telecommunication systems in MATLAB + Simulink [Modelirovanie sistem telekommunikatsiy v sisteme MATLAB + Simulink]. Samara : Publishing House of PSUTI, 2018. 112 p.
4. Program for creating code signal of CWACS [Programma formirovaniya kodovogo signala ALSN] / R. R. Yusupov, V. B. Leushin : computer program 2007613357 Russian Federation. No. 2007612372 ; filed 13.06.2007 ; publ. 10.08.2007.
5. Features of channels of automatic cab signalling for mainline railways [Osobennosti kanalov avtomaticheskoy lokomotivnoy signalizatsii magistral'nykh zheleznnykh dorog] / V. B. Leushin, R. R. Yusupov. Samara : SSTU, 2007. 115 p.
6. Receiver of automatic cab signalling [Priemnoe ustroystvo avtomaticheskoy lokomotivnoy signalizatsii] / V. B. Leushin, R. R. Yusupov, K. E. Blachev : patent for utility model 165420 Russian Federation. No. 2015155567/11; filed 23.12.2015; publ. 20.10.2016, Bulletin No. 29.
7. Ionin M. A., Kolodina N. D., Khokhrin A. S. On peculiarities of application of blanking scheme and «wide-band filter — restrictor — narrow-band filter» scheme in locomotive receiver of CWACS channel [Ob osobennostyakh primeneniya v lokomotivnom priemnike kanala ALSN skhemy blankirovaniya i skhemy shou] // Days of student science : proceedings of 49th scientific conference. Samara : SSTU, 2022. Pp. 125–128.
8. Yusupov R. R., Khokhrin A. S., Leushin V. B. Combined receiver of ACS signals [Kombinirovannyy priemnik signalov avtomaticheskoy lokomotivnoy signalizatsii] // Science and education for transport. 2021. No. 1. Pp. 325–329.
9. Sabantsev A. V., Khokhrin A. S., Yusupov R. R. Study of operation of combined receiver of ACS signals with blanking and «wide-band filter — restrictor — narrow-band filter» scheme at influence of impulsive disturbances [Issledovanie funktsionirovaniya kombinirovannogo priemnika signalov ALSN s blankirovaniem i skhemoy SHOU pri vozdeystvii impul'snykh pomekh] // Days of student science : proceedings of 49th scientific conference. Samara : SSTU, 2022. Pp. 137–141.
10. Fomin A. F., Vavanov Yu. V. Noise immunity of systems of railway radio communication [Pomekhoustoychivost' sistem zheleznodorozhnoy radiosvyazi]. Moscow : Transport, 1987. 295 p.
11. Golyanitskiy I. A., Godunov V. I. Multiposition system for optimal processing of non-gaussian processes [Mnogopozitsionnyye sistemy optimal'noy obrabotki negaussovykh protsessov]. Moscow : Publishing House of MAI, 1997. 624 p.
12. Venskauskas K. K., Krestianinov V. V. The ship electromagnetic environment and methods of improving EMC characteristics of ship radioelectronics equipment : proceedings of 1984 International Symposium on EMC. Tokyo, 1984. Pp. 178–183.
13. On correlation decryption of code patterns of ACS signal [O korrelyatsionnoy deshifratsii kodovykh kombinatsiy signala ALSN] / R. R. Yusupov, V. B. Leushin, A. S. Khokhrin, A. D. Solodova // Science and education for transport. 2020. No. 1. Pp. 302–306.
14. Analysis of operation of correlative decryptor of ACS signals in nominal conditions of operation [Analiz funktsionirovaniya korrelyatsionnogo deshifratora signalov ALSN v nominal'nykh usloviyakh ekspluatatsii] / R. R. Yusupov, V. B. Leushin, A. S. Khokhrin, A. D. Solodova // Science and education for transport. 2020. No. 1. Pp. 306–310.

УДК 656.132

Дмитрий Германович Неволин, доктор технических наук, профессор кафедры «Проектирование и эксплуатация автомобилей» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,
Алексей Алексеевич Цариков, кандидат технических наук, доцент кафедры «Проектирование и эксплуатация автомобилей» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,
Виктор Григорьевич Бондаренко, кандидат технических наук, доцент кафедры «Проектирование и эксплуатация автомобилей» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ СКОРОСТНОГО ПАССАЖИРСКОГО ТРАНСПОРТА В КРУПНЫХ И КРУПНЕЙШИХ ГОРОДАХ РОССИИ

Dmitriy Germanovich Nevolin, DSc in Engineering, Professor, Design and Operation of Automobiles Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,

Alexey Alexeevich Tsarikov, PhD in Engineering, Associate Professor, Design and Operation of Automobiles Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,

Viktor Grigoryevich Bondarenko, PhD in Engineering, Associate Professor, Design and Operation of Automobiles Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia

Main directions of development of high-speed passenger transport in large and largest Russian cities

Аннотация

Рассмотрены проблемы развития скоростных видов городского пассажирского транспорта. Предложен дифференцированный подход к решению этих проблем в зависимости от потенциального пассажиропотока и финансовых возможностей муниципальных образований.

Ключевые слова: транспортная система города, скоростной пассажирский транспорт, пассажиропоток, улично-дорожная сеть.

Abstract

The paper considers problems of development of high-speed types of urban passenger transport. The authors propose a differentiated approach to solution of these problems according to potential passenger traffic and financial possibilities of municipal units.

Keywords: city transportation system, high-speed passenger transport, passenger traffic, road network.

DOI: 10.20291/1815-9400-2023-1-59-64

ВВЕДЕНИЕ

Территориальное развитие городов всегда определялось скоростными характеристиками массовых внутригородских передвижений. Город, оснащенный современными видами пассажирского транспорта, при скорости сообщения 16 км/ч располагает возможностями расселения на территории в 200 км² [1]. Вместе с тем размеры крупных и крупнейших российских городов давно превысили площадь 200 км², поэтому для их нормального функционирования необходимо развивать скоростной пассажирский транспорт со скоростью сообщения 24 км/ч и более.

ПРОБЛЕМЫ РАЗВИТИЯ СКОРОСТНОГО ТРАНСПОРТА В ГОРОДАХ РОССИИ

Анализ данных по транспортным системам развитых стран показывает, что в городах Европы протяженность скоростного пассажирского транспорта составляет 30–120 км из расчета на 1 млн жителей. В крупных городах России эти показатели гораздо ниже. Так, в Москве с ее развитой системой метрополитена на 1 млн жителей приходится всего 34,8 км сети скоростного пассажирского транспорта. Екатеринбург, имеющий одну ветку метрополитена протяженностью 12,7 км, обеспечен сетью скоростных видов общественного транспорта (в расчете на 1 жителя) в 4 раза меньше, чем Москва. В то же время семь российских миллионников и все города с населением менее 1 млн жителей вообще не имеют скоростного пассажирского транспорта [2]. С учетом плотности проживания в городах России и роста высотного строительства необходимый объем скоростного городского общественного транспорта должен составлять 30–40 км на 1 млн жителей.

Если рассматривать линейные размеры городов России, следует отметить, что потребность в скоростном общественном транспорте

может возникнуть и в городах с населением менее 500 тыс. жителей. В частности, население Москвы превышает 12 млн не считая ежедневно приезжающих на работу жителей Подмосковья, вместе с тем линейные размеры таких городов, как Волгоград, Красноярск, незначительно меньше, чем у столицы. Но территория Москвы более компактная, а растянутая территория городов, подобных, например, Волгограду и Новокузнецку, позволяет предположить, что для определенной доли населения дальность поездки достигает таких значений, при которых жизненно необходимо развитие скоростных видов транспорта.

Вместе с тем в городах с численностью населения, соизмеримой с Новокузнецком, пассажиропоток никогда не будет настолько высоким, чтобы стало экономически целесообразным строительство метрополитена, тем более в несколько линий. В данном случае проблему скоростных перемещений нужно решать с помощью скоростного трамвая или скоростного автобуса. Кроме того, в советский период в городах с населением менее 500 тыс. жителей рекомендовалось использовать линии экспресс-автобусов [3].

Значительный диапазон пассажиропотока на линиях метрополитена в городах России свидетельствует о необходимости дифференцированного подхода к развитию общественного транспорта. Одним из первых такой подход обозначил Г. В. Болоненков [4]. Идея состояла в разделении систем под различные прогнозируемые пассажиропотоки, которые определяли схемы строительства линий метрополитена. Г. В. Болоненков справедливо отмечал, что линии скоростного транспорта необязательно строить со 100%-м прохождением под землей. В некоторых городах, особенно имеющих современную застройку с широкими улицами, строительство подземных участков не требуется.

Из исследований, посвященных скоростному трамваю, стоит отметить работы В. В. Хиценко [5] и К. Э. Александера [6]. Эти исследователи тоже предпринимали попытки дифференцировать скоростные виды пассажирского транспорта, понимая, что улично-дорожная сеть (УДС) городов различной крупности испытывает разные нагрузки.

ВИДЫ ГОРОДСКОГО СКОРОСТНОГО ПАССАЖИРСКОГО ТРАНСПОРТА

Рассмотрим более детально основные виды скоростного пассажирского транспорта.

Метрополитен — городской скоростной внеуличный вид транспорта, отличительными особенностями которого являются устройство пути преимущественно в тоннелях, токошьем от третьего, контактного, рельса и высокие платформы в уровне с полом вагонов [5].

Основные преимущества метрополитена по сравнению с другими видами городского общественного транспорта — высокая скорость (до 60 км/ч) и провозная способность (до 60 тыс. пасс./ч в одном направлении). Основной недостаток — высокая стоимость строительства и эксплуатации. Поэтому метрополитен эффективно применять при большом пассажиропотоке — 20–25 тыс. пасс./ч в одном направлении. Метрополитены с меньшим пассажиропотоком обычно требуют значительного объема субсидирования и не окупаются.

Скоростной трамвай — это сочетание быстроходных, большой емкости трамвайных вагонов (одиночных или поездов) и линий, в необходимой степени изолированных от уличного движения, имеющих кривые больших радиусов и достаточно удаленные друг от друга остановочные пункты, что в целом обеспечивает высокую скорость сообщения и большую провозную способность [5].

Скоростные автобусные перевозки — высококачественная, включающая автобусы (троллейбусы, электробусы) транспортная система, которая удовлетворяет потребность в быстрой, удобной и рентабельной городской мобильности за счет создания выделенных полос, обеспечения быстрых и частых рейсов, а также использования отдельных качеств в маркетинге и обслуживании клиентов [2].

Отличительная особенность скоростного автобуса — более высокие эксплуатационные характеристики (скорость, надежность, провозная способность) в сравнении с обычными автобусными маршрутами. По некоторым параметрам (в частности, по скорости) системы скоростного автобусного транспорта сопоставимы с системами скоростного трамвая.

По сравнению с обычными системами автобусного транспорта скоростные системы характеризуются следующим особенностями:

- трассы проходят по выделенным полосам (полностью или большей частью), на перекрестках автобусы имеют преимущества; часто используются нестандартные автобусы (например, сочлененные многосекционные);

- на некоторых системах остановки напоминают станции рельсового транспорта: они закрыты со всех сторон, имеют билетные и справочные кассы, оборудованы турникетами (что способствует более быстрой посадке пассажиров в автобус, поскольку проверка и покупка билетов осуществляется до посадки в автобус);

- на отдельных системах используются направляемые автобусы.

Для России такая система перевозок остается инновацией и пока ни в одном городе не реализована. Однако по провозной способности скоростной автобус не уступает скоростному трамваю, а в ряде случаев и превосходит его: например, наибольшая провозная способность скоростного автобуса, зарегистрированная в Боготе, составила 45 тыс. пасс./ч в одном направлении.

Помимо вышеперечисленных видов скоростного пассажирского транспорта, в мировой практике используются системы на основе монорельсов, а также переходные типы метрополитенов. Отдельно отметим именно переходные типы метрополитенов, поскольку они могут найти широкое применение в городах России.

Обычно в переходных типах метро используются вагоны с высоким полом и верхним токошьемом, причем их конструкция позволяет проходить кривые меньшего радиуса (до 60 м). Эти особенности дают возможность организовывать маршруты переходных типов метро и в тоннеле, и по наземным участкам УДС города. Подобные системы имеют высокие платформы для посадки пассажиров, как у классического метро, и вместительный подвижной состав. Однако при движении на наземных участках поезда вынуждены останавливаться на перекрестках со светофорным движением, как трамваи.



В табл. 1 приведены основные характеристики тех скоростных систем городского пассажирского транспорта, которые, по мнению авторов, целесообразно применять в России.

Крупные и крупнейшие города Российской Федерации отличаются условиями работы общественного транспорта и значениями пассажиропотока. Соответственно проблемы городского пассажирского транспорта, характерные для Москвы, имеют иные пути решения, чем, например, в Самаре или Тюмени. Учитывая это, авторы разработали рекомендации по использованию и основным направлениям развития видов городского пассажирского транспорта.

Классические метрополитены. Проектирование метрополитенов на постсоветском пространстве предусматривало два типа станций по протяженности: длиной 106 м для 5-вагонных и 168 м для 8-вагонных составов. Практически все российские города, кроме Санкт-Петербурга и Москвы, используют станции длиной 106 м, подобные системы способны перевозить в одном направлении 35 тыс. пасс./ч.

Поскольку в городах с населением менее 5 млн чел. пассажиропоток не превышает 60 тыс. пасс./ч в одном направлении, в нынешних экономических реалиях развивать классическое метро целесообразно только в Москве и особенно в Санкт-Петербурге.

Что касается московского метро, то, как показал детальный анализ, практически все его диаметральные линии имеют между собой прямую связь: с одной линии возможна пересадка на другую без использования кольцевой линии. Это означает, что проектировщики, создав несколько вариантов пересадки, тем самым равномерно загрузили все пересадочные станции и линии. В результате система московского метро исчерпала свои возможности по провозной способности

[7, 8]. Аналогичная ситуация наблюдается и в других мегаполисах мира — в Токио, Сеуле, Пекине, Шанхае и т.д. Эта проблема требует поиска путей повышения провозной способности, а по сути — перехода на систему городского пассажирского транспорта совершенного иного уровня.

Первый путь решения проблемы перегруженности линий метро любого мегаполиса, соответственно и Москвы, — строительство линий экспресс-метрополитена, т.е. метро с увеличенным расстоянием (3–6 км) между станциями. С одной стороны, экспресс-метрополитен повышает скорость сообщения, а с другой — не может функционировать без классических линий.

Другое направление решения проблемы — удлинение протяженности станций для приема более длинных поездов, например, таких, как 12-вагонные составы. Удлинение станций — непростая техническая задача, но это решение может увеличить провозную способность линий московского метро в 1,5 раза.

Вместе с тем авторы ни в коем случае не считают вышеперечисленные пути решения проблем московского метро единственно возможными. Только соответствующие данные и расчеты могут показать необходимость использования двух рассмотренных направлений, а также необходимость развития наземных видов общественного транспорта.

Метрополитены переходного типа. Как уже было отмечено, в условиях дефицита финансирования высокая стоимость строительства метрополитена целесообразна только при пассажиропотоках мощностью более 20 тыс. пасс./ч в одном направлении. В России на большинстве линий метрополитена пассажиропоток не превышает 10 тыс. пасс./ч. Соответственно при таких значениях перевозок наиболее эффективны переходные типы метро, особенно в городах, где метрополитен уже эксплуатируется или ведутся работы по его строительству. Одновременно с этим

Таблица 1

Основные показатели скоростных систем городского пассажирского транспорта

Показатель	Тяжелый (классический) метрополитен	Переходные типы метрополитена	Скоростной трамвай	Скоростной автобус (троллейбус, электробус)
Источник электропитания	Нижний или верхний токошьем	Верхний токошьем	Верхний токошьем	Двигатель внутреннего сгорания (верхний токошьем, аккумуляторы)
Пути сообщения	Изолированные	Изолированные, собственное полотно или обособленные	Изолированные, собственное полотно или обособленные	Изолированные, собственное полотно или обособленные
Уровень пола вагона, мм	1000–1200	1000–1200	300–700	300–700
Высота посадочной платформы, мм	1000–1200	1000–1200	200–300	200–700
Ширина вагона, мм	2500–2700	2500–2700	2500	2500
Минимальный радиус поворота, м	200	60	25	20
Число вагонов/секций в составе	4–8	2–5	2–4 (3–7)	1 (2–3)
Длина состава, м	84–250	42–104	30–70	12–30
Длина посадочной платформы, м	105–260	50–105	30–105	15–60
Нагрузка на ось, т	До 15	До 15	До 10	До 10
Расположение дверей	Двустороннее	Двустороннее	Одностороннее (двустороннее)	Одностороннее (двустороннее)
Отопление	Нет	Есть	Есть	Есть
Коэффициент маршрутизации Км	1–1,2	1–2	1–2,5	1,5–3,0
Расположение сидений	Вдоль вагона	Вдоль или поперек вагона	Поперек вагона	Поперек салона

в крупных и крупнейших городах России достаточно много микрорайонов с довольно широкими улицами. Обычно эти районы находятся в периферийной части города, что позволяет организовывать здесь наземные виды скоростного транспорта.

Системы переходного типа метро используют вагоны и тоннели, как у классического метрополитена, однако большая часть участков проходит по земле и имеет пересечения в одном уровне. Для работы в подобных системах необходимы вагоны с минимальным радиусом поворота и верхним токосъемом. Переходными авторами называли эти системы потому, что в них можно трансформировать существующие системы, используемые в городах России, а также при необходимости перевести в систему классического метро, изолировав все участки движения.

Предлагаем выделить два вида метрополитенов переходного типа в зависимости от провозной способности и доли подземных участков: облегченное метро и легкое метро. Линии облегченного метро можно строить в тоннелях мелкого заложения, при этом подземные участки составят менее 70 % протяженности линий. Стоимость строительства облегченного метро в 2 раза меньше, чем традиционного, а провозная способность может достигать 30 тыс. пасс./ч в одном направлении.

Системы легкого метро тоже имеют подземные участки линий, которые целесообразнее прокладывать под центральной (исторической) частью города. По сравнению с классическим метрополитеном скорость сообщения легкого метрополитена несколько ниже — 25–35 км/ч, поэтому его строительство будет экономически эффективным в городах с пассажиропотоком 5–20 тыс. пасс./ч в одном направлении.

Скоростной трамвай. Это достаточно эффективный способ решения проблем городского общественного транспорта. Как показывает мировой опыт, существуют два типа тоннелей для организации движения скоростного трамвая. В первом случае подземные участки строят по габаритам метрополитена и под нагрузки его поездов. Такой вариант необходим для перспективного преобразования тоннелей в линии полноценного метрополитена. Системы подобного типа называют «преметрополитен» или «предметрополитен». Сооружение «преметрополитена», или подземных участков трамвая, специалисты обычно рассматривают в качестве первой стадии строительства метро, так как этапное строительство и решение транспортных проблем по мере необходимости требует меньших единовременных затрат и является экономичным [5].

В связи с этим целесообразно поэтапно трансформировать действующие трамвайные системы России в скоростные трамвайные линии. Такой подход позволит эффективно использовать городской пассажирский транспорт без существенных вложений со стороны муниципальных образований.

В мировой практике есть и иные подходы к развитию скоростного трамвая, когда подземные тоннели и эстакады строят без учета габарита метрополитена. Такие системы, называемые «полуметрополитен», в дальнейшем не планируют переустраивать в метро. В данном случае метрополитен или другие виды скоростных систем пассажирского транспорта развиваются независимо от «полуметрополитена».

Вместе с этим на линиях скоростного трамвая больше преобладают пути на собственном и обособленном полотне. Тон-

нели или эстакады применяются далеко не всегда, а если сооружаются, то их стараются сделать возможно меньшего протяжения из-за высокой стоимости по сравнению с наземными участками. Учитывая это, авторы выделили три категории скоростных трамвайных систем в зависимости от скорости сообщения и доли изолированных линий на сети.

Скоростной трамвай I класса представляет собой систему, в которой более 70 % участков проходят на изолированном полотне и не имеют пересечений с другими участниками движения. Скорость сообщения таких систем 30–35 км/ч, и они могут перевозить до 20 тыс. пасс./ч в одном направлении.

Необходимо отметить, что скоростной трамвай I класса требует достаточно больших финансовых вложений, а значит, соответствующей экономической проработки. Строительство таких систем целесообразно в городах с плотной жилой застройкой, где нет возможности проложить линию по наземным участкам. Кроме того, скоростной трамвай I класса можно получить путем преобразования классической линии метрополитена, используя существующие тоннели метро и наземные трамвайные пути. Для этого необходимо вывести подземный участок на уровень земли и подключить к нему наземные участки. Подобная трансформация позволит обслуживать скоростным транспортом гораздо большую площадь города.

Существуют также системы скоростного трамвая, в которых доля изолированных участков близка к 100 % от протяженности линий, при этом вся линия проложена по земле.

Скоростной трамвай II класса представляет собой систему, в которой изолированные участки составляют 30–70 % от протяженности всей сети. Подобные системы целесообразно строить в городах с высоким пассажиропотоком и наличием участков УДС, которые перегружены и приводят к снижению скорости движения пассажирского транспорта. Скорость сообщения таких систем несколько ниже, чем классического метрополитена, — 25–35 км/ч.

Скоростной трамвай III класса представляет собой систему, в которой изолированные пути построены только в центральной (исторической) части города. Протяженность таких участков не превышает 30 %, что позволяет снизить стоимость строительства по сравнению с метрополитеном в 4 раза.

Таким образом, чем больше протяженность изолированных путей, тем выше класс системы скоростного трамвая. Очевидно, что большая протяженность изолированных участков позволяет увеличить среднюю скорость движения подвижного состава, а также минимизировать влияние заторов.

Системы скоростного трамвая III класса наиболее эффективны в городах с численностью населения от 250 до 500 тыс. жителей, где УДС перегружена только в центральной части города. Скоростные трамваи II класса рекомендуется использовать в городах с численностью населения от 500 тыс. до 1 млн жителей, I класса — с населением более 1 млн жителей.

Скоростной автобус. Несмотря на свою эффективность, этот вид транспорта до сих пор не получил распространения в России [9]. Вместе с тем он является наиболее простым и экономичным способом развития скоростного пассажирского транспорта для городов Российской Федерации, особенно для тех, где население менее 1 млн жителей.

В отличие от скоростного трамвая, скоростной автобус не привязан к контактной сети и рельсовым путям. Это преимущество позволяет более гибко организовывать маршруты и менять их по мере необходимости.

Еще одно преимущество скоростного автобуса перед рельсовыми видами скоростного пассажирского транспорта — значительно меньшие затраты на ввод системы в эксплуатацию, так как в ряде случаев он может использовать существующую УДС города. Например, на 6- или 8-полосных улицах для маршрутов скоростного автобуса могут быть выделены две полосы. При этом потребуются минимальные денежные средства для отделения полос движения автобусов от основной проезжей части и для оборудования остановочных площадок.

Как и в случае со скоростным трамваем, система скоростного автобуса предполагает несколько вариантов развития. На линиях с высоким пассажиропотоком можно использовать большое количество автобусов, для которых необходимо выделять четыре полосы движения. Линии скоростного автобуса могут быть изолированными от других участников движения, а также проходить по обособленным полосам.

В зависимости от того или иного варианта организации скоростного автобусного движения требуются разные объемы денежных затрат. При этом наиболее дорогие системы позволяют

перевозить большой объем пассажиров с наибольшей средней скоростью движения. С учетом этого авторы предлагают три отдельных класса для развития скоростного автобусного движения.

В городах с населением более 1 млн жителей на линиях с высоким пассажиропотоком необходимо организовывать системы I класса. Линии скоростного автобуса этого типа изолированы от других участников движения и способны перевозить 25 тыс. пасс./ч в одном направлении со скоростью традиционного метрополитена.

Чтобы изолировать линии скоростного автобуса, необходимо строительство транспортных развязок или открытых тоннелей. Подобная схема организации движения требует значительных финансовых вложений — 5–10 % от стоимости метро. Однако если пассажиропотоки невысокие, то экономически целесообразно использовать более простые системы. К ним относятся системы скоростного автобуса II и III класса.

Дифференцированный подход к выбору системы скоростного пассажирского транспорта позволяет решать проблемы городов с разной численностью населения и разной финансовой возможностью. Поскольку каждый вид скоростного общественного транспорта создается под определенный подвижной состав и инфраструктуру (табл. 2), авторы предприняли попытку сформулировать их основные отличия.

Таблица 2

Предложения по развитию скоростных видов городского пассажирского транспорта

Тип	Вид	Эффективные параметры использования, тыс. пасс./ч	Скорость сообщения, км/ч	Инфраструктура
Метрополитены				
Ia	Экспресс-метро	40–120	35–60	Четырехпутные или отдельно построенные двухпутные линии глубокого и мелкого заложения. Длина перегона 3–6 км
Iб	Экстра-метро (увеличение длины станций до 12 вагонов)	50–90	40–50	Двухпутные линии мелкого и глубокого заложения. Длина перегона 1,2–1,6 км
II	Метро с удлиненными станциями (8 вагонов)	30–60	40–50	То же
III	Стандартное метро (5 вагонов)	20–35	40–50	То же
Метрополитены переходного типа				
IV	Облегченное метро	10–30	30–40	До 70 % линий в тоннелях мелкого заложения и до 30 % открытого типа. Длина перегона 0,8–1,4 км
V	Легкое метро	5–25	25–35	До 30 % линий в тоннелях мелкого заложения и до 70 % линий открытого типа. Длина перегона 0,8–1,2 км
Скоростные трамвайные системы				
VI	Скоростной трамвай I класса	10–25	30–35	Изолированных линий более 70 %. Длина перегона 0,8–1,4 км
VII	Скоростной трамвай II класса	5–15	25–35	Изолированных линий от 30 до 70 %. Длина перегона 0,8–1,2 км
VIII	Скоростной трамвай III класса	5–10	25–30	Изолированных линий до 30 %. Длина перегона 0,6–1,2 км
Скоростные автобусные (троллейбусные, электробусные) системы				
IX	Скоростной автобус I класса	10–25	30–40	Изолированных линий более 70 %. Расстояние между остановками 1,2–1,5 км. Наличие обгонных полос на остановках. На ряде линий две полосы для движения подвижного состава в каждом направлении
X	Скоростной автобус II класса	5–15	25–35	Линии частично изолированы и частично обособлены. Пересечение с другими участниками движения только на перекрестках со светофорами. Расстояние между светофорами 1,2–1,5 км. Наличие обгонных полос на остановках
XI	Скоростной автобус III класса	3–10	25–30	Линии обособлены от других участников движения. Пересечение с другими участниками движения на светофорах

Как видно из табл. 2, чем выше прогнозируемый пассажиропоток, тем более дорогой вид скоростного пассажирского транспорта необходим городу. В городах с низким пассажиропотоком достаточно использовать скоростной трамвай или скоростной автобус III класса, линии которого могут быть частично изолированы от других участников движения. В более крупных городах с высоким пассажиропотоком следует использовать транспорт с большей провозной способностью и высокой долей изолированных линий. Здесь нужен вместительный подвижной состав, который перемещается с высокой скоростью: скоростной автобус и скоростной трамвай I класса, а также метрополитены переходного типа.

Нельзя обойти и такой вопрос, как стоимость строительства инфраструктуры различных видов скоростного пассажирского транспорта и экономически целесообразные границы их использования. В рамках своего исследования авторы предприняли попытку оценить эти параметры (рис. 1).

Как видно из рис. 1, наиболее дорогой вид скоростного пассажирского транспорта — метрополитен, прежде всего экспресс-метрополитен, для которого необходимо строительство тоннелей

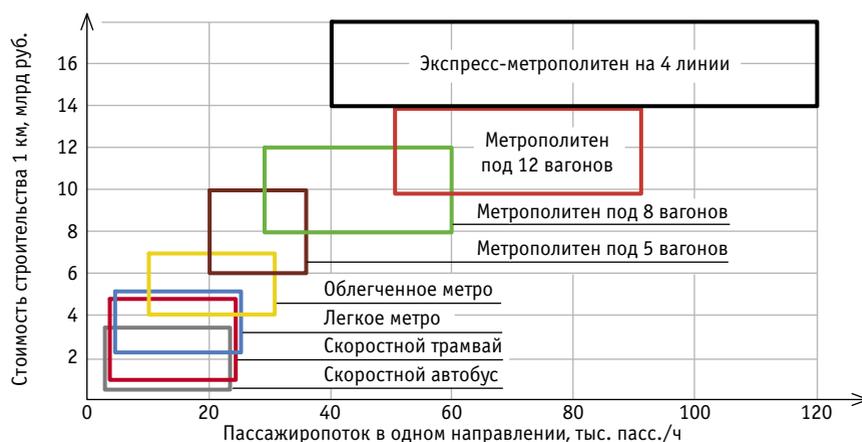


Рис. 1. Рекомендуемые границы применения и стоимость строительства различных видов скоростного пассажирского транспорта

лей под движение четырех линий. Вместе с тем метрополитены способны обслуживать высокие пассажиропотоки, в отличие от скоростного трамвая или автобуса.

Особенно перспективно использование линий скоростного автобуса, стоимость строительства которых в наиболее простых модификациях может составлять от 300 млн руб./км. В Российской Федерации можно найти несколько десятков городов, в которых применение скоростного автобуса позволило бы решить транспортные проблемы в минимальные сроки.

ВЫВОДЫ

Скоростные виды городского пассажирского транспорта претерпевают изменения. В связи с этим необходим новый подход к развитию скоростного транспорта, в первую очередь законодательный и нормативный.

Использование новых видов скоростного пассажирского транспорта позволяет значительно снижать стоимость строительства инфраструктуры, а также в более короткие сроки решать проблемы транспортных систем городов.

Литература

1. Овечников Е. В., Фишельсон М. С. Городской транспорт. Москва: Высшая школа, 1976. 352 с.
2. Ваксман С. А., Цариков А. А. Основные пути решения проблемы перегрузки метрополитенов в мегаполисах на примере города Москвы // Социально-экономические проблемы развития и функционирования транспортных систем городов и зон их влияния. Минск: Изд-во БНТУ, 2018. С. 152–157.
3. Градостроительство. Справочник проектировщика. Москва: Стройиздат, 1978. 367 с.
4. Болоненков Г. В. Моделирование развития системы метрополитена в крупном городе // Метрополитен и планировка крупнейшего города: тезисы докладов конференции. Харьков, 1980. С. 41–42.
5. Хиценко В. В. Скоростной трамвай. Ленинград: Стройиздат, 1976. 180 с.
6. Александр К. Э., Руднева Н. А. Скоростной рельсовый транспорт в градостроительстве. Москва: Стройиздат, 1985. 140 с.
7. Ваксман С. А., Цариков А. А. Итоги развития скоростного пассажирского транспорта крупнейших городов России за последние 35 лет // Социально-экономические проблемы развития и функционирования транспортных систем городов и зон их влияния. Минск: Изд-во БНТУ, 2018. С. 92–97.
8. Ваксман С. А., Цариков А. А. Предложения по классификации скоростных видов пассажирского транспорта в городах России // Социально-экономические проблемы развития и функционирования транспортных систем городов и зон их влияния. Минск: Изд-во БНТУ, 2018. С. 136–141.
9. Скоростные автобусные перевозки. Руководство по планированию. Нью-Йорк: Институт политики транспорта и развития, 2007. 1004 с.

References

1. Ovechnikov E. V., Fishelson M. S. Urban transport [Gorodskoy transport]. Moscow: Higher School, 1976. 352 p.
2. Vaksman S. A., Tsarikov A. A. Main solutions of a problem of overload of metro in megacities on the example of Moscow [Osnovnye puti resheniya problemy peregruzki metropolitenov v megapolisakh na primere goroda Moskvy] // Social and economic problems of development and operation of city transportation systems and areas of their influence. Minsk: Publishing House of BNTU, 2018. Pp. 152–157.
3. Urban planning. Designer's handbook [Gradostroitel'stvo. Spravochnik proektirovshhika]. Moscow: Stroyizdat, 1978. 367 p.
4. Bolonenkov G. V. Modeling of development of metro system in a large city [Modelirovaniye razvitiya sistemy metropolitena v krupnom gorode] // Metro and planning of a largest city: scientific conference abstracts. Kharkov, 1980. Pp. 41–42.
5. Khitsenko V. V. High-speed tram [Skorostnoy tramvay]. Leningrad: Stroyizdat, 1976. 180 p.
6. Alexander K. E., Rudneva N. A. High-speed rail transport in urban planning [Skorostnoy rel'sovyy transport v gradostroitel'stve]. Moscow: Stroyizdat, 1985. 140 p.
7. Vaksman S. A., Tsarikov A. A. Results of development of high-speed transport of largest Russian cities for last 35 years [Itogi razvitiya skorostnogo passazhirskogo transporta krupneyshikh gorodov Rossii za poslednie 35 let] // Social and economic problems of development and operation of city transportation systems and areas of their influence. Minsk: Publishing House of BNTU, 2018. Pp. 92–97.
8. Vaksman S. A., Tsarikov A. A. Proposals on classification of high-speed types of passenger transport in Russian cities [Predlozheniya po klassifikatsii skorostnykh vidov passazhirskogo transporta v gorodakh Rossii] // Social and economic problems of development and operation of city transportation systems and areas of their influence. Minsk: Publishing House of BNTU, 2018. Pp. 136–141.
9. Rapid bus transit. Guidelines on planning [Skorostnye avtobusnye perevozki. Rukovodstvo po planirovaniyu]. New York: Institute for Transportation and Development Policy, 2007. 1004 p.

УДК 629.4.015:625.1.03

Сергей Викторович Кротов, кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительная механика» Ростовского государственного университета путей сообщения (РГУПС), Ростов-на-Дону, Россия,

Дмитрий Павлович Кононов, доктор технических наук, профессор кафедры «Наземные транспортно-технологические комплексы» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС), Санкт-Петербург, Россия,

Александр Петрович Буйносов, доктор технических наук, профессор кафедры «Электрическая тяга» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия

ОПТИМИЗАЦИЯ ЭЛЕМЕНТАРНОЙ ДЕТАЛИ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Sergey Viktorovich Krotov, PhD in Engineering, Associate Professor, Structural Mechanics Department, Rostov State Transport University (RSTU), Rostov-on-Don, Russia,

Dmitriy Pavlovich Kononov, DSc in Engineering, Professor, Mechanical Handling and Road Building Machines Department, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (PSTU), St. Petersburg, Russia,

Alexander Petrovich Buynosov, DSc in Engineering, Professor, Electric Traction Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia

Optimization of an elementary part of rolling stock

Аннотация

Рассмотрены подходы к оптимизации известных конструкций традиционной балки подвижного состава. Исследован классический случай нагружения консоли силой. Получены значения напряжений и полных деформаций для консоли прямоугольного поперечного сечения. Изучена возможность оптимизировать конструкцию за счет снижения массы и предотвращения фактических напряжений выше предела текучести материала (местные напряжения не учитывались). На основе анализа полученных результатов предложен более рациональный профиль консоли — ее конструкция оптимизируется вдоль горизонтальной поперечной оси. Верификация напряжений и деформаций оптимизированной модели выполнена в расчетном модуле. Результаты показали значительное улучшение работоспособности оптимизированной конструкции консоли, которая обладает сниженной массой, не теряя при этом прочности и жесткости.

Ключевые слова: топологическая оптимизация, эквивалентное напряжение, деформация, верификация.

Abstract

The paper considers approaches to optimization of known designs of traditional rolling stock beam. The authors have studied a classic case of loading a console with force. They have gained values of stress and full deformations for a console with a rectangular cross-section. The authors have studied a possibility to optimize design by means of decrease of mass and prevention of actual stress above the limit of material fluidity (local stress hasn't been considered). On the basis of analysis of gained results they have proposed a more rational profile of a console — its construction is optimized along a horizontal transverse axis. Verification of stress and deformations of the optimized model have been carried out in a calculation module. Results show a significant improvement of workability of the optimized console design that differs in reduced mass without losing in strength and rigidity.

Keywords: topological optimization, equivalent stress, deformation, verification.

DOI: 10.20291/1815-9400-2023-1-65-69

ВВЕДЕНИЕ

Большинство исследований напряженно-деформированного состояния деталей железнодорожного подвижного состава выполняется при помощи метода конечных элементов (МКЭ) [1–5], что связано с развитием расчетных комплексов, таких как ANSYS, ABAQUS, NASTRAN, RSFEM и многих других. Используются всевозможные способы приложения нагрузок, влияние температуры, динамических воздействий, параметров контакта, явлений усталости и т.п. Приложение сил может быть местным, объемным, по площади и на удалении.

По мере того как системы автоматизированного проектирования (САПР) развиваются, а передовые технологии производства, такие как 3D-печать, становятся все более распространенными, что позволяет создавать сложные детали проще, чем когда-либо прежде, инженеры могут использовать программное обеспечение для оптимизации топологии, чтобы расширить границы и найти новые способы максимизации эффективности проектирования.

ТОПОЛОГИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ

Топологическая оптимизация (ТО) — это метод оптимизации формы, который использует алгоритмические модели для наилучшей компоновки материалов в заданном пользователем пространстве при заданных нагрузках и граничных условиях [6–8]. Метод применяется для повышения эффективности конструкции за счет удаления избыточного материала из областей, которые не требуют значительных нагрузок, для снижения веса или решения таких задач, как, например, уменьшение резонанса или теплового напряжения.

Конструкции, созданные с помощью топологической оптимизации, часто имеют сложные формы, которые трудно произвести традиционными методами. Однако конструкции

ТО идеально подходят для процессов аддитивного производства, которые имеют более строгие правила проектирования и могут легко воспроизводить сложные формы без дополнительных затрат [6–8].

Топологическая оптимизация обычно требуется, когда деталь должна иметь меньший вес или необходимо использовать меньше материалов. Затем определяются заданные параметры, такие как нагрузки, тип материала, ограничения и компоновка [6–8].

Наиболее распространенным и практичным при топологической оптимизации является метод конечных элементов [1–5]. Во-первых, МКЭ учитывает геометрическую конструкцию для минимально допустимого пространства наряду с другими факторами и разбивает конструкцию на части. Во-вторых, он проверяет каждый конечный элемент (КЭ) на жесткость, соответствие и избыточный материал. И наконец, МКЭ сшивает детали вместе, чтобы завершить полный дизайн.

Многие сложные геометрические формы, возникающие в результате оптимизации топологии, при использовании традиционных методов делают производственные затраты слишком высокими. Но в сочетании с 3D-печатью стоимость нивелируется. По сравнению с традиционными инструментами для вычитания деталей, изготовленных с помощью аддитивных процессов, как правило, требуется меньше сырья и образуется меньше отходов.

Часто наиболее значительная экономия достигается в течение всего срока службы деталей. Например, легкие детали снижают воздействие транспорта на окружающую среду, требуя меньше топлива.

Высокопроизводительные, эффективные и легкие конструкции, полученные с помощью методов оптимизации топологии, применяются в широком спектре отраслей промышленности. Топологическая оптимизация может использоваться, например, для улучшения компоновки элементов конструкции вагона, таких как ребра жесткости или несущие балки [9].

На транспорте топологическая оптимизация уравнивает необходимость легких деталей с точки зрения экономичности и мощности со стабильностью и прочностью кузова, способного выдерживать крутящий момент и удары [2–5, 9]. Помимо экономии массы, ТО также может повысить безопасность пассажиров за счет определения способа разрушения конструкции

во время аварии. Аддитивное производство идеально подходит для создания поверхностей свободной формы и пористых структур. Благодаря топологической оптимизации можно получать более легкие решетчатые структуры, которые обеспечивают интеграцию и служат дольше, чем аналогичные [6–8].

Все чаще признается универсальность, скорость и возможности оптимизации топологии. Разработчики программного обеспечения реагируют на это, предоставляя необходимые наборы инструментов либо в рамках своих ранее существовавших предложений, либо с помощью новых программных решений.

В ANSYS оптимизация топологии включена в число инструментов структурного анализа и предлагает множество методов для возврата оптимизированных конструкций в САПР [9]. Для создания модели прямоугольной балки используем программный комплекс ANSYS Workbench [10]. Проектировать конструкцию можно непосредственно в нем. Для этого с помощью инструмента Design Assessment (рис. 1) и оператора Extrude вычерченное поперечное сечение в виде прямоугольника размерами 50×100 мм выдавливаем на длину 500 мм (рис. 2).

Далее активируем расчетный модуль Static Structural (см. рис. 1) — в нем будут выполнены предварительные расчеты напряжений и деформаций в балке-консоли, жестко закрепленной одним концом, к которой приложена сила $F = 10000$ Н по вертикали (см. рис. 2).

Эту прямоугольную балку и будем оптимизировать, для чего поставим цель снизить вес конструкции, изымая часть ее материала, чтобы напряжения в оптимизированной балке не превысили предела текучести.

Далее выполняем операцию разбиения модели на конечные элементы при помощи инструмента Mesh. В данном случае не требуется особой точности, поэтому, задавая определенное количество конечных элементов по ребрам модели при помощи оператора Sizing, получим равномерную сетку КЭ.

Выполняя граничные условия, выбираем для закрепления правую торцевую поверхность модели и при помощи оператора Fixed жестко ограничиваем движение торца по всем направлениям. Балка жестко закреплена.

Материал балки используем по умолчанию с параметрами малоуглеродистой стали (модуль продольной упругости $E = 2 \cdot 10^5$ МПа, модуль сдвига $G = 8 \cdot 10^4$ МПа, коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$), поясняющими жесткость материала.

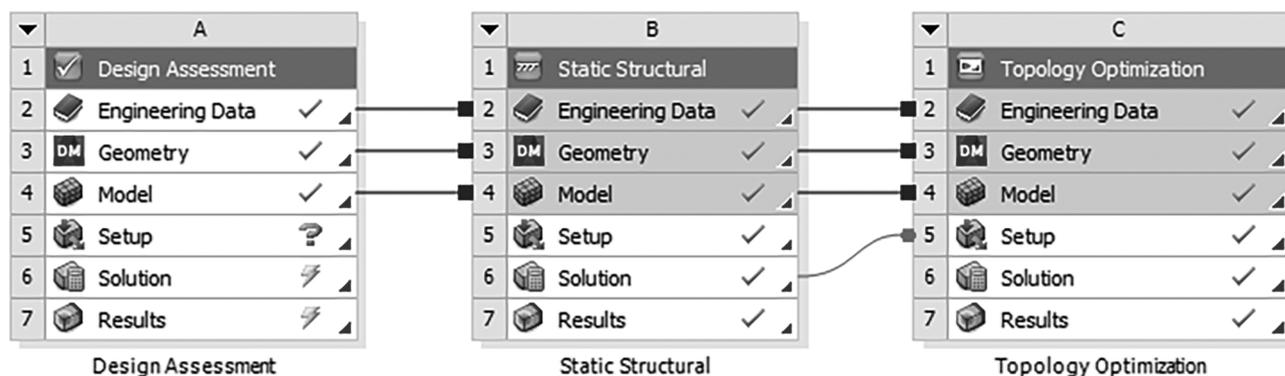


Рис. 1. Последовательность расчетов

Теперь, используя модуль Solution, решаем задачу, получая при этом эквивалентные напряжения по теории прочности Мизеса, а также вертикальное перемещение свободного конца балки. Распределение эквивалентных напряжений представлено на рис. 3 (максимальное значение составляет 59,2 МПа).

Распределение деформаций показано на рис. 4, максимальное перемещение (прогиб) составляет $5 \cdot 10^{-4}$ м.

После выполнения расчетов приступаем к оптимизации балки. Для этого используем встроенный модуль Topology Optimization (см. рис. 1). В нем произведем настройки Analysis Settings решателя. Например, количество итераций выберем равным 500, минимальную нормализованную плотность 0,001, точность сходимости 0,3 %, штрафной коэффициент (жесткость) 3.

Важным инструментом является Optimization Region, т.е. зона тела балки, которая будет оптимизирована. По краям балки выделим площадки торцов, где приложены граничные условия, которые не будут подвергаться оптимизации, — это зона Exclusion Region.

Самое главное — корректно поставить задачу, чтобы обеспечить сходимость и в то же время получить оптимизированную конструкцию. Оптимизированная конструкция должна быть такой, чтобы ее можно было воспроизвести при изготовлении, используя аддитивные технологии, чтобы она была не слишком сложна и вместе с тем отвечала требованиям инженера.

Важнейший этап — Objective. Здесь выбирается критерий оптимизации (например, податливость, масса или объем). Используем наиболее часто употребляемый критерий податливости — максимизацию жесткости.

В данном случае в опциях Response Constraint для определения удерживаемой массы Mass Retain выбран параметр 40 %, а также поставлено условие не превышения эквивалентными напряжениями по Мизесу отметки предела текучести малоуглеродистой стали 240 МПа.

При извлечении массы с целью оптимизации указана горизонтальная ось в поперечном направлении.

В модуле Solution установим запрос Topology Density. Начальная конструк-

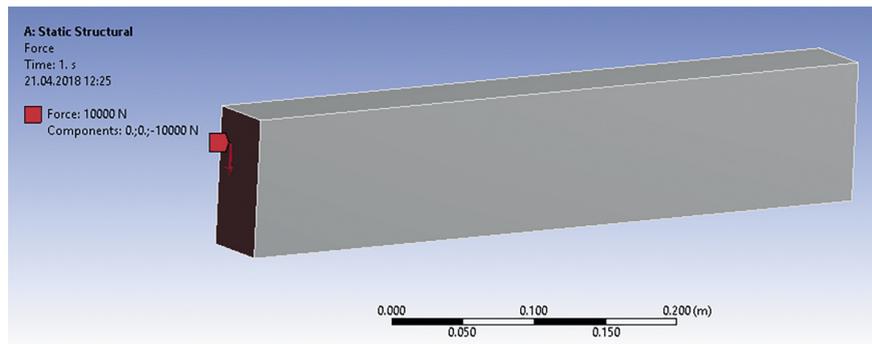


Рис. 2. Модель прямоугольной балки

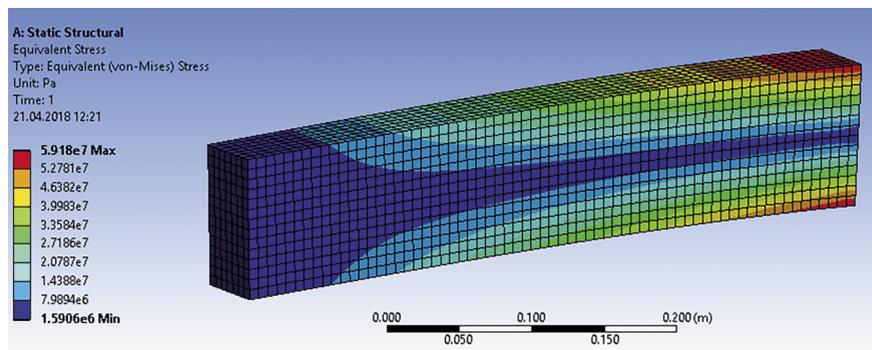


Рис. 3. Распределение эквивалентных напряжений в балке

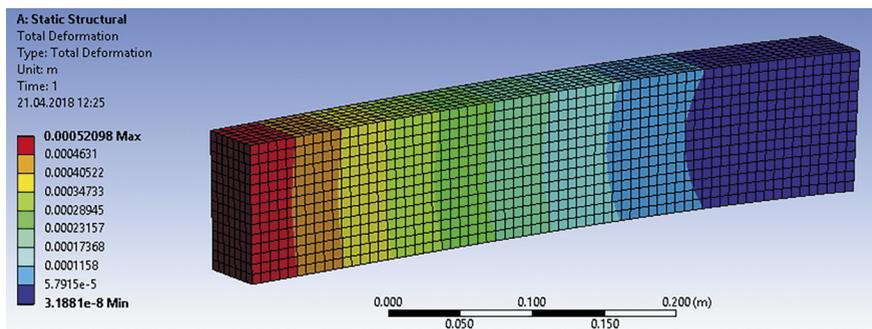


Рис. 4. Распределение деформаций в балке

ция имеет массу 19,625 кг, а полученная оптимизированная 8,75 кг, или 44,5 % от начальной. При этом машинное время составило более 21 мин. Очевидно, что при задании дополнительных условий, а также из-за сгущения сетки с целью получения более гладких и простых поверхностей задача становится сложнее, следовательно, и затраты времени будут большими. Предварительно оптимизированная конструкция балки представлена на рис. 5.

Оптимизированную конструкцию можно верифицировать по выполнению условия прочности — получить распре-

деление напряжений. Однако очевидно, что полученные поверхности довольно сложны. Поэтому можно использовать процедуру их сглаживания непосредственно в Workbench или передать в модуль Space Claim Design Modeler (SCDM), включив в управляющих панелях команду Transfer to Validation System.

SCDM обладает всеми средствами проектирования, такими как черчение, построение, представление и т.п. Поэтому в нем выполнено сглаживание, и полученная модель передана в расчетный комплекс, в котором и проведена ее верификация при тех же граничных условиях

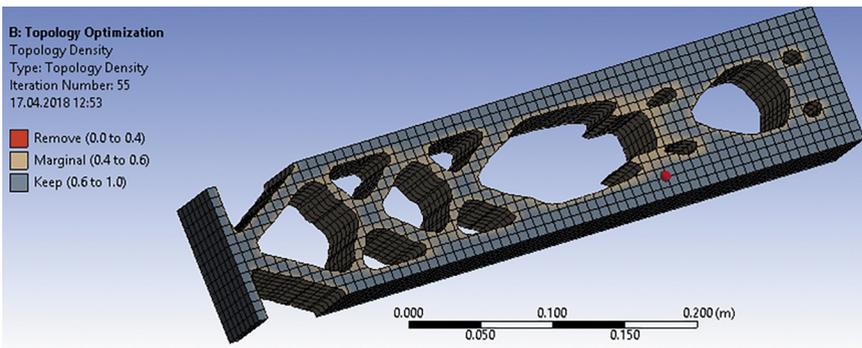


Рис. 5. Предварительно оптимизированная конструкция балки

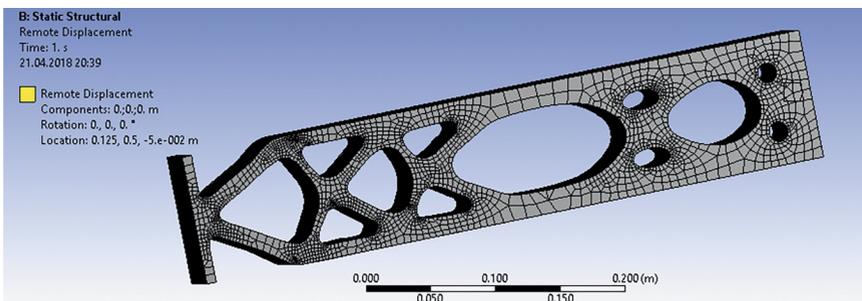


Рис. 6. Сетка конечных элементов в оптимизированной конструкции

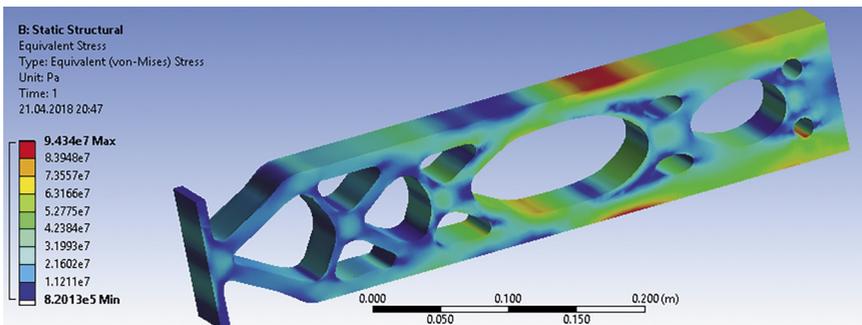


Рис. 7. Распределение эквивалентных напряжений в оптимизированной конструкции

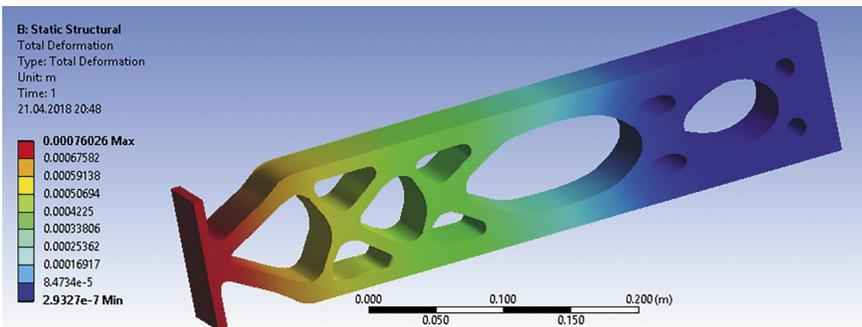


Рис. 8. Распределение деформаций в оптимизированной конструкции

и той же нагрузке. Сетка конечных элементов сгущена в областях сплайнов, чтобы не пропустить опасную концентрацию напряжений (рис. 6).

Распределение фактических эквивалентных напряжений (рис. 7) показывает, что максимальное значение составляет 94,3 МПа, т.е. наблюдается рост напряжений в 1,59 раза. Однако они не опасны по сравнению с пределом текучести ($\sigma_{\text{факт}} < \sigma_T = 240$ МПа). Запас прочности

$$n_T = \frac{\sigma_T}{\sigma_{\text{факт}}} = 2,55.$$

Следует отметить, что концентрация максимальных напряжений теперь находится не возле защемления, а смещена вперед к свободному концу балки и занимает весьма ограниченную площадь, в отличие от оригинала, где протяженность зон с высокими напряжениями была больше.

Распределение деформаций показано на рис. 8. Максимальное перемещение (прогиб) составляет $7,6 \cdot 10^{-4}$ м. Значение перемещения свободного конца выше в 1,46 раза. Если принять, что требование жесткости для балок неотвечественных конструкций — прогиб не более 0,003 длины пролета, а в нашем случае это $1,67 \cdot 10^{-4}$ м, то оптимизированная балка более чем в два раза удовлетворяет требованию жесткости.

Таким образом, результат оптимизации следует признать удовлетворительным, поскольку требования прочности и жесткости выполнены.

Отметим, что в статье рассмотрен демонстрационный пример, однако при более скрупулезном расчете можно выполнить выдавливание материала также и по вертикали, задать условие снижения не массы, а, например, объема и пр.

Оптимизация топологии элемента конструкции имеет всевозможные средства для снижения веса сооружения в целом и при этом позволяет сохранять прочностные свойства, параметры жесткости, что положительно сказывается на долговечности и работоспособности конструкции.

Литература

1. Krotov S. V., Krotov V. P. Application of the discriminant analysis at research of bearing ability of the wheel pair of the car // Transport problems. 2011. Vol. 6. Issue 1. Pp. 43–49.
2. Кротов С. В., Кротов В. П. Напряженно-деформированное состояние колесной пары вагона при повышении режимов нагружения // Вестник РГУПС. 2002. № 2. С. 36–39. ISSN 0201-727X.
3. Кротов С. В., Кононов Д. П. Определение вертикальных динамических сил, действующих на колесо в контакте с рельсом // Известия ПГУПС. 2015. № 3 (44). С. 70–76. ISSN 1815-588X.
4. Кротов С. В., Кротов В. П. Классификация параметров несущей способности прессового соединения колесной пары железнодорожного транспортного средства // Вестник РГУПС. 2007. № 2 (26). С. 22–28. ISSN 0201-727X.
5. Кротов С. В., Кононов Д. П. Контактная-усталостная долговечность рельсовой и колесной стальной // Известия ПГУПС. 2018. Т. 15. № 1. С. 54–61. ISSN 1815-588X.
6. Bendsoe M. P., Sigmund O. Topology Optimization: Theory, Methods and Application. Heidelberg : Springer, 2003. 370 p.
7. Eschenauer H. A., Olhoff N. Topology optimization of continuum structures: A review // Appl. Mech. Rev. 2001. Vol. 54. No. 4. Pp. 331–389.
8. Lee E., James K. A., Martins J. R. A. Stress-constrained topology optimization with design-dependent loading // Structural and Multidisciplinary Optimization. 2011. No. 46 (5). 15 p. DOI: 10.1007/s00158-012-0780-x.
9. Developing Topology Optimization with Additive Manufacturing Constraints in ANSYS / D. Jankovics, H. Gohari, M. Tayefeh, A. Barari // IFAC-PapersOnLine. 2018. 51 (11). 1359-1364. DOI: 10.1016/j.ifacol.2018.08.340.
10. Tsavdaridis K. D., Kingman J. J., Toropov V. V. Application of Structural Topology Optimization to Perforated Steel Beams // Computers & Structures. 2015. 158. 108–123. DOI: 10.1016/j.compstruc.2015.05.004.

Объем статьи 0,58 авторских листа

References

1. Krotov S. V., Krotov V. P. Application of the discriminant analysis at research of bearing ability of the wheel pair of the car // Transport problems. 2011. Vol. 6. Issue 1. Pp. 43–49.
2. Krotov S. V., Krotov V. P. Stress-strain condition of car wheelset at increase of loading modes [Napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie kolesnoy pary vagona pri povyshenii rezhimov nagruzheniya] // Vestnik RGUPS. 2002. No. 2. Pp. 36–39. ISSN 0201-727X.
3. Krotov S. V., Kononov D. P. Determination of vertical dynamic forces acting on the wheel in contact with a rail [Opredelenie vertikal'nykh dinamicheskikh sil, deystvuyushhikh na koleso v kontakte s rel'som] // Proceedings of Petersburg Transport University. 2015. No. 3 (44). Pp. 70–76. ISSN 1815-588X.
4. Krotov S. V., Krotov V. P. Classification of parameters of bearing capacity of railway vehicle wheelset press-fit connection [Klassifikatsiya parametrov nesushhey sposobnosti pressovogo soedineniya kolesnoy pary zheleznodorozhnogo transportnogo sredstva] // Vestnik RGUPS. 2007. No. 2 (26). Pp. 22–28. ISSN 0201-727X.
5. Krotov S. V., Kononov D. P. Contact fatigue durability of track and wheel steel [Kontaktно-ustalostnaya dolgovechnost' rel'sovoy i kolesnoy staley] // Proceedings of Petersburg Transport University. 2018. Vol. 15. No. 1. Pp. 54–61. ISSN 1815-588X.
6. Bendsoe M. P., Sigmund O. Topology Optimization: Theory, Methods and Application. Heidelberg : Springer, 2003. 370 p.
7. Eschenauer H. A., Olhoff N. Topology optimization of continuum structures: A review // Appl. Mech. Rev. 2001. Vol. 54. No. 4. Pp. 331–389.
8. Lee E., James K. A., Martins J. R. A. Stress-constrained topology optimization with design-dependent loading // Structural and Multidisciplinary Optimization. 2011. No. 46 (5). 15 p. DOI: 10.1007/s00158-012-0780-x.
9. Developing Topology Optimization with Additive Manufacturing Constraints in ANSYS / D. Jankovics, H. Gohari, M. Tayefeh, A. Barari // IFAC-PapersOnLine. 2018. 51 (11). 1359–1364. DOI: 10.1016/j.ifacol.2018.08.340.
10. Tsavdaridis K. D., Kingman J. J., Toropov V. V. Application of Structural Topology Optimization to Perforated Steel Beams // Computers & Structures. 2015. 158. 108–123. DOI: 10.1016/j.compstruc.2015.05.004.

УДК 621.19

Евгений Юрьевич Рогов, преподаватель Курганского института железнодорожного транспорта (КИЖТ), Курган, Россия,

Виктор Евгеньевич Овсянников, доктор технических наук, доцент кафедры «Машиностроение» Курганского государственного университета (КГУ), Курган, Россия,

Валерий Иванович Васильев, доктор технических наук, профессор кафедры «Автомобили и автомобильный транспорт» Курганского государственного университета (КГУ), Курган, Россия,

Василий Федорович Лапшин, доктор технических наук, профессор кафедры «Вагоны» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия

РАЗРАБОТКА ПОДХОДА К ПОВЫШЕНИЮ КАЧЕСТВА РЕМОНТА ОСЕЙ КОЛЕСНЫХ ПАР

Evgeniy Yuryevich Rogov, Lecturer, Kurgan Institute of Railway Transport (KIRT), Kurgan, Russia,

Viktor Evgenyevich Ovsyannikov, DSc in Engineering, Associate Professor, Mechanical Engineering Department, Kurgan State University (KSU), Kurgan, Russia,

Valeriy Ivanovich Vasilyev, DSc in Engineering, Professor, Automobiles and Motor Vehicles Department, Kurgan State University (KSU), Kurgan, Russia,

Vasiliy Fedorovich Lapshin, DSc in Engineering, Professor, Railway Cars Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia

Development of approach to increase quality of repair of wheelset axles

Аннотация

Одно из основных требований, которые предъявляются к исполнительным поверхностям осей колесных пар, — точность формы в поперечном направлении (отклонение от круглости). Поскольку методы окончательной обработки (бесцентровое шлифование и обкатка роликами) не исправляют погрешность формы, то для обеспечения требуемой точности формы применяются токарные операции, в том числе на станках с числовым программным управлением (ЧПУ). При использовании таких станков возникает необходимость выявить процессы, которые оказывают основное влияние на погрешность обработки, и разработать подход, снижающий это влияние.

В статье рассмотрены особенности формирования текстуры поперечного профиля деталей тел вращения при токарной обработке. С использованием теории случайных процессов и методов фрактальной геометрии проведены исследования систематических и случайных составляющих профиля. На основе анализа полученных результатов показано, что при чистовой обработке доминирующее влияние имеют вибрации элементов обрабатываемой системы, и сформулирован подход к автоматическому обеспечению требуемых параметров точности формы осей колесных пар при обработке на станках с ЧПУ.

Ключевые слова: ось, колесная пара, ремонт, овальность, текстура, станки с числовым программным управлением.

Abstract

One of the main requirements, which is set to executive surfaces of wheelset axles, is an accuracy of a form in transverse direction (deviation from roundness). Since methods of final processing (centerless grinding and rolling) don't correct inaccuracies of the form, for the provision of the required accuracy of the form turn machining operations are used, including operations on the numerically controlled machines. At the application of such machines it is necessary to reveal processes that have a major impact on processing inaccuracy and to develop an approach that will decrease the impact.

The paper considers features of creating a texture of the transverse profile of rotation body parts at turning. With the use of the random processes theory and methods of fractal geometry the authors studied systematic and random components of the profile. On the basis of analysis of gained results the authors show that at finishing processing vibrations of elements of the processing system have a major impact. As a result, they have formulated an approach to automatic provision of required parameters of accuracy of the form of wheelset axles at processing with the use of numerically controlled machinery.

Keywords: axle, wheelset, repair, out-of-roundness, texture, numerically controlled machinery.

DOI: 10.20291/1815-9400-2023-1-70-74

70

Январь–Март

ВВЕДЕНИЕ

Оси колесных пар относятся к числу ответственных деталей подвижного состава. При этом они испытывают повышенные нагрузки (особенно при торможении), что вызывает образование рисок и задиrow на их исполнительных поверхностях, а также в целом приводит к интенсивному износу, нарушению характера посадок и т. д.

Практически ко всем исполнительным поверхностям осей колесных пар, согласно ГОСТ 33200–2014 [1], предъявляются требования по отклонениям от круглости в пределах 0,015–0,02. Известно, что отклонения от круглости влияют на основные эксплуатационные свойства осей — износостойкость, прочность посадок с натягом, стойкость к задиrow и т. д.

Влияние отклонений от круглости на интенсивность изнашивания изучено в работах [2, 3]. Зависимости, которые характеризуют это воздействие, имеют вид [2, 3]

$$\alpha = \alpha'_0 + b'\varepsilon, \quad (1)$$

где α'_0 — интенсивность изнашивания при правильной (круглой) геометрической форме, мкм/ч; b' — изменение на единицу овальности, 1/4; ε — отклонение от круглости, мкм.

В работах [2, 3] установлено, что износостойкость снижается пропорционально росту погрешности формы.

Зависимость для оценки стойкости поверхности к задиrow предложена в [4]:

$$K_3 = 3,02 \cdot 10^{-3} \cdot f \cdot \sqrt[4]{P(\sqrt{V_1} - \sqrt{V_2})} \cdot \sqrt[4]{p}, \quad (2)$$

где f — коэффициент трения; P — погонная нагрузка в контакте, Н; V_1, V_2 — скорости элементов пары трения, м/с; p — приведенный радиус контакта, мм.

Овальность снижает стойкость к образованию задиrow, так как меняются радиус, погонная нагрузка и условия контакта.

Влияние отклонений от круглости на характеристики посадок исследовано в работах [5, 6]. При этом зависимость для коэффициента трения в контакте имеет вид

$$f = K_C A_C + K_V A_V, \quad (3)$$

где A_C и A_V — соответственно постоянная и переменная составляющие контактного объема, мм³; K_C, K_V — коэффициенты.

Увеличение некруглости приводит к снижению прочности посадки, поскольку меняются условия контакта.

Таким образом, требуемые значения круглости дают возможность обеспечить заданные эксплуатационные свойства осей колесных пар. Причем при изготовлении новых осей (в том числе и в ремонтном производстве) применяется токарная обработка, а затем в качестве финишной обработки используется бесцентровое шлифование. Изношенные оси колесных пар, согласно РД ВНИИЖТ 27.05.01–2017, можно восстанавливать при помощи обработки на токарных станках с последующим обкатыванием роликами. Оба варианта финишной обработки характеризуются тем, что не исправляют погрешность формы, полученной на предыдущих операциях. Соответственно для обеспечения требуемой точности формы токарную обработку

оси колесной пары можно рассматривать как окончательную. Схема образования выходных параметров процесса обработки представлена на рис. 1.

В практике ремонта и изготовления осей колесных пар на предприятиях и в организациях, входящих в состав ОАО «РЖД», все большее распространение получают станки с числовым программным управлением (ЧПУ). В частности, для токарной обработки осей колесных пар используются станки с числовым программным управлением CA1100C30Ф3, Rafamet TOS 80 CNC, а также модернизированные версии станков модели КЖ1832, в которых управление копирным командоаппаратом заменено на управление от стойки ЧПУ. В указанных выше случаях предполагается, что обработка ведется на настроенном станке, следовательно, для получения требуемых параметров точности и качества обработки необходимо определить процессы (см. рис. 1), которые оказывают основное влияние на погрешность обработки, и выработать подход, снижающий это влияние.

Соответственно цель исследования, представленного в статье, — разработка подхода и средств, которые позволят обеспечить требуемую точность формы при обработке на токарных станках и которые могут быть использованы для повышения качества ремонта осей колесных пар.



Рис. 1. Схема образования выходных параметров процесса обработки осей колесных пар

ПРЕДЛАГАЕМАЯ МЕТОДИКА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Обычно требования к допускам формы и расположению поверхностей задают, ориентируясь только на высотные параметры: $EFK (F)$ — отклонение от круглости (максимальная величина), $EFKa (Fa)$ — среднее арифметическое отклонение от круглости, $EFKq (Fq)$ — среднее квадратическое отклонение от круглости, $TFE (a/b)$ — параметр, характеризующий овальность.

Как видно из схемы, представленной на рис. 2, профиль реальной поверхности состоит из двух составляющих — систематической, которая определяется геометрией и кинематикой процесса обработки, и случайной, зависящей от вибраций технологической системы. Знание о количественном соотношении этих составляющих позволяет более эффективно обеспечивать выполнение требований к точности формы в поперечном сечении при изготовлении и ремонте деталей.

Одним из инструментов для исследования текстуры профиля является теория случайных процессов. При ее использовании делается допущение, что анализируемый профиль обладает свойствами стационарности и эргодичности [7]. Тогда задача сводится к определению корреляционной функции

$$K_{xx}(\tau) = \frac{1}{l - \tau} \sum_{i=0}^{l-\tau} y(x)y(x + \tau), \quad (4)$$

где τ — переменная разность между абсциссами двух сечений профилограммы (шаг корреляции), $\tau = 0, 1, 2, \dots, \tau_{\max}$; l — длина профилограммы, мм; $y(x)$ — ординаты профилограммы.

С учетом того что профиль состоит из случайной и систематической компонент, выражение (4) можно представить в виде суммы составляющих — систематической $K_{\beta}(\tau)$ и случайной $K_{\gamma}(\tau)$:

$$K_{xx}(\tau) = K_{\beta}(\tau) + K_{\gamma}(\tau) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n A_i^2 \cos \omega_i \tau + K_{\gamma}(\tau). \quad (5)$$

Использование составляющей $K_{\gamma}(\tau)$ позволяет определить уровень случайной компоненты γ при известной величине дисперсии случайной составляющей D_{γ} на основе выражения

$$\gamma = \frac{D_{\gamma}}{F_q^2}, \quad (6)$$

где F_q — среднее квадратическое отклонение профиля, определяемое при некотором числе измерений диаметров с дискретностью угла поворота ϕ по формуле

$$F_q = \sqrt{\frac{1}{N} \int_0^N h(\phi)^2 d\phi}. \quad (7)$$

Таким образом, чем выше значение уровня случайной компоненты γ , тем больше роль вибраций в формировании текстуры профиля.

Для вычисления корреляционных функций и уровня случайной компоненты профиля была разработана прикладная компьютерная программа, интерфейс которой представлен на рис. 2.

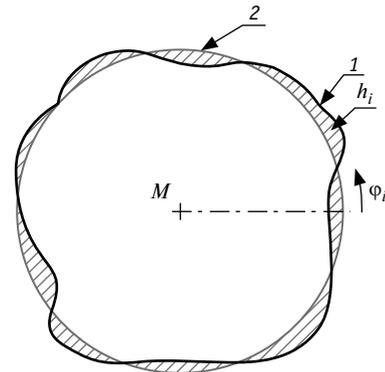


Рис. 2. Текстура профиля посадочной поверхности оси колесной пары в поперечном сечении:

- 1 — реальный профиль; 2 — средняя окружность;
- M — абсолютные значения профиля; ϕ_i — угол поворота;
- h_i — отклонение между реальной и средней окружностью

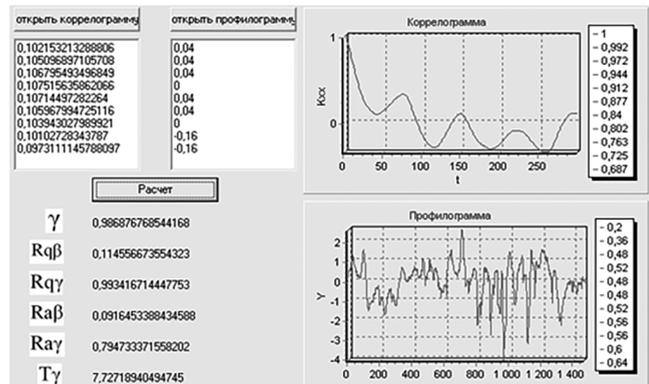


Рис. 2. Интерфейс программы по расчету параметров коррелограмм

Кроме того, в качестве инструментария для исследования можно использовать фрактальную геометрию [8, 9]. Известно, что величина фрактальной размерности D также характеризует степень случайности объекта. Чем ближе значение фрактальной размерности к 1,5, тем уровень случайной компоненты выше. В нашем исследовании значение фрактальной размерности определялось через показатель Херста (H). Причем обе величины для двумерных объектов связаны выражением

$$D = 2 - H. \quad (8)$$

Для вычисления показателя Херста была разработана прикладная компьютерная программа (рис. 3).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Эксперименты проводились на токарном станке с ЧПУ. Параметры серии экспериментов:

- станок 1И611ПМФ3;
- материал деталей — сталь 45, 40Х, материал резца — В0К60;
- термообработка (ТВЧ), твердость до 54 HRC;
- диаметр заготовок — 50 мм, глубина резания — 0,2 мм,
- число оборотов — 630 об/мин;
- подача — 20, 40, 60, 80, 100, 120 мм/мин.

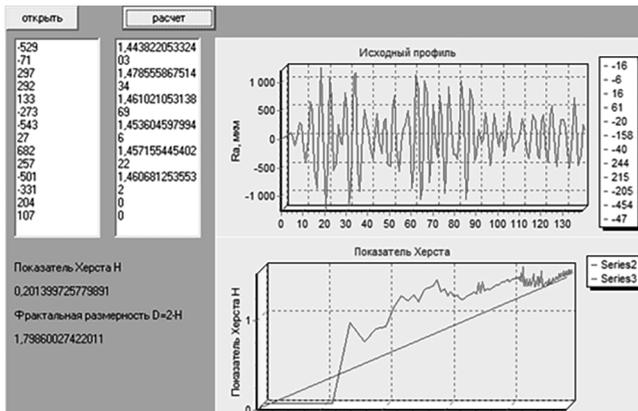


Рис. 3. Интерфейс программы по расчету фрактальной размерности (через показатель Херста)

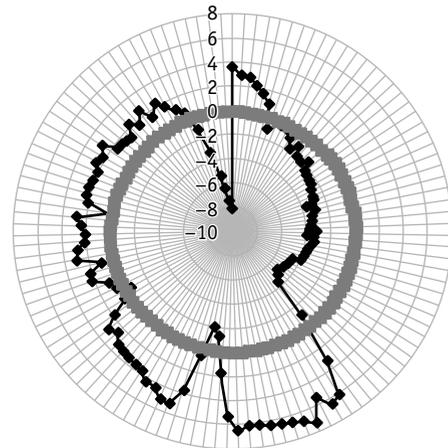


Рис. 4. Круглограмма, подача 60 мм/мин

Отклонения от круглости измерялись на станке. Цена деления индуктора 0,0001 мм. Данные записывались в файл, угол поворота детали 3° (120 измерений на диаметре). Пример круглограммы обработанной посадочной поверхности представлен на рис. 4.

Исходные параметры для определения значений уровня случайной компоненты γ и показателя Херста приведены в табл. 1.

Результаты расчетов уровня случайной компоненты γ и показателя Херста для круглограмм профилей поверхностей, обработанных с представленными значениями подачи (в диапазоне от 20 до 120 мм/мин), приведены в табл. 2.

Важным аспектом является также сопоставление полученных данных с параметрами вибраций технологической системы. Результаты расчетов взаимной корреляции между Fa и дисперсией вибросигнала представлены на рис. 5.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ полученных результатов (см. табл. 2) позволяет сделать вывод, что повышение подачи приводит к увеличению доли случайной компоненты в профиле поверхности. Это говорит о том, что вибрации представляют собой значимый фактор, влияющий на результирующий профиль. Как видно из рис. 3, значение коэффициента корреляции достигает 0,92, что подтверждает приведенный выше вывод.

Полученные результаты могут быть использованы в системах контроля и обеспечения точности формы при обработке деталей на станках. Это направление, в частности, актуально при изготовлении и ремонте осей колесных пар, так как для получения нужных эксплуатационных свойств необходима требуемая точность формы.

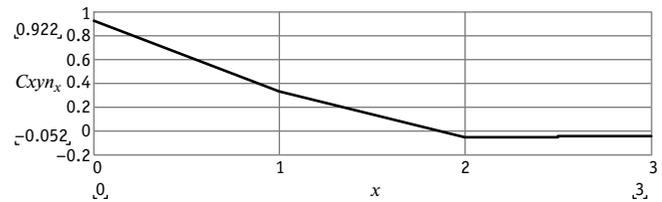


Рис. 5. Коэффициент корреляции между среднеарифметическим отклонением профиля и дисперсией вибросигнала:
 $S_{хуп,х}$ — коэффициент взаимной корреляции; x — шаг корреляции

Таблица 1

Исходные данные для анализа текстуры профиля

Показатель	Подача, мм/мин					
	20	40	60	80	100	120
$K(0)$	71,491	14,939	7,174	11,358	16,587	1,318
$Fa(K(0))$	6,746	3,084	2,137	2,689	3,25	0,916
Fa	6,842	3,395	2,215	2,764	3,79	0,769
Сумма Фурье	8,684	6,623	4,297	3,896	4,947	1,492

Таблица 2

Результаты расчетов параметров текстуры профиля

Показатель	Подача, мм/мин					
	20	40	60	80	100	120
γ	0,09	0,20	0,29	0,24	0,19	0,72
H	0,88	0,86	0,86	0,89	0,92	0,66

Литература

1. ГОСТ 33200–2014. Оси колесных пар железнодорожного подвижного состава. Общие технические условия. Москва : Стандартинформ, 2015. 42 с.
2. Восстановление деталей силового агрегата КАМАЗ 740.11-240 (Euro-1) / Р. А. Азаматов, А. С. Денисов, А. Т. Кулаков, П. Г. Курдин ; под ред. А. С. Денисова. Набережные Челны : ОАО «КАМАЗТЕХОБСЛУЖИВАНИЕ», 2007. 306 с.
3. Авдонькин Ф.Н. Оптимизация изменения технического состояния автомобилей. Москва : Транспорт, 1993. 352 с.
4. Березин К. Г. Повышение задиростойкости фрикционного контакта червячной пары трения : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Иваново, 2012. 155 с.
5. Андреев Г. Я. Тепловая сборка колесных пар. Харьков : Изд-во Харьковского ун-та, 1965. 227 с.
6. Куприянов А. Ю. Прочность соединения с натягом при наличии погрешности геометрии формы // Вестник Херсонского национального технического университета. 2015. № 3 (54). С. 145–150. ISSN 2078-4481.
7. Остапчук А. К., Овсянников В. Е. Научные основы обеспечения шероховатости поверхности на базе анализа случайных процессов : монография. Курган : Изд-во КГУ, 2012. 188 с.
8. Остапчук А. К., Овсянников В. Е. Применение теории фракталов в математическом моделировании и технике. Курган : Изд-во КГУ, 2009. 64 с.
9. Симонов А. М., Остапчук А. К., Овсянников В. Е. Основы обеспечения качества поверхности деталей машин с использованием динамического мониторинга : монография. Курган : Изд-во КГУ, 2010. 118 с.

Объем статьи 0,45 авторских листа

References

1. GOST 33200-2014. Axles for wheelsets of railway rolling stock. General specifications [Osi kolesnykh par zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava. Obshhie tekhnicheskie usloviya]. Moscow : Standardinform, 2015. 42 p.
2. Recovery of parts of the KAMAZ 740.11-240 (Euro-1) power unit [Vosstanovlenie detaley silovogo agregata KAMAZ 740.11-240 (Euro-1)] / R. A. Azamatov, A. S. Denisov, A. T. Kulakov, P. G. Kurdin ; ed. by A. S. Denisov. Naberezhnye Chelny : OJSC «KAMAZTECHOSLUZHIVANIE», 2007. 306 p.
3. Avdonkin F. N. Optimization of change of technical state of automobiles [Optimizatsiya izmeneniya tekhnicheskogo sostoyaniya avtomobiley]. Moscow : Transport, 1993. 352 p.
4. Berezin K. G. Increase of the friction resistance of the friction contact of the worm pair of friction [Povyshenie zadirostoykosti friktsionnogo kontakta chervyachnoy pary treniya] : PhD in Engineering Thesis. Ivanovo, 2012. 155 p.
5. Andreev G. Ya. Thermal assembling of wheelsets [Teplovaya sborka kolesnykh par]. Kharkov : Publishing House of Kharkov State University, 1965. 227 p.
6. Kupriyanov A. Yu. Durability of cylindrical joint with interference fit with inaccuracy of geometrical form [Prochnost' soedineniya s natyagom pri nalichii pogreshnosti geometrii formy] // Bulletin of Kherson National Technical University. 2015. No. 3 (54). Pp. 145–150. ISSN 2078-4481.
7. Ostapchuk A. K., Ovsyannikov V. E. Scientific basics of provision of surface roughness on the basis of analysis of random processes [Nauchnye osnovy obespecheniya sherokhovatosti poverkhnosti na baze analiza sluchaynykh protsessov] : monograph. Kurgan : Publishing House of Kurgan State University, 2012. 188 p.
8. Ostapchuk A. K., Ovsyannikov V. E. Application of fractal theory in mathematical modeling and engineering [Primenenie teorii fraktalov v matematicheskom modelirovanii i tekhnike]. Kurgan : Publishing House of Kurgan State University, 2009. 64 p.
9. Simonov A. M., Ostapchuk A. K., Ovsyannikov V. E. Basics of quality provision of machine parts surfaces with the use of dynamic monitoring [Osnovy obespecheniya kachestva poverkhnosti detaley mashin s ispol'zovaniem dinamicheskogo monitoringa] : monograph. Kurgan : Publishing House of Kurgan State University, 2010. 118 p.

УДК 656.216.2

Антон Николаевич Попов, кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия

СИСТЕМА ДЛЯ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ СТОЛКНОВЕНИЙ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ПЕРЕЕЗДЕ ПРИ ВЫНУЖДЕННОЙ ОСТАНОВКЕ АВТОТРАНСПОРТА

Anton Nikolaevich Popov, PhD in Engineering, Associate Professor, Railway Automation, Telemechanics and Communication Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia

System for prevention from collisions at railway crossing at forced stop of motor transport

Аннотация

Предложена реализация системы для предотвращения столкновений на железнодорожном переезде при вынужденной остановке автотранспорта. Рассмотрен алгоритм, особенности реализации и варианты применения существующей аппаратуры для построения системы. Описан опытный образец устройства управления, необходимый для создания предложенной системы. Выявлены преимущества предлагаемых решений по сравнению с существующими системами автоматической переездной сигнализации.

Ключевые слова: железнодорожный переезд, автоматическая переездная сигнализация, участок извещения, тормозной путь, бортовой локомотивный комплекс.

Abstract

The paper suggests a realization of a system for prevention from collisions at a railway crossing at a forced stop of motor transport. The author considers an algorithm, features of realization and variants of application of existing equipment for the system creation. Moreover, the author describes a control device prototype that is necessary for creating the suggested system. As a result, the paper presents advantages of the proposed solutions in comparison with existing automatic level crossing safety installation systems.

Keywords: railway crossing, automatic level crossing safety installation, notification section, braking distance, locomotive on-board complex.

DOI: 10.20291/1815-9400-2023-1-75-81

Актуальность изучения вопросов, связанных с разграничением движения на железнодорожных переездах, обусловлена повышенным риском транспортных происшествий, тяжестью их последствий, а также наличием различных ограничений для транспортных средств.

Для исследования роста нагрузки на переезды следует рассмотреть относительные показатели аварийности: количество дорожно-транспортных происшествий (ДТП), число пострадавших и погибших, приходящихся на один переезд (рис. 1 и 2) [1].

Как видно из рис. 1 и 2, количество ДТП, число пострадавших и погибших в пересчете на один переезд не имеет ярко выраженной динамики. Пока меры, предпринимаемые на неликвидированных переездах, не позволяют существенно снизить количество ДТП и тяжесть их последствий. Поэтому в условиях повышения интенсивности движения поездов и автомобильного транспорта ситуация с аварийностью на переездах продолжит ухудшаться, если не совершенствовать методы безопасности.

Всего на сети магистральных железных дорог эксплуатируется более 10,5 тыс. переездов, но в последние годы их число в эксплуатации непрерывно сокращалось (рис. 3).

Количество переездов на магистральных железнодорожных линиях, находящихся в эксплуатации, постепенно снижается в связи с ликвидацией переездов и сооружением в местах пересечения транспортных развязок. Разграничение транспортных потоков на пересечениях дорог в разных уровнях за счет строительства эстакад и транспортных развязок требует существенных капитальных затрат и не позволяет полностью решить проблему в приемлемые сроки. При принятии решения о строительстве транспортной развязки на месте железнодорожного переезда, кроме капитальных затрат, предназначенных непосредственно на сооружение эстакады, учитываются все виды затрат и виды ущерба, причиняемого железнодорожному и автомобильному транспорту, затраты, связанные с отчуждением земельных участков на значительной площади, а также эксплуатационные затраты на содержание эстакады. Поэтому при низкой интенсивности движения нецелесообразно разносить пересечения железных и автомобильных дорог в разные уровни.

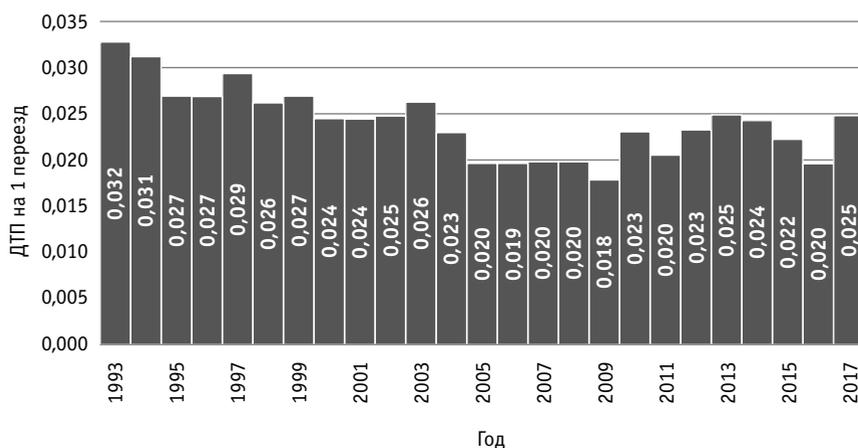


Рис. 1. Количество дорожно-транспортных происшествий в расчете на один переезд

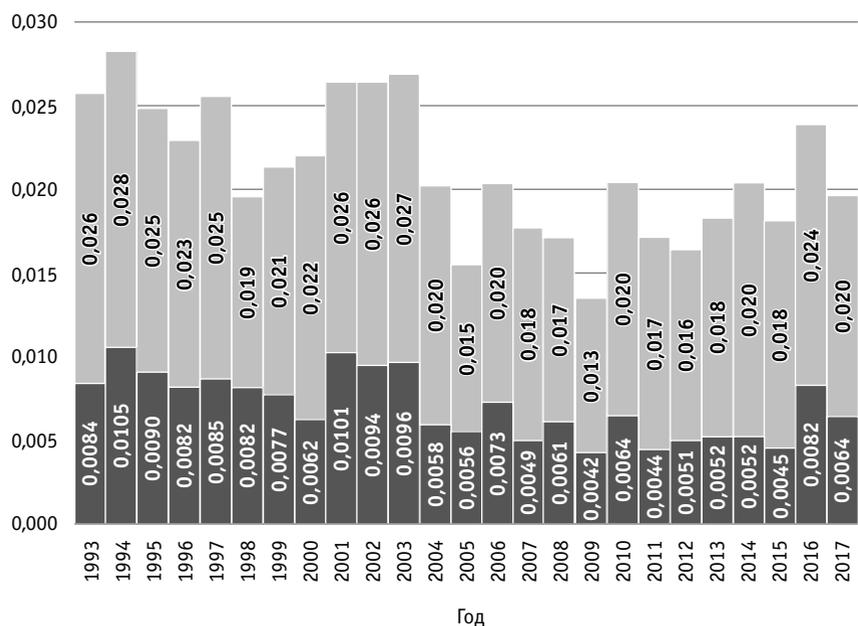


Рис. 2. Количество пострадавших и погибших в ДТП в расчете на один переезд:

■ — пострадавших на 1 переезд; ■ — погибших на 1 переезд

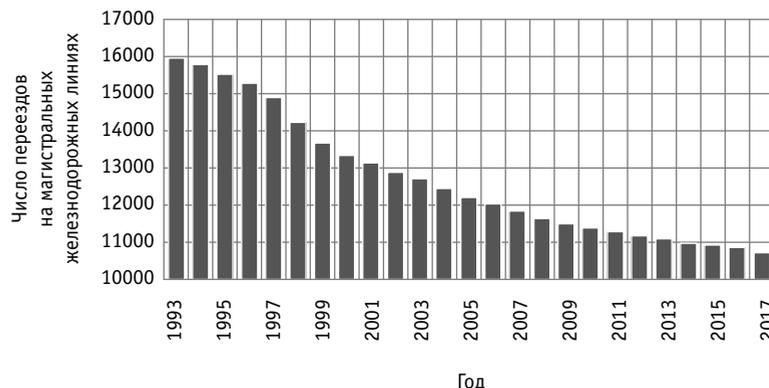


Рис. 3. Динамика снижения количества переездов на железных дорогах Российской Федерации с 1993 по 2017 г.

Федеральная служба государственной статистики Российской Федерации ведет учет транспортных развязок в разных уровнях на пересечениях железнодорожных путей и автомобильных дорог. Для пересечений на дорогах федерального значения учитывается количество развязок и их протяженность, а на дорогах местного значения — только протяженность (табл. 1).

Сведения о количестве транспортных развязок на автомобильных дорогах местного значения отсутствуют, но их протяженность приблизительно равна протяженности пересечений на дорогах федерального значения.

Как видно из табл. 1, в 2019 г. в эксплуатации находилось 546 транспортных развязок. Сделаем допущение, что плотность пересечений на дорогах местного и федерального значения одинакова. В этом случае число транспортных развязок также примерно одинаково. За рассматриваемый период с 2013 по 2019 г. было построено 48 транспортных развязок, что примерно в 10 раз меньше, чем число ликвидированных переездов за тот же период (см. рис. 3). То есть количество эксплуатируемых переездов снижается в основном за счет их ликвидации. Оценить долю пересечений в разных уровнях и динамику ее изменения позволяет рис. 4.

Находящихся в эксплуатации транспортных развязок на пересечениях железнодорожных путей и автомобильных дорог в разных уровнях примерно в 10 раз меньше, чем пересечений дорог в одном уровне, а возможности по разнесению дорог в разные уровни ограничены несколькими десятками проектов в год. Поэтому для улучшения ситуации железнодорожные переезды оборудуются специальными техническими решениями.

Основное средство управления движением на переездах — релейные и микропроцессорные системы автоматической переездной сигнализации (АПС), в которых в качестве датчиков приближения поездов применяются рельсовые цепи или счетчики осей [2–4]. Кроме того, рассматриваются проекты по использованию для контроля приближения поездов к переезду оптоволоконных датчиков [5–7] и сигналов глобальных навигационных систем [8–10]. Чтобы предотвра-

Таблица 1

Количество и протяженность транспортных развязок на пересечениях железнодорожных путей и автомобильных дорог (данные Росстата)

Показатель	Год						
	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Количество транспортных развязок на пересечениях железнодорожных путей и автомобильных дорог федерального значения, шт.	498	505	505	538	538	545	546
Протяженность транспортных развязок на пересечениях железнодорожных путей и автомобильных дорог федерального значения, км	422,1	212,8	219	243,9	253,5	263,1	269,8
Протяженность транспортных развязок на пересечениях железнодорожных путей и автомобильных дорог местного значения, км	346,3	320,4	268,4	275	345,4	259	254,5

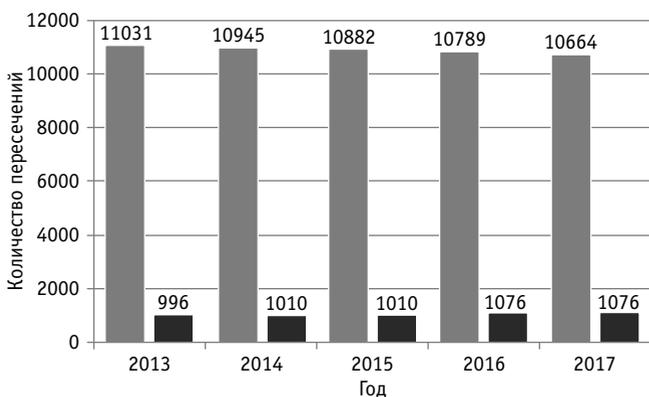


Рис. 4. Количество пересечений железнодорожных путей автомобильными дорогами:
 ■ — общее число пересечений; ■ — в разных уровнях

шать выезд автотранспорта на закрытый переезд, применяются устройства заграждения [11–13]. Находятся в эксплуатации средства фиксации нарушения правил движения на переездах [14], внедряются комплексы автоматического контроля свободы переезда от автотранспорта [15].

Актуальным остается вопрос передачи извещения на переезд о приближающемся поезде, что требует достоверного определения положения поезда и точного расчета его характеристик, таких как скорость, тормозной путь, вес. Наиболее точно определять положение поезда и его скорость позволяют методы измерения некоторых дополнительных параметров рельсовых цепей [16, 17], а также решения на основе оптоволоконных распределенных датчиков [6] и данные бортовых локомотивных комплексов, передаваемые по радиоканалу [18, 19]. Получить значения характеристик приближающегося подвижного состава (таких как скорость движения, ускорение, длина тормозного пути) возможно только от бортовых локомотивных комплексов.

Существующий метод расчета систем автоматической переездной сигнализации не учитывает длину путей торможения поездов. Время извещения определяется из условия освобождения переезда самым медленным автомобилем, выехавшим после включения сигнализации. Поэтому при поломке автотранспорта в границах переезда своевременная остановка поезда не гарантируется. Такие случаи регулярно наблюдаются

на практике, но в действующих системах управления переездом и в алгоритмах их функционирования вероятность поломки автомобиля на переезде не учитывается.

Для решения обозначенных проблем предлагается использовать систему, которая позволит динамически формировать участок приближения по прогнозируемому тормозному пути поезда и управлять его автоматической остановкой в случае невозможности автотранспорта покинуть закрытый переезд (рис. 5).

Технические средства автоматического торможения поезда широко применяются для предотвращения проезда запрещающих сигналов светофоров и входят в состав всех современных бортовых локомотивных комплексов. Определять занятость переезда автотранспортом необходимо по результатам автоматического контроля, для этого могут быть использованы различные датчики, такие как радары, лидары, системы технического зрения, а также комбинации перечисленных технических средств.

Следует отметить, что в предлагаемой системе остановка поезда торможением выполняется только при условии занятости закрытого переезда автотранспортом или при неисправности переездной сигнализации, а в случае штатной работы АПС поезд проследует переезд без снижения скорости.

Предлагаемая система управления переездной сигнализацией должна включать в себя бортовой локомотивный комплекс, АПС, средства контроля свободы переезда от автотранспорта, а также средства цифровой радиосвязи, функции которых интегрированы в единую систему с помощью устройств управления (рис. 6).

Локомотивные устройства предлагаемой системы должны быть реализованы на аппаратуре существующих бортовых комплексов (САУТ, САУТ-К, КЛУБ-У, БЛОК, БЛОК-М), а переездные — на существующих системах АПС. Взаимодействие локомотивной и переездной аппаратуры должно осуществляться по цифровому радиоканалу при безопасном поведении системы в случае потери связи или возникновения отказов.

В настоящее время уже приняты в эксплуатацию устройства контроля свободы зоны переезда (КСЗП) и система автоматизированного удаленного управления переездами (АУУП), которые могут быть включены в состав предлагаемой системы как средства контроля свободы переезда от автотранспорта.

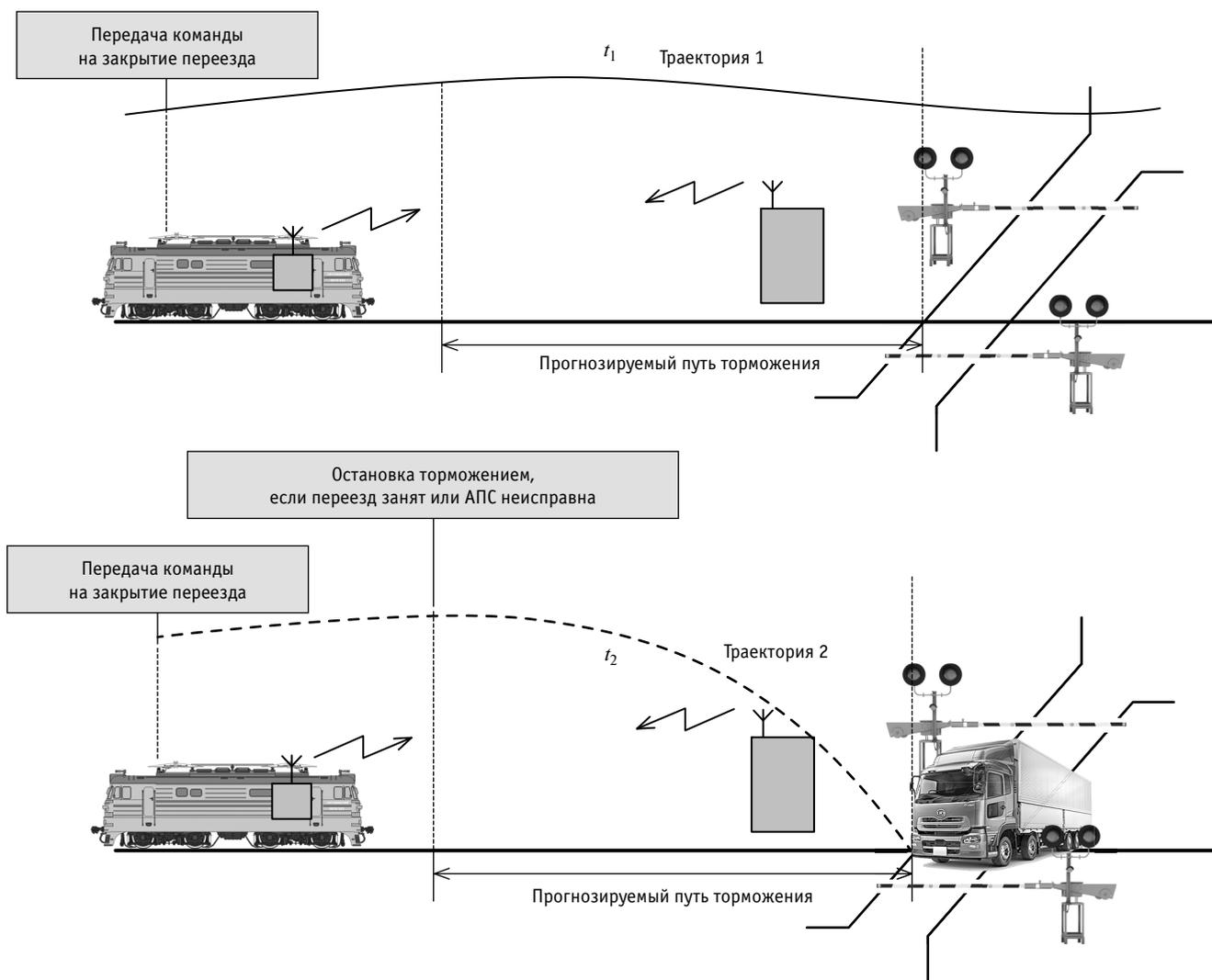


Рис. 5. Принцип действия системы управления



Рис. 6. Структурная схема системы управления АПС по оценке тормозного пути

При организации цифрового канала радиосвязи необходимо выбрать диапазон радиочастот и технические решения передачи данных, обеспечивающие устой-

чивую работу на выбранных частотах. Для железнодорожного транспорта выделены две полосы радиочастот в диапазоне 2,124–2,156 МГц с номинальными частота-

ми 2,13 и 2,15 МГц, а также полосы в диапазоне 160 МГц. Полосы 2,13 и 2,15 МГц используются в качестве основного и резервного каналов поездной радиосвязи. Частоты в диапазоне 160 МГц выделены для работы радиоэлектронных средств радиотелефонной связи и систем передачи данных. При построении систем и сетей цифровой железнодорожной радиосвязи используется стандарт DMR.

Для работы в сетях DMR применяются радиомодемы РЛСМ-10–60 либо «МОСТ», а для передачи данных на резервной частоте поездной радиосвязи разработаны и приняты в эксплуатацию цифровые радиомодемы РМЦ/2.150.

Безопасность системы обеспечивает ее безопасным поведением при возникновении отказов. При приближении

поезда закрытие переезда осуществляется по специальной команде, переданной по радиоканалу, а при возникновении неисправности либо при потере радиосвязи — по сигналу занятия участка приближения от рельсовых цепей или счетчиков осей.

Бортовые комплексы, устройства АПС, средства контроля свободности переезда от автотранспорта, цифровые радиомодемы уже вводятся в эксплуатацию на сети железных дорог. Для реализации предлагаемого решения необходимо устройство управления, которое объединит все элементы в систему.

Предлагаемая система имеет ряд преимуществ по сравнению с существующими АПС.

1. Гарантированная остановка поезда в случае невозможности автотранспорта покинуть переезд. В существующих системах АПС длина участка приближения определяется на основе максимально допустимой скорости на участке железной дороги и числа железнодорожных путей, пересекающих переезд. Характеристики приближающегося подвижного состава (скорость, состояние тормозной системы, вес) не учитываются. В предлагаемой системе расчет участка приближения выполняется по тормозному пути приближающегося к переезду поезда.

2. Исключение человеческого фактора при принятии решения об остановке поезда. В существующих АПС для предотвращения столкновений переезды, обслуживаемые дежурным работником, с двух сторон ограждаются светофорами, которые устанавливаются на расстоянии 15–100 м от кромки проезжей части железнодорожного переезда. Машинист обязан применить экстренное торможение при:

появлении красного огня на заградительном светофоре;

появлении белого огня на локомотивном светофоре при наличии впереди железнодорожного переезда;

обнаружении несанкционированного выезда на переезд.

В предлагаемой системе решение об остановке поезда принимается по результатам автоматического контроля свободности переезда от автотранспортных средств при нахождении поезда на расстоянии, достаточном для остановки перед переездом.

3. Сокращение времени закрытия переезда для автотранспорта при проследовании поезда. Управление переездной сигнализацией по тормозному пути приближающегося поезда позволяет позже закрывать переезд для поездов, движущихся с малой скоростью. В существующих АПС переезд закрывается независимо от скорости движения поезда — сразу при его вступлении на участок приближения.

4. Отсутствие влияния цифровых радиомодемов на поездную радиосвязь. В отличие от решений, основанных на использовании локомотивных и стационарных радиостанций поездной радиосвязи, цифровые радиомодемы для взаимодействия бортовой и стационарной аппаратуры используют при передаче команд частоту 2,15 МГц, не оказывая влияния на поездную радиосвязь, функционирующую на частоте 2,13 МГц, и не мешая переговорам.

5. Возможность управления существующими системами автоматической переездной сигнализации. Для передачи команд АПС, поступающих по цифровому радиоканалу, используется двухканальное микропроцессорное устройство сопряжения на основе безопасных элементов, которое позволяет управлять реле железнодорожной автоматики. Выходное на-

пряжение устройства безопасного сопряжения выключается при появлении неисправностей в любом из его каналов, а также при отсутствии или искажении принимаемых команд, полученных по любому из каналов.

В Уральском государственном университете путей сообщения разработан опытный образец устройства управления для системы предотвращения столкновений на железнодорожном переезде при вынужденной остановке автотранспорта. В состав образца входят:

устройство безопасного сопряжения (УБС), имеющее двухканальную структуру обработки управляющих команд и служащее для включения и выключения реле управления извещением; промышленный компьютер, реализующий алгоритмы управления;

реле управления извещением (УИ) для согласования с релейными схемами АПС;

устройство ввода дискретной информации для определения характеристик срабатывания существующей и предлагаемой систем;

персональный компьютер для отслеживания работы предлагаемой системы с помощью графического интерфейса;

тумблер, имитирующий сигнал свободности (занятости) переезда автотранспортными средствами;

источник постоянного тока для электропитания стационарной аппаратуры.

Опытный образец подключается к цифровому радиомодему РМЦ/2.150, второй радиомодем устанавливается в кабине машиниста локомотива и передает опытному образцу географические координаты, получаемые от спутниковых навигационных систем.

Для передачи управляющих воздействий опытного образца к аппаратуре АПС предусмотрено УБС, имеющее двухканальную структуру и подающее питание на обмотку реле только при одинаковых сообщениях по обоим каналам. Если управляющие сигналы пропадают, искажаются или в работе устройств появляются неисправности, то УБС обеспечивает выключение устройства управления. В опытном образце УБС управляет работой реле УИ.

Устройство ввода дискретной информации опытного образца контролирует состояние контактов реле УИ, включающего АПС, а также положение тумблера, имитирующего свободность (занятость) переезда автотранспортными средствами.

В настоящее время идет подготовка к испытаниям опытного образца на полигоне Свердловской железной дороги. Испытания позволят определить величину сокращения времени перекрытия переезда для автотранспортных средств при проследовании поезда. После проведения испытаний и доработки опытного образца планируется выполнение исследований по объединению устройства управления с бортовыми локомотивными комплексами и средствами автоматического контроля свободности переезда от автотранспорта.

Работа поддержана грантом ОАО «РЖД» для молодых ученых на проведение научных исследований, направленных на создание новой техники и технологий для применения на железнодорожном транспорте.

Литература

1. Попов А. Н., Гришаев С. Ю. Обеспечение безопасности на железнодорожных переездах за счет управления переездной сигнализацией на основе данных бортовых локомотивных устройств // Актуальные вопросы развития железнодорожного транспорта : материалы Всероссийской научно-практической конференции. Ч. 2 / Под ред. А. Б. Косарева, Г. В. Гогричиани. Москва : РАС, 2019. С. 184–192.
2. Щиголов С. А. Автоматическая переездная сигнализация на счетчиках осей // Автоматика, связь, информатика. 2005. № 12. С. 57–58. ISSN 0005-2329.
3. Тильк И. Г. Новые устройства автоматики и телемеханики железнодорожного транспорта. Екатеринбург : УрГУПС, 2010. 167 с.
4. Тильк И. Г., Сергеев Б. С. Применение устройств счета осей в переездной сигнализации // Транспорт Урала. 2006. № 2 (9). С. 37–41. ISSN 1815-9400.
5. Попов А. Н., Галинуров Р. З. Волоконно-оптические технологии в системах управления движением поездов и контроля состояния объектов инфраструктуры // Транспорт Урала. 2018. № 3 (58). С. 48–54. DOI: 10.20291/1815-9400-2018-3-48-54. ISSN 1815-9400.
6. Галинуров Р. З. Исследование воздействия вибрации подвижного состава на сигнал распределенного оптического датчика с помощью численного моделирования // Транспорт Урала. 2021. № 2 (69). С. 101–105. DOI: 10.20291/1815-9400-2021-2-101-105. ISSN 1815-9400.
7. Галинуров Р. З., Попов А. Н. Исследование параметров работы переездной сигнализации на основе стохастического моделирования // Транспорт Урала. 2022. № 2 (73). С. 42–49. DOI: 10.20291/1815-9400-2022-2-42-49. ISSN 1815-9400.
8. Демьянов В. В., Логинов Д. Д., Имарова О. Б. Спутниковая навигация для интервального регулирования движения поездов // Автоматика, связь, информатика. 2021. № 3. С. 28–31. ISSN 0005-2329.
9. Имарова О. Б. Следящая система управления торможением поезда в зоне сближения с неохраняемым и необслуживаемым железнодорожным переездом // Вестник РГУПС. 2020. № 3 (79). С. 43–51. ISSN 0201-727X.
10. Комплексная система удаленного управления переездом / В. В. Демьянов, Е. Ю. Евдокимова, О. Б. Имарова, Е. А. Герасименко // Автоматика, связь, информатика. 2019. № 4. С. 37–39. ISSN 0005-2329.
11. Чех Н. П. Устройство заграждения переезда // Автоматика, телемеханика и связь. 1994. № 7. С. 20–21. ISSN 0005-2329.
12. Устройство заграждения переезда / Н. П. Чех, В. Ф. Скубак, О. И. Цысь, В. А. Лавров // Путь и путевое хозяйство. 1998. № 1. С. 28–29. ISSN 0033-4715.
13. Гуревич В. Л., Щиголов С. А. Устройства заграждения на переездах без дежурного работника // Автоматика, связь, информатика. 2015. № 5. С. 4–7. ISSN 0005-2329.
14. Барский И. В. Комплексы «Кордон-М» КР. Новый уровень автоматической фиксации нарушений ПДД на пересечениях дорог // Вестник НЦ БЖД. 2016. № 1 (27). С. 11–15. ISSN 2075-4957.
15. Система автоматизированного удаленного управления переездами / А. И. Долгий, А. Е. Хатламаджиян, В. В. Шаповалов [и др.] // Автоматика, связь, информатика. 2020. № 7. С. 30–33. ISSN 0005-2329.

References

1. Popov A. N., Grishaev S. Yu. Train safety provision at railway crossings by automatic level crossing installation control on the basis of data from locomotive on-board devices [Obespechenie bezopasnosti na zheleznodorozhnykh pereezdakh za schet upravleniya pereezdnoy signalizatsiyey na osnove dannykh bortovykh lokomotivnykh ustroystv] // Actual questions of development of railway transport : proceedings of the All-Russian research and practice conference. Part 2 / Ed. by A. B. Kosarev, G. V. Gogrichiani. Moscow : RAS, 2019. Pp. 184–192.
2. Shhigolev S. A. Automatic level crossing installation on axle counters [Avtomaticheskaya pereezdnaya signalizatsiya na schetchikakh osey] // Automation, communication and informatics. 2005. No. 12. Pp. 57–58. ISSN 0005-2329.
3. Tilk I. G. New devices of automation and telemechanics of railway transport [Novyye ustroystva avtomatiki i telemekhaniki zheleznodorozhnogo transporta]. Ekaterinburg : Publishing House of USURT, 2010. 167 p.
4. Tilk I. G., Sergeev B. S. Application of axle counter devices in level crossing safety installations [Primenenie ustroystv scheta osey v pereezdnoy signalizatsii] // Transport of the Urals. 2006. No. 2 (9). Pp. 37–41. ISSN 1815-9400.
5. Popov A. N., Galinurov R. Z. Fiber optic technologies in the automatic train control systems and monitoring of railway infrastructure [Vолоконно-оптические технологии в системах управления движением поездов и контролю состояния объектов инфраструктуры] // Transport of the Urals. 2018. No. 3 (58). Pp. 48–54. DOI: 10.20291/1815-9400-2018-3-48-54. ISSN 1815-9400.
6. Galinurov R. Z. Study of influence of rolling stock vibration on signal of distributed optical sensor by means of numerical modeling [Issledovanie vozdeystviya vibratsii podvijnogo sostava na signal raspredelennogo opticheskogo datchika s pomoshh'yu chislennogo modelirovaniya] // Transport of the Urals. 2021. No. 2 (69). Pp. 101–105. DOI: 10.20291/1815-9400-2021-2-101-105. ISSN 1815-9400.
7. Galinurov R. Z., Popov A. N. Study of level crossing safety installation operation parameters on the basis of stochastic modeling [Issledovanie parametrov raboty pereezdnoy signalizatsii na osnove stokhasticheskogo modelirovaniya] // Transport of the Urals. 2022. No. 2 (73). Pp. 42–49. DOI: 10.20291/1815-9400-2022-2-42-49. ISSN 1815-9400.
8. Demyanov V. V., Loginov D. D., Imarova O. B. Satellite navigation for interval train control [Sputnikovaya navigatsiya dlya interval'nogo regulirovaniya dvizheniya poezdov] // Automation, communication, informatics. 2021. No. 3. Pp. 28–31. ISSN 0005-2329.
9. Imarova O. B. Tracking system braking control of the train in the zone of convergence with an unguarded and unattended railway crossing [Sledyashhaya sistema upravleniya tormozheniem poezda v zone sblizheniya s neokhranyaemym i neobsluzhivaemym zheleznodorozhnym pereezdom] // Vestnik RGUPS. 2020. No. 3 (79). Pp. 43–51. ISSN 0201-727X.
10. Complex system remote controls crossing at station [Kompleksnaya sistema udalennogo upravleniya pereezdom] / V. V. Demyanov, E. Yu. Evdokimova, O. B. Imarova, E. A. Gerasimenko // Automation, communication, informatics. 2019. No. 4. Pp. 37–39. ISSN 0005-2329.
11. Chekh N. P. Level crossing protection device [Ustroystvo zagrazhdeniya pereezda] // Automation, communication, informatics. 1994. No. 7. Pp. 20–21. ISSN 0005-2329.
12. Level crossing protection device [Ustroystvo zagrazhdeniya pereezda] / N. P. Chekh, V. F. Skubak, O. I. Tsys, V. A. Lavrov // Railway Track and Facilities. 1998. No. 1. Pp. 28–29. ISSN 0033-4715.
13. Gurevich V. L., Shhigolev S. A. Protection devices at unmanned level crossings [Ustroystva zagrazhdeniya na pereezdakh bez dezhurnogo rabotnika] // Automation, communication, informatics. 2015. No. 5. Pp. 4–7. ISSN 0005-2329.
14. Barskiy I. V. «Cordon-M» KR traffic enforcement system. New level of intersection's automatic enforcement [Kompleksy «Kordon-M» KR. Novyy uroven' avtomaticheskoy fiksatsii narusheniy PDD na peresecheniyakh dorog] // Bulletin of Scientific Center of Safety Research. 2016. No. 1 (27). Pp. 11–15. ISSN 2075-4957.
15. The automated system of the level crossings remote control [Sistema avtomatizirovannogo udalennogo upravleniya pereezdami] / A. I. Dolgiy, A. E. Khatlamadzhiyan, V. V. Shapovalov [et al.] // Automation, communication, informatics. 2020. No. 7. Pp. 30–33. ISSN 0005-2329.

16. Тарасов Е. М., Герус В. Л., Тарасова А. Е. Исследование информативности признаков при распознавании состояний рельсовых линий // Вестник Мордовского университета. 2018. Т. 28. № 2. С. 191–207. ISSN 0236-2910.
17. Тарасов Е. М., Железнов Д. В., Герус В. Л. Оценка эффективности существующей переездной сигнализации // Вестник транспорта Поволжья. 2015. № 6 (54). С. 58–61. ISSN 1997-0722.
18. Бушув С. В., Попов А. Н., Гришаев С. Ю. Автоматическое управление закрытием переезда по характеристикам приближающегося поезда // Транспорт Урала. 2021. № 1 (68). С. 3–7. DOI: 10.20291/1815-9400-2021-1-3-7. ISSN 1815-9400.
19. Попов А. Н., Гришаев С. Ю. Безопасность движения при остановке автотранспорта на железнодорожных переездах перед приближающимся поездом // Транспорт Урала. 2020. № 1 (64). С. 39–42. DOI: 10.20291/1815-9400-2020-1-39-42. ISSN 1815-9400.
16. Tarasov E. M., Gerus V. L., Tarasova A. E. Study of informative value of features in rail condition monitoring [Issledovanie informativnosti priznakov pri raspoznavanii sostoyaniy rel'sovykh liniy] // Mordovia University Bulletin. 2018. Vol. 28. No. 2. Pp. 191–207. ISSN 0236-2910.
17. Tarasov E. M., Zheleznov D. V., Gerus V. L. Evaluation of existing level crossing signaling [Otsenka effektivnosti sushhestvuyushhey perezdnoy signalizatsii] // Bulletin of transport of the Volga region. 2015. No. 6 (54). Pp. 58–61. ISSN 1997-0722.
18. Bushuev S. V., Popov A. N., Grishaev S. Yu. Automatic control of crossing closure on characteristics of approaching train [Avtomaticheskoe upravlenie zakrytiem perezda po kharakteristikam priblizhayushhegosya poezda] // Transport of the Urals. 2021. No. 1 (68). Pp. 3–7. DOI: 10.20291/1815-9400-2021-1-3-7. ISSN 1815-9400.
19. Popov A. N., Grishaev S. Yu. Safety of operation when motor vehicles stop at railway crossings in front of approaching train [Bezopasnost' dvizheniya pri ostanovke avtotransporta na zheleznodorozhnykh perezdakh pered priblizhayushhimsya poezdom] // Transport of the Urals. 2020. No. 1 (64). Pp. 39–42. DOI: 10.20291/1815-9400-2020-1-39-42. ISSN 1815-9400.

Объем статьи 0,76 авторских листа

УДК 656.25

Юрий Валерьевич Могильников, ассистент кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,

Валерий Алексеевич Баранов, кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,

Илья Дмитриевич Вершинин, студент электротехнического факультета Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия

ВЛИЯНИЕ ПАРАЗИТНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА ПРИЕМ КОДА ИЗ РЕЛЬСОВОЙ ЦЕПИ

Yuriy Valeryevich Mogilnikov, Assistant Lecturer, Railway Automation, Telemechanics and Communication Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,

Valeriy Alexeevich Baranov, PhD in Engineering, Associate Professor, Railway Automation, Telemechanics and Communication Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,

Ilya Dmitrievich Vershinin, student, Electromechanical Faculty, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia

Influence of sneak magnetic fields on reception of code from track circuit

Аннотация

В статье рассмотрены проблемы, связанные с передачей полезного кодового сигнала на приемные устройства локомотива. Приведены данные о сбоях устройств автоматической локомотивной сигнализации (АЛСН) на Южно-Уральской железной дороге. Определены основные факторы, вызывающие сбой приема полезного кода, сформулированы предложения по снижению воздействия паразитных полей.

Ключевые слова: безопасность, локомотив, железнодорожный транспорт, приемная катушка, устройства автоматической локомотивной сигнализации, рельс, рельсовый ток, магнитные поля, паразитные магнитные поля.

Abstract

The paper considers problems connected with transition of useful code signal on receiving locomotive devices. The authors provide data on failures of automatic cab signaling devices on the South-Ural Railway. As a result, they have determined main factors that cause a fault of reception of a useful code and formulated proposals on decrease of influence of sneak fields.

Keywords: safety, locomotive, railway transport, receiving coil, automatic cab signaling devices, rail, rail current, magnetic fields, sneak magnetic fields.

DOI: 10.20291/1815-9400-2023-1-82-87

Безаварийное движение поездов зависит от локомотивных устройств безопасности, которые должны работать надежно, т.е. без сбоев и отказов. В 1990-х гг. локомотивы начали массово оборудовать такими устройствами, что позволило повысить безопасность движения и значительно сократить проезды запрещающего сигнала светофора [1, 2].

В настоящее время в связи с растущим спросом на транспортные услуги и внедрением новых технологий актуальной становится задача снижения интервальности движения для увеличения пропускной способности [3].

Сегодня в ОАО «РЖД» оснащенность локомотивными устройствами безопасности характеризуется следующими показателями: АЛСН (автоматическая локомотивная сигнализация) — 78 %, КЛУБ-У (комплексное локомотивное устройство безопасности) — 22 %, САУТ (система автоматического управления тормозами) — 44 %, ТСКБМ (телемеханическая система контроля бодрствования машиниста) — 25 %. При этом системой САУТ почти полностью оборудован парк грузовых электровозов, а комплексными локомотивны-

ми устройствами безопасности — весь пассажирский парк [4].

Вместе с тем из-за устаревшего оборудования, наведенных помех от устройств верхнего строения пути, намагниченности рельсов и других причин в работе локомотивных устройств безопасности возникают кратковременные сбои, что, в свою очередь, отражается на безопасности перевозочного процесса. Таким сбоем предшествует искаженный код, который принимается приемной катушкой, а впоследствии неверно расшифровывается [5].

В январе — июле 2018 и 2019 гг. на Южно-Уральской железной дороге (ЮУЖД) авторами было проведено исследование, цель которого заключалась в выявлении и анализе помесечного количества сбоев (рис. 1) и в последующей разработке мер по повышению помехозащищенности локомотивных устройств безопасности.

Как видно из рис. 1, в сокращении количества сбоев наблюдается положительная динамика. Например, в январе — июле 2018 г. было зарегистрировано 355 сбоев, а за аналогичный период 2019 г. —

266, т.е. на 14,3% меньше. Это свидетельствует о результативности мер по повышению помехозащищенности локомотивного оборудования, которые предпринимаются на ЮУЖД с 2013 г. и являются приоритетными для обеспечения безопасности перевозочного процесса [6].

На основе анализа данных по сбоям устройств безопасности в зависимости от рода тяги, полученных от локомотивных депо Южно-Уральской железной дороги, установлено, что количество сбоев существенно возрастает на участках с переменным электропитанием (рис. 2).

Сравнительный анализ отказов устройств безопасности по системам КЛУБ-У и АЛСН позволил сделать вывод, что наиболее подвержены сбоям устройства автоматической локомотивной сигнализации (рис. 3).

Дальнейшая задача заключалась в выявлении тех серий локомотивов, которые особенно подвержены сбоям. Как показало исследование, в наибольшей степени потере кода подвержены локомотивы ВЛ80С, оборудованные преимущественно автоматической локомотивной сигнализацией (рис. 4).

Кроме того, установлено, что кратковременные сбои в работе АЛСН на участках с переменной тягой вызваны помехами в работе рельсовой цепи. Вероятными причинами этого являются:

- остаточная намагниченность после капитального ремонта пути;

- плети-длинномеры с остаточной намагниченностью, находящиеся внутри колеи и на концах шпал;

- магнитные помехи от устройств верхнего строения пути и электромагнитные помехи от силовых тяговых элементов локомотивов.

Приемные катушки работают в сложных эксплуатационных условиях, что сказывается на приеме кода. В частности, при прохождении локомотивом кривой возникает вертикальное смещение приемных катушек, связанное с поворотом кузова из-за радиальной нагрузки и его вертикальным перемещением, кроме того, возникает продольное смещение приемных катушек по отношению к рельсам [7].

Все вышеперечисленные факторы негативно влияют на прием кода, так как сама катушка выходит из влияния полезного магнитного поля.

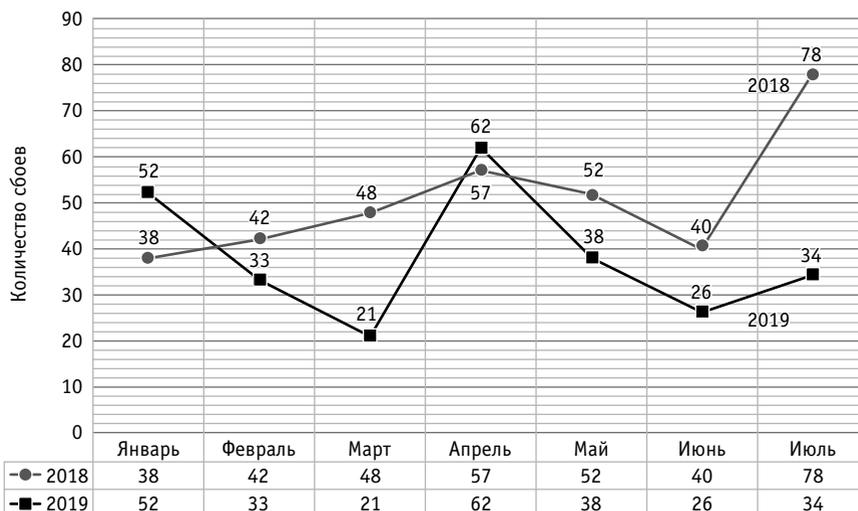


Рис. 1. Сравнительный анализ сбоев устройств безопасности по причине неправильного приема кодового рельсового сигнала

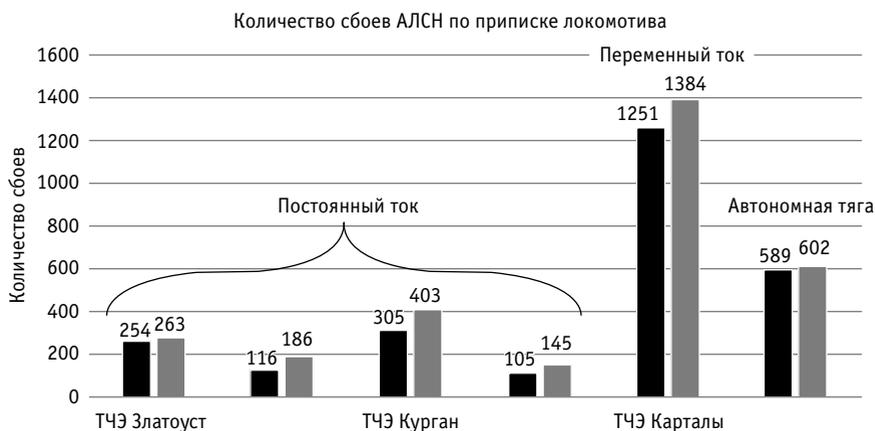


Рис. 2. Анализ сбоев АЛСН на Южно-Уральской железной дороге: ■ — 2018; ■ — 2019

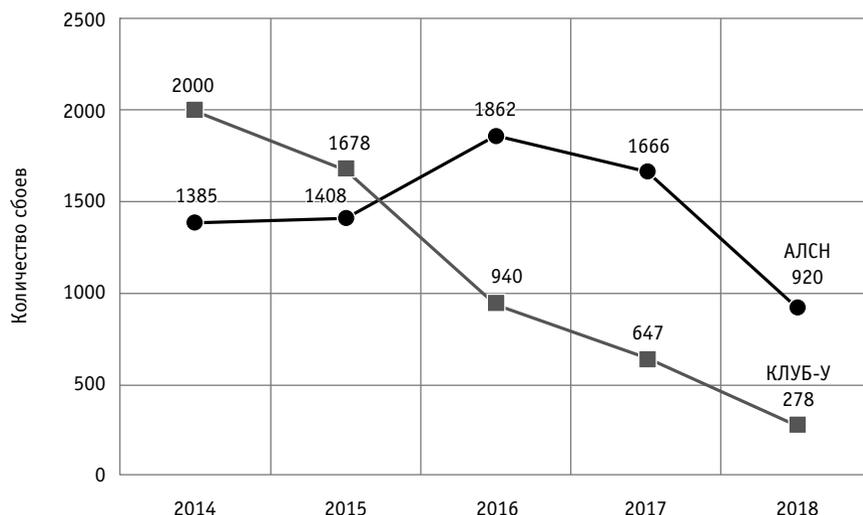


Рис. 3. Динамика изменения сбоев локомотивных устройств безопасности на электровозах переменного тока в период с 2014 по 2018 г.

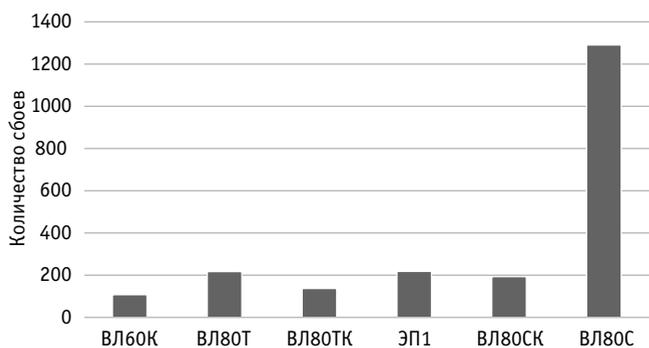


Рис. 4. Анализ сбоев устройств безопасности по сериям локомотивов за 2018 г.

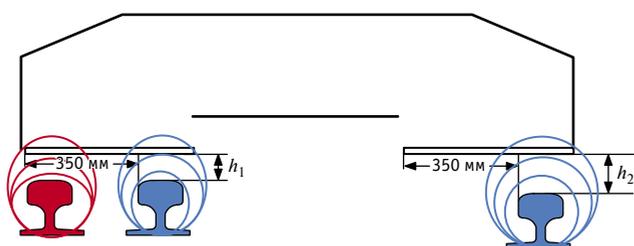


Рис. 5. Смещение приемных катушек при движении в правой кривой радиусом 400 м под воздействием рельсов, оставшихся на обочине после капитальных ремонтов пути:

h_1 и h_2 — расстояние между головкой рельса и приемной катушкой с правой и левой стороны соответственно, мм

Рассмотрим подробнее причины кратковременных сбоев в работе АЛСН на участках с переменной тягой.

1. При проведении капитального ремонта рельсового полотна на обочине рельсового пути остаются рельсы, которые, в свою очередь, имеют остаточную намагниченность и оказывают влияние на приемную катушку. На рис. 5 показано продольное смещение приемных катушек в кривой радиусом 400 м. Стоит отметить, что катушка сдвигается относительно рельса, а оставленный на обочине рельс воздействует на нее магнитными пятнами, в результате чего сигнал неверно расшифровывается локомотивными устройствами безопасности.

2. На рис. 6 и 7 показано искажение посылок кода «З». То есть на катушку поступает 4-й импульс, который воспринимается системой АЛСН как код «КЖ». Было установлено, что такое искажение критично только для устройств АЛСН, но не для КЛУБ-У, имеющих помехоустойчивый фильтр.

3. После рассмотрения комплекса помехонаводящих действий было предложено поднять подвеску приемных катушек на наибольшую допустимую высоту от головки рельса и тем самым погасить чувствительность локомотивных систем безопасности [5]. На рис. 8 представлена регулировка высоты подвеса приемных катушек, а также показаны магнитные поля, влияющие на ее чувствительность. Основная идея заключается в «вытаскивании» катушки из паразитного магнитного поля.

По результатам проведенного исследования сформулировано три варианта решения этой задачи.



Рис. 6. Импульсные помехи в рельсовых цепях на участке А–Б

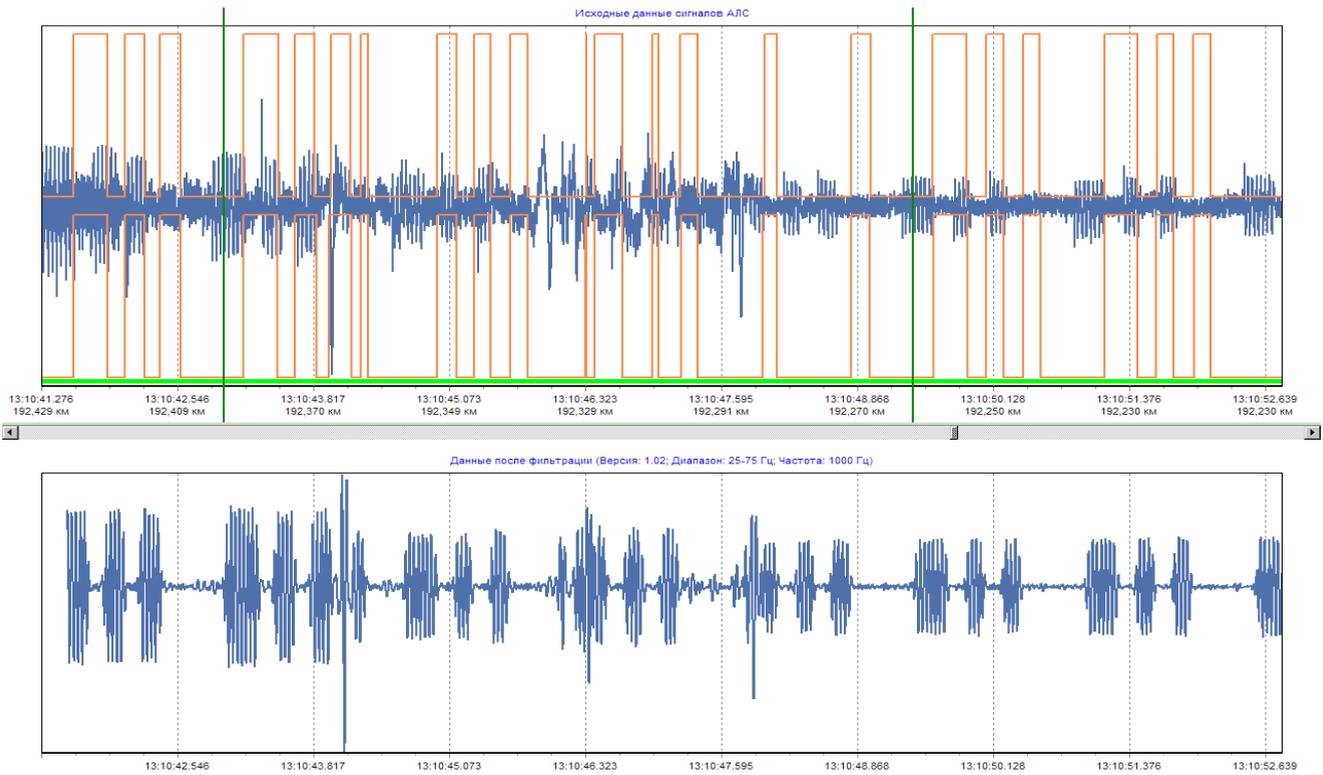


Рис. 7. Импульсные помехи в рельсовых цепях на участке Б–В

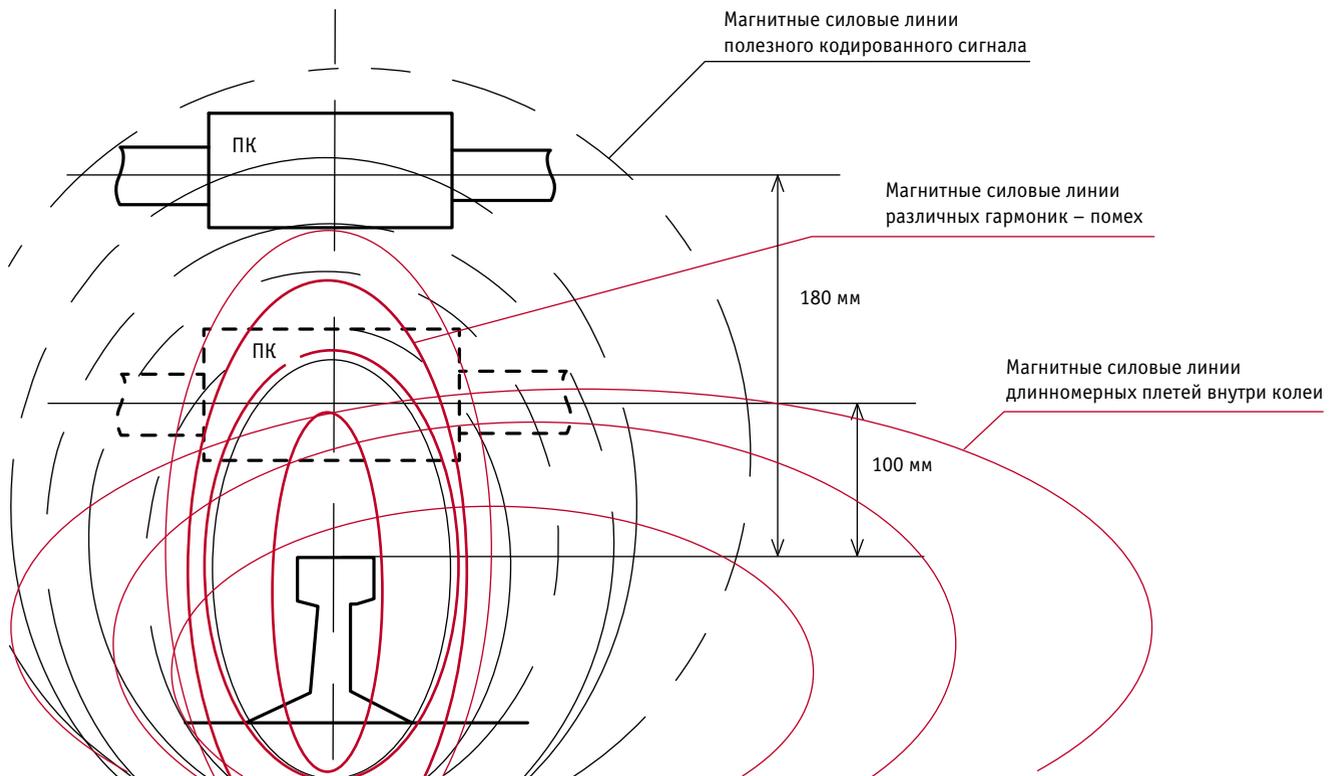


Рис. 8. Эксплуатация приемной катушки в условиях минимальной и максимально допустимой подвески с учетом паразитного магнитного поля

Вариант 1. Модернизация кронштейна приемной катушки. Усовершенствование крепления приемной катушки позволит регулировать высоту ее подвеса относительно головки рельса и тем самым вывести из помехового поля. Также необходимо учитывать обточку колесных пар, после которой расстояние между головкой рельса и приемной катушкой уменьшается, что негативно сказывается на приеме полезного кода при дальнейшей эксплуатации.

Вариант 2. Использование экспериментального шлейфа для регулирования высоты подвеса приемных катушек, а также переход от катушек типа ПТ к катушкам типа КПУ-1.

Экспериментальный шлейф — это испытательная рельсовая цепь, на которой производится регулировка порогового значения срабатывания приемного локомотивного устройства. Основная задача регулировки приемных устройств состоит в том, чтобы обеспечить прием устойчивого полезного кода. Для этого разработана специальная технология:

1) первоначально выставляется ток кодирования в шлейфе $I_{\text{КК}} \approx 1,4 \text{ A}$, ток помехи меньше, чем ток кодирования, т.е. $I_{\text{П}} \approx 0,95 \text{ A}$;

2) выполняется подъем катушек до устойчивого восприятия кода зеленого огня светофора. При отсутствии восприятия кода кодовый усилитель перенастраивается в сторону увеличения пороговой чувствительности в интервале $U = 57\text{--}69 \text{ мВ}$;

3) при достижении устойчивого приема кодовой комбинации осуществляется регулировка приемной катушки по высоте относительно головки рельса. Регулировка производится до тех пор, пока не будет обеспечен устойчивый прием кодовой комбинации без изменения токовых значений на входном усилителе;

4) выполняется повышение уровня тока введенной помехи, тем самым определяется пороговый уровень зоны чувствительности локомотивной аппаратуры;

5) происходит отключение помехи, контроль восприятия кодовой комбинации осуществляется в штатном режиме [8].

При регулировке катушек по высоте проведено исследование двух их типов — ПТ и КПУ-1 (рис. 9 и 10).

Из анализа рис. 9 и 10 можно сделать вывод, что катушки типа КПУ-1 работают более устойчиво по сравнению с катушками ПТ: графики являются симметричными, показатели изменяются пропорционально [9].

При проведении эксперимента установлено, что для более устойчивой работы устройств АЛСН их порог необходимо увеличить. Как видно из рис. 11, пороговую чувствительность следует поднять до 0,95–1,15 А.

Вариант 3. Крепление катушки на раму тележки (вместо рамы кузова). Эта мера позволит повысить устойчивость приема кодовой комбинации при прохождении локомотивом кривой.

Таким образом, на основе выполненного исследования сделан вывод, что на работу приемных катушек влияет множество факторов: смещение во время движения из полезного магнитного поля, магнитные пятна на рельсах, плети длинномеров в колее и др.

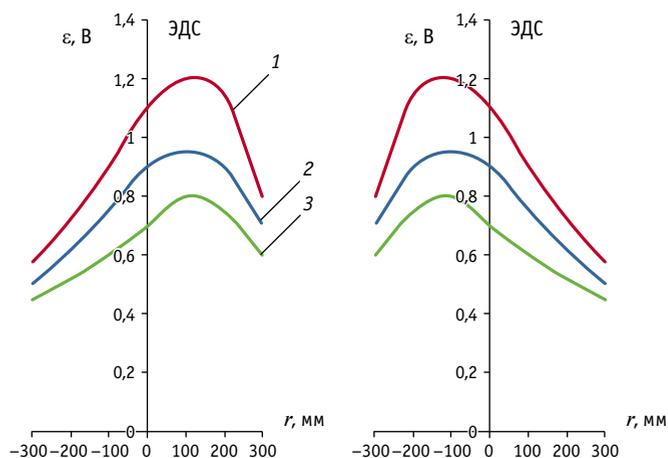


Рис. 9. Диаграмма зависимости наведенной ЭДС (ε , В) от высоты подвеса (r , мм) и горизонтального смещения приемных катушек типа ПТ:
1 — 100 мм; 2 — 200 мм; 3 — 300 мм

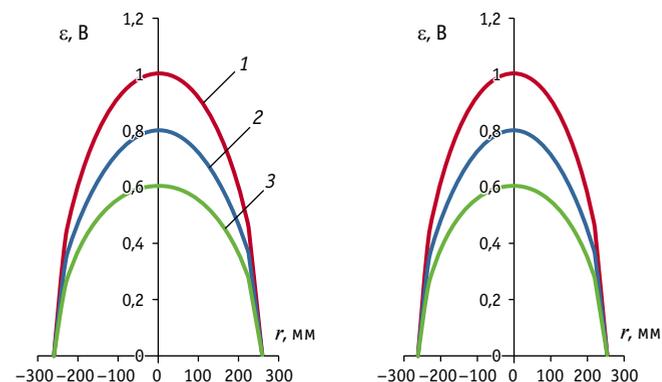


Рис. 10. Диаграмма зависимости наведенной ЭДС (ε , В) от высоты подвеса (r , мм) и горизонтального смещения приемных катушек типа КПУ-1:
1 — 100 мм; 2 — 200 мм; 3 — 300 мм

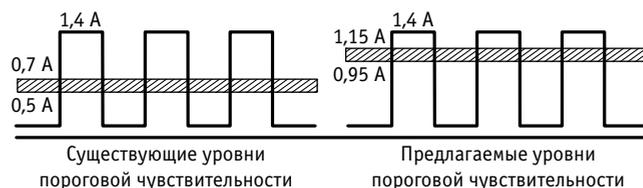


Рис. 11. Уровни пороговой чувствительности

Предложено несколько вариантов по снижению воздействия паразитных магнитных полей: разработанные авторами способы установки катушки с рамы кузова локомотива на раму тележки, позволяющие сократить потерю полезного кодового сигнала при прохождении локомотивом кривой; увеличение уровня пороговой чувствительности приемной аппаратуры локомотива, а также замена катушек типа ПТ на катушки типа КПУ-1.

Литература

1. Шаманов В. И. Помехи на аппаратуру рельсовых цепей и автоматической локомотивной сигнализации. Средства защиты. Москва : УМЦ ЖДТ, 2018. 304 с.
2. Шаманов В. И. Защищенность локомотивных приемников АЛС от помех // Автоматика, связь, информатика. 2013. № 4. С. 14–19. ISSN 0005–2329.
3. Скоробогатов М. Э. Узкополосный цифровой фильтр для выделения сигналов АЛСН в условиях действия интенсивных помех // Транспорт Урала. 2019. № 4 (63). С. 20–27. DOI: 10.20291/1815-9400-2019-4-20-27. ISSN 1815-9400.
4. Сапожников В. В., Кравцов Ю. А., Сапожников Вл. В. Теоретические основы железнодорожной автоматики и телемеханики. Москва : УМЦ ЖДТ, 2008. 394 с.
5. Могильников Ю. В. Влияние тяжеловесных поездов на работу рельсовых цепей и аппаратуры АЛСН // Транспорт Урала. 2014. № 2 (41). С. 109–113. ISSN 1815-9400.
6. Косьяненко В. В. Повышение помехоустойчивости в работе локомотивных устройств безопасности на Южно-Уральской железной дороге // World science: problems and innovations : сборник статей VI Международной научно-практической конференции. Пенза : Наука и просвещение, 2016. С. 58–62.
7. Могильников Ю. В. Оценка эффективности рельсовых цепей и средств дефектоскопии при выявлении изломов и дефектов рельсов // Транспорт Урала. 2019. № 3 (62). С. 64–67. DOI: 10.20291/1815-9400-2019-3-64-67. ISSN 1815-9400.
8. Вершинин И. Д., Миклин С. А., Могильников Ю. В. Внедрение беспилотных технологий на железнодорожном транспорте как фактор повышения безопасности перевозочного процесса // Информационные технологии и когнитивная электросвязь : сборник научных трудов VII Всероссийской научно-практической конференции. Екатеринбург, 2021. С. 74–78.
9. Могильников Ю. В., Нурекенова М. С., Феданов Н. С. Недостатки рельсовых цепей и их устранение // World science: problems and innovations: сборник статей VII Международной научно-практической конференции. Пенза : Наука и просвещение, 2017. С. 75–77.

Объем статьи 0,7 авторских листа

References

1. Shamanov V. I. Interference on devices of rail circuits and automatic cab signalling. Means of protection [Pomekhi na apparaturu rel'sovykh tsepey i avtomaticheskoy lokomotivnoy signalizatsii. Sredstva zashchity]. Moscow : UMTs ZhDT, 2018. 304 p.
2. Shamanov V. I. Interference protectability of automatic cab signalling receivers [Zashhishhennost' lokomotivnykh priemnikov ALS ot pomekh] // Automation, communication, informatics. 2013. No. 4. Pp. 14–19. ISSN 0005–2329. .
3. Skorobogatov M. E. Narrowband digital filter for selection of signals of automatic cab signalling in conditions of intense interference [Uzkopolosnyy tsifrovoy fil'tr dlya vydeleniya signalov ALSN v usloviyakh deystviya intensivnykh pomekh] // Transport of the Urals. 2019. No. 4 (63). Pp. 20–27. DOI: 10.20291/1815-9400-2019-4-20-27. ISSN 1815-9400.
4. Sapozhnikov V. V., Kravtsov Yu. A., Sapozhnikov Vl. V. Theoretical basics of railway automatics and telemechanics [Teoreticheskie osnovy zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki]. Moscow : UMTs ZhDT, 2008. 394 p.
5. Mogilnikov Yu. V. Impact of heavy trains on operation of track circuits and continuous automatic locomotive signaling (CALS) equipment [Vliyaniye tyazhelovesnykh poezdov na rabotu rel'sovykh tsepey i apparatury ALSN] // Transport of the Urals. 2014. No. 2 (41). Pp. 109–113. ISSN 1815-9400.
6. Kos'yanenko V. V. Increase of noise-immunity in operation of locomotive safety devices on the South-Ural Railway [Povysheniye pomekhoustoychivosti v rabote lokomotivnykh ustroystv bezopasnosti na Yuzhno-Ural'skoy zheleznoy doroge] // World science: problems and innovations : collection of papers of the 6th International research and practice conference. Penza : Science and Education, 2016. Pp. 58–62.
7. Mogilnikov Yu. V. Assessment of track circuits and defectoscopy tools efficiency in detection of rail failures and flaws [Otsenka effektivnosti rel'sovykh tsepey i sredstv defektoskopii pri vyyavlenii izlomov i defektov rel'sov] // Transport of the Urals. 2019. No. 3 (62). Pp. 64–67. DOI: 10.20291/1815-9400-2019-3-64-67. ISSN 1815-9400.
8. Vershinin I. D., Miklin S. A., Mogilnikov Yu. V. Introduction of unmanned technologies on railway transport as a factor of increase of transportation process safety [Vnedreniye bespilotnykh tekhnologiy na zheleznodorozhnom transporte kak faktor povysheniya bezopasnosti perevozochnogo protsesssa] // Information technologies and cognitive electric connection : collection of scientific works of 7th All-Russian research and practice conference. Ekaterinburg, 2021. Pp. 74–78.
9. Mogilnikov Yu. V., Nurekenova M. S., Fedanov N. S. Disadvantages of track circuits and troubleshooting [Nedostatki rel'sovykh tsepey i ikh ustraneniye] // World science: problems and innovations : collection of papers of 7th International research and practice conference. Penza : Science and Education, 2017. Pp. 75–77.

УДК 625.151

Алексей Алексеевич Локтев, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Транспортное строительство» Российского университета транспорта РУТ (МИИТ), Москва, Россия,

Ирина Викторовна Шишкина, кандидат технических наук, доцент кафедры «Транспортное строительство» Российского университета транспорта РУТ (МИИТ), Москва, Россия,

Владимир Иванович Ткаченко, кандидат военных наук, доцент кафедры «Транспортное строительство» Российского университета транспорта РУТ (МИИТ), Москва, Россия,

Вера Валентиновна Артемьева, кандидат социологических наук, доцент кафедры «Транспортное строительство» Российского университета транспорта РУТ (МИИТ), Москва, Россия

РАСЧЕТ ДОЛЕЙ ДЕФЕКТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СТРЕЛОЧНОЙ ПРОДУКЦИИ

Alexey Alexeevich Loktev, DSc in Physics and Mathematics, Professor, Head of Transport Construction Department, Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia,

Irina Viktorovna Shishkina, PhD in Engineering, Associate Professor, Transport Construction Department, Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia,

Vladimir Ivanovich Tkachenko, PhD in Military, Associate Professor, Transport Construction Department, Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia,

Vera Valentinovna Artemyeva, PhD in Sociology, Associate Professor, Transport Construction Department, Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia

Calculation of shares of switch production defective parts

Аннотация

В статье представлено непосредственное вычисление среднего значения дефектных элементов стрелочной продукции. Рассмотрен контроль производственного процесса на примере контроля стрелочной продукции. Сделаны вычисления первых четырех моментов при биномиальном распределении количества дефектных элементов стрелочной продукции. Детально рассмотрена стандартная ошибка доли дефектных элементов.

Ключевые слова: стрелочная продукция, контроль качества, доля дефектных стрелочных элементов, стандартная ошибка, выборка.

Abstract

The paper presents a direct calculation of a mean value of defective parts of switch production. The authors have considered control of a production process on the example of control of switch production. They have calculated first four moments at binomial distribution of a number of defective elements of switch production. As a result, the authors have precisely considered a standard error of a share for defective parts.

Keywords: switch production, quality control, share of defective switch parts, standard error, sample.

DOI: 10.20291/1815-9400-2023-1-88-92

Показателем качества стрелочной продукции безотносительно к свойствам отдельных изделий принято считать долю дефектных стрелочных элементов в партии, выраженную в долях единицы или в процентах. Чем меньше доля дефектных стрелочных элементов в партии, тем выше качество стрелочного перевода.

При контроле качества стрелочной продукции изготовитель сталкивается с необходимостью решения двух проблем [1, 2]. Во-первых, он должен так организовать контроль процесса производства, чтобы процент неудовлетворительной по своим свойствам или дефектной стрелочной продукции не был слишком высоким. Во-вторых, он должен исключить возможность выпуска партий, которые содержали бы слишком высокий процент дефектной продукции. Соответственно следует рассматривать две составляющих этой задачи: 1) контроль процесса производства и 2) контроль изготовленной стрелочной продукции [3, 4]. С первого взгляда может показаться, что если контроль производственного процесса организован правильно, то нет никаких оснований беспокоиться о качестве стрелочной продукции при ее сбыте или приобретении. В некоторой мере это утверждение верно: чем лучше налажен контроль производства, тем меньше затрат приходится на организацию контроля изготовленной стрелочной продукции.

Однако даже тогда, когда производственный процесс поставлен удовлетворительно и количество дефектных изделий в большой партии, произведенной в течение длительного периода времени, незначительно, отдельные партии могут иметь большой процент брака, т.е. их следует считать неудовлетворительными [5, 6].

Среднее значение распределения числа дефектных стрелочных элементов, приходящихся на выборку, при k выборках объемом n равно $\bar{d} = \sum d/k$. Математическое ожидание d , обозначаемое $E(d)$, есть среднее количество дефектных стрелочных элементов во всех возможных выборках объема n , т.е. среднее значение для распределения вероятностей d [1]. Эта величина получается путем умножения каждого возможного значения d на вероятность его появления и сложения этих произведений. Таким образом:

$$E(d) = \sum [dP(d)] = 0 \cdot 0,216 + 1 \cdot 0,432 + 2 \cdot 0,288 + 3 \cdot 0,064 = 1,2.$$

Следует также обратить внимание на то, что

$$E(d) = nP = 3 \cdot 0,4 = 1,2.$$

Аналогичным образом для доли дефектных изделий:

$$\bar{p} = \sum p/k$$

$$E(d) = \sum [pP(p)] = 0,000 \cdot 0,216 + 0,333 \cdot 0,432 + 0,667 \cdot 0,288 + 1,000 \cdot 0,064 = 0,4.$$

Необходимо отметить, что $E(p) = P = 0,4$. Совершенно очевидно, что поскольку каждый член в формуле для $E(p)$ равен точно одной трети соответствующего члена в формуле для $E(d)$, то результирующее значение тоже составляет только одну треть [2]. Таким образом, в общем случае:

$$E(p) = E(d)/n.$$

Непосредственное вычисление различных моментов можно производить в том порядке, который указан в табл. 1 (для количества дефектных стрелочных элементов) и табл. 2 (для доли дефектных стрелочных элементов). Заметим, что $\mu_r(d) = n^r \mu_r(p)$ и $\sigma_d^r = n^r \sigma_p^r$, но $\alpha_r(d) = \alpha_r(p)$.

В целях упрощения сравнения на с. 90 приведены формулы для параметров, характеризующих теоретические распределения числа и доли дефектных стрелочных элементов соответственно.

Определенный интерес представляют также коэффициенты эксцесса:

$$\mu_4(d) = 3(nPQ)^2 + (1 - 6PQ)(nPQ);$$

$$\mu_4(p) = 3\left(\frac{PQ}{n}\right)^2 + (1 - 6PQ)\frac{PQ}{n^3};$$

$$\alpha_4(d) = \alpha_4(P) = 3 + \frac{1 - 6PQ}{nPQ}.$$

Таблица 1

Вычисление первых четырех моментов, α_3 и α_4 при биномиальном распределении количества дефектных стрелочных элементов ($n = 3, P = 0,4$)

d	$P(d)$	$d - E(d)$	$[d - E(d)]P(d)$	$[d - E(d)]^2P(d)$	$[d - E(d)]^3P(d)$	$[d - E(d)]^4P(d)$
0	0,216	-1,2	-0,2592	0,3110	-0,3732	0,4478
1	0,432	-0,2	-0,0864	0,0173	-0,0035	0,0007
2	0,288	0,8	0,2304	0,1843	0,1474	0,1179
3	0,064	1,8	0,1152	0,2074	0,3733	0,6719
$\mu_r(d)$			0,0000	0,72	0,144	1,238
σ_d^r			0,8485*	0,72*	0,6109	0,5184
$\alpha_r(d)$			-	-	0,236	2,39

* $0,8485 = \sqrt{0,72}$ (0,72 является точным значением).

Таблица 2

Вычисление первых четырех моментов, α_3 и α_4 при биномиальном распределении доли дефектных стрелочных элементов ($n = 3, P = 0,4$)

p	$P(p)$	$p - P$	$[p - P]P(p)$	$[p - P]^2P(p)$	$[p - P]^3P(p)$	$[p - P]^4P(p)$
0,000	0,216	-0,400	-0,0864	0,03456	-0,01382	0,00553
0,333	0,432	-0,067	-0,0288	0,00192	-0,00013	0,00001
0,667	0,288	0,267	0,0768	0,02048	0,00546	0,00146
1,000	0,064	0,600	0,0384	0,02304	0,01382	0,00829
$\mu_r(p)$			0,0000	0,08	0,00533	0,0153
σ_p^r			0,2828*	0,08*	0,02263	0,0064
$\alpha_r(p)$			-	-	0,236	2,39

* $0,2828 = \sqrt{0,08}$ (0,08 является точным значением).

Если $P = 0,211325$, то $\alpha_4 = 3$.

Если $P < 0,211325$, то $\alpha_4 > 3$ и распределение является островершинным.

Если $P > 0,211325$, то $\alpha_4 < 3$ и распределение является плосковершинным.

Числовая характеристика распределения	Количество дефектных изделий	Доля дефектных изделий
Математическое ожидание	$E(d) = nP$	$E(p) = P$
Дисперсия или второй момент	$\mu_2(d) = \sigma_d^2 = nPQ$	$\mu_2(p) = \sigma_p^2 = \frac{PQ}{n}$
Третий момент	$\mu_3(d) = (Q - P)nPQ$	$\mu_3(p) = (Q - P) \frac{PQ}{n^2}$
Коэффициент асимметрии	$\alpha_3(d) = \alpha_3(p) = \frac{Q - P}{\sqrt{nPQ}}$	

Применительно к стрелочной продукции [7, 8], т.е. для случая, когда $n = 3$ и $P = 0,4$, получаем следующие численные значения:

$$E(d) = 3 \cdot 0,4 = 1,2; E(p) = 0,4;$$

$$\mu_2(d) = \sigma_d^2 = 3 \cdot 0,4 \cdot 0,6 = 0,72;$$

$$\mu_2(p) = \sigma_p^2 = \frac{0,4 \cdot 0,6}{3} = 0,08;$$

$$\sigma_d = \sqrt{0,72} = 0,8485; \sigma_p = \sqrt{0,08} = 0,2828;$$

$$\mu_3(d) = (0,6 - 0,4) \cdot 0,72 = 0,144;$$

$$\mu_3(p) = 0,2 \frac{0,4 \cdot 0,6}{9} = 0,00533;$$

$$\alpha_3(d) = \alpha_3(p) = \frac{0,2}{0,8485} = 0,236.$$

Стандартная ошибка доли дефектных стрелочных элементов настолько важная характеристика при обработке статистических данных вообще и при контроле качества в частности, что ее следует рассмотреть более детально [9, 10].

Если бесконечная генеральная совокупность состоит из стрелочных элементов, которые являются либо годными, либо дефектными, то можно условиться, что различным изделиям приписываются значения либо 0 (годные), либо 1 (дефектные) [11, 12]. Соответственно если доля дефектных стрелочных элементов составляет 0,4, то такое распределение может быть записано следующим образом:

X	$P(X)$
0	0,60
1	0,40
Всего	1,00

Среднее значение и стандартное отклонение для такой генеральной совокупности вычисляются обычным способом:

X	$P(X)$	$XP(X)$	$X^2P(X)$
0	0,60	0,00	0,00
1	0,40	0,40	0,40
Всего	1,00	$E(X) = 0,40$	$E(X^2) = 0,40$
Квадрат среднего значения	$[E(X)]^2 = 0,16$		
Дисперсия	$\sigma_X^2 = 0,24$		

Таким образом, $\sigma_X^2 = 0,24$, и эта же величина равна PQ . В том, что это действительно должно быть так, легко убедиться, если рассмотреть порядок вычисления σ_X^2 :

$$\sigma_X^2 = (0) \cdot Q + (1) \cdot P - P^2 = P - P^2 = P(1 - P) = PQ.$$

Теперь обычным способом можем вычислить стандартную ошибку — дисперсию среднего значения приведенного выше распределения:

$$\sigma_{\bar{X}}^2 = \frac{\sigma_X^2}{n}.$$

Так как $\bar{X} = p$ и $\sigma_X^2 = PQ$, очевидно, что

$$\sigma_{\bar{X}}^2 = \sigma_p^2 = \frac{PQ}{n} \text{ и } \sigma_p = \sqrt{\frac{PQ}{n}}.$$

Рассмотрим зависимость σ_p от n и P . Из приведенной выше формулы следует, что σ_p имеет максимальное значение, когда $P = Q = 0,5$ и изменяется обратно пропорционально \sqrt{n} . Характер зависимости σ_p от n и P можно выявить более четко, если обратиться к табл. 3, в которой представлены значения σ_p для некоторых конкретных значений n и P . Значения P в табл. 3 приведены только до 0,5, так как для значений P , дополняющих данные значения до единицы, σ_p будет иметь такую же величину [6].

Хотя вычисление значения по формуле $\sigma_p = \sqrt{\frac{PQ}{n}}$ и не требует большого труда, однако в ряде случаев необходимо определять приближенные значения σ_p , затрачивая минимум усилий [13].

С этой целью несколько преобразуем формулу для σ_p :

$$\sigma = \sqrt{\frac{PQ}{n}} = \frac{\sqrt{P(1-P)}}{\sqrt{n}};$$

$$\lg \sigma_p = \frac{1}{2} \lg [P(1-P)] - \frac{1}{2} \lg n.$$

В последней формуле $\lg \sigma_p$ является линейной функцией $\lg [P(1-P)]$ и $\lg n$. Следовательно, легко построить номограмму для определения по этим двум последним величинам численного значения $\lg \sigma_p$. Если же построить номограмму в логарифмическом масштабе, то с ее помощью можно непосредственно находить величину σ_p по значениям P и n [14].

Таблица 3

Значения σ_p для некоторых значений n и P

n	P или Q							
	0,001	0,01	0,05	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50
5000	0,00045	0,0010	0,0031	0,0042	0,0057	0,0065	0,0069	0,0071
1000	0,0010	0,0033	0,0069	0,0095	0,013	0,014	0,015	0,016
500	0,0014	0,0044	0,0097	0,013	0,018	0,020	0,022	0,022
50	0,0032	0,010	0,022	0,030	0,040	0,046	0,049	0,050
100	0,0045	0,014	0,031	0,042	0,057	0,065	0,069	0,071
10	0,010	0,031	0,069	0,095	0,126	0,145	0,155	0,158
5	0,014	0,044	0,097	0,134	0,179	0,205	0,219	0,224

Таблица 4

Абсолютные значения α_3 для биномиального распределения при разных значениях n и P

n	P или Q							
	0,001	0,01	0,05	0,10	0,20	0,30	0,40	0,45
5000	0,45	0,14	0,058	0,038	0,021	0,012	0,0058	0,0028
1000	1,00	0,31	0,13	0,084	0,047	0,028	0,013	0,0064
500	1,41	0,44	0,18	0,12	0,067	0,039	0,018	0,0090
100	3,16	0,98	0,41	0,27	0,15	0,087	0,041	0,020
50	4,47	1,39	0,58	0,38	0,21	0,12	0,058	0,028
10	9,99	3,11	1,31	0,84	0,47	0,28	0,13	0,064
5	14,12	4,40	1,85	1,19	0,67	0,39	0,18	0,090

Формула для коэффициента асимметрии биномиального распределения

$$\alpha_3(d) = \alpha_3(p) = \frac{Q - P}{\sqrt{nPQ}}$$

указывает на то, что асимметрия является положительной, когда $Q > P$ (это обычно имеет место при контроле качества), и отрицательной, когда $P > Q$. В случае когда $P = Q = 0,5$, асимметрия отсутствует [8]. При неизменной величине n асимметрия при увеличении отклонения P от 0,5 также возрастает, потому что $|Q - P|$ становится больше, а стоящая в знаменателе величина \sqrt{nPQ} уменьшается. При неизменном значении P асимметрия изменяется обратно пропорционально \sqrt{n} . Таким образом, если $P < 0,5$, асимметрия увеличивается при уменьшении как P , так и n .

Характер зависимости коэффициента асимметрии α_3 при биномиальном распределении от n и P легко заметить при рассмотрении табл. 4, в которой приведены значения α_3 при различных значениях n и P . Отметим, что когда $n \geq 500$, асимметрия невелика, за исключением случаев, когда P или Q меньше 0,05 [15].

После применения логарифмов величин, входящих в формулу для $\alpha_3(p)$, эту формулу можно привести к линейному виду:

$$\alpha_3(p) = \frac{Q - P}{\sqrt{nPQ}} = \frac{1 - 2P}{\sqrt{P(1 - P)}} \cdot \frac{1}{\sqrt{n}};$$

$$\lg \alpha_3(p) = \lg(1 - 2P) - \frac{1}{2} \lg[P(1 - P)] - \frac{1}{2} \lg n.$$

На практике планы приемочного контроля партии стрелочной продукции чаще связаны с проверкой гипотез, чем с оценкой параметров. Это вызвано главным образом тем, что изделия легче классифицировать как хорошие или дефектные, чем проводить их точные измерения, а также тем, что подсчет числа дефектных элементов осуществлять проще, чем выполнять измерения и определять среднее значение совокупности величин. Однако эти преимущества могут быть сведены на нет, если для принятия решения относительно качества партии стрелочной продукции при использовании качественных признаков потребуется большая выборка.

Литература

1. Применение методов анализа сочетаний размеров колесных пар и элементов стрелочных переводов для определения размеров желобов контрольных узлов / Б. Э. Глюзберг, А. А. Локтев, В. В. Королев, В. С. Кусков // Транспорт Урала. 2021. № 2 (69). С. 3–9. DOI: 10.20291/1815-9400-2021-2-3-9. ISSN 1815-9400.
2. Принципы определения необходимой прочности железнодорожного пути с учетом интенсивности его использования / Б. Э. Глюзберг, А. А. Локтев, В. В. Королев [и др.] // Транспорт Урала. 2022. № 1 (72). С. 53–61. DOI: 10.20291/1815-9400-2022-1-53-61. ISSN 1815-9400.
3. Королев В. В. Возможность изменения профиля контрольного уголка СП-850 // Путь и путевое хозяйство. 2021. № 9. С. 29–31. ISSN 0033-4715.
4. Глюзберг Б. Э., Королев В. В. Поколения стрелочных переводов // Путь и путевое хозяйство. 2021. № 12. С. 21–24. ISSN 0033-4715.
5. Королев В. В. Цифровой двойник стрелочного перевода // Путь и путевое хозяйство. 2021. № 1. С. 6–8. ISSN 0033-4715.
6. Королев В. В. Дефекты элементов стрелочных переводов // Путь и путевое хозяйство. 2013. № 8. С. 13–16. ISSN 0033-4715.
7. Королев В. В. Совершенствование системы учета дефектов элементов стрелочных переводов // Путь и путевое хозяйство. 2016. № 7. С. 14–16. ISSN 0033-4715.
8. Королев В. В. Моделирование стрелочных переводов на плитном основании // Наука и техника транспорта. 2019. № 3. С. 77–87. ISSN 2074-9325.
9. Локтев Д. А., Локтев А. А., Королев В. В. Определение состояния грунтового массива с помощью обработки изображений, полученных георадаром // Авиакосмическое приборостроение. 2021. № 12. С. 34–45. DOI: 10.25791/aviakosmos.12.2021.1256.
10. Королев В. В. Сравнительный анализ технологических процессов сборки стрелочных переводов // Транспортное строительство : сборник статей второй всероссийской научно-технической конференции, Москва, 12–14 апреля 2021 г. Москва : Перо, 2021. С. 56–72.
11. Королев В. В. Совершенствование системы учета дефектов элементов стрелочных переводов // Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути : сборник материалов XIII научно-технической конференции. Москва : Изд-во МИИТ, 2016. С. 195–196.
12. Королев В. В. Подготовка технических средств и нормативной документации по стрелочному хозяйству для линий высокоскоростного движения // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. 2019. Т. 1. № 14. С. 21–26.
13. Theoretical approaches for modeling and calculating the consolidation of a composite weak bottom / A. Loktev, V. Korolev, I. Ulanov [et al.] // Transportation Research Procedia. 2022. Vol. 63. Pp. 938–945. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.06.092>.
14. Models of deformation behavior and analytical methods for determining settlement of weak soils / A. Loktev, V. Korolev, I. Ulanov [et al.] // Transportation Research Procedia. 2022. Vol. 63. Pp. 817–824. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.06.078>.
15. Korolev V. Methods for Analyzing Combinations of Wheelset Sizes and Switch Elements // Transportation Research Procedia. 2022. Vol. 63. Pp. 48–56. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.06.203>.

References

1. Application of methods for analysing combinations of wheelset sizes and switch elements to determine the size of gutters of check-rail assemblies [Primenenie metodov analiza sochetaniy razmerov kolesnykh par i elementov strelochnykh perevodov dlya opredeleniya razmerov zhelobov kontrol'sovykh uzlov] / B. E. Glyuzberg, A. A. Loktev, V. V. Korolev, V. S. Kuskov // Transport of the Urals. 2021. No. 2 (69). Pp. 3–9. DOI: 10.20291/1815-9400-2021-2-3-9. ISSN 1815-9400.
2. Principles of determination of required railway track strength with the consideration for intensity of its use [Printsiipy opredeleniya neobkhodimoy prochnosti zheleznodorozhnogo puti s uchetom intensivnosti ego ispol'zovaniya] / B. E. Glyuzberg, A. A. Loktev, V. V. Korolev [et al.] // Transport of the Urals. 2022. No. 1 (72). Pp. 53–61. DOI: 10.20291/1815-9400-2022-1-53-61. ISSN 1815-9400.
3. Korolev V. V. Possibility to change the angle profile of the counter-rail SP-850 [Vozmozhnost' izmeneniya profilya kontrol'sovogo ugolka SP-850] // Railway Track and Facilities. 2021. No. 9. Pp. 29–31. ISSN 0033-4715.
4. Glyuzberg B. E., Korolev V. V. Generation of switches [Pokoleniya strelochnykh perevodov] // Railway Track and Facilities. 2021. No. 12. Pp. 21–24. ISSN 0033-4715.
5. Korolev V. V. Digital twin of turnouts [Tsifrovoy dvoynik strelochnogo perevoda] // Railway Track and Facilities. 2021. No. 1. Pp. 6–8. ISSN 0033-4715.
6. Korolev V. V. Defects of switch parts [Defekty elementov strelochnykh perevodov] // Railway Track and Facilities. 2013. No. 8. Pp. 13–16. ISSN 0033-4715.
7. Korolev V. V. Additions to the classification of defects and damages of the turnouts [Sovershenstvovanie sistemy ucheta defektov elementov strelochnykh perevodov] // Railway Track and Facilities. 2016. No. 7. Pp. 14–16. ISSN 0033-4715.
8. Korolev V. V. Modelling of switches on the slab base [Modelirovaniye strelochnykh perevodov na plitnom osnovanii] // Science and technology in transport. 2019. No. 3. Pp. 77–87. ISSN 2074-9325.
9. Loktev D. A., Loktev A. A., Korolev V. V. Determination of the state of the soil massif using the processing of images obtained by georadar [Opredeleniye sostoyaniya gruntovogo massiva s pomoshhyu obrabotki izobrazheniy, poluchennykh georadarom] // Aerospace Instrument-Making. 2021. No. 12. Pp. 34–45. DOI: 10.25791/aviakosmos.12.2021.1256.
10. Korolev V. V. Comparative analysis of technological processes of switch assembling [Srvnitel'nyy analiz tekhnologicheskikh protsessov sborki strelochnykh perevodov] // Transport construction : collection of proceedings of 2nd All-Russian research and technical conference, Moscow, April 12–14, 2021. Moscow : Pero, 2021. Pp. 56–72.
11. Korolev V. V. Improvement of a system for accounting defects of switch parts [Sovershenstvovanie sistemy ucheta defektov elementov strelochnykh perevodov] // Modern problems of design, construction and operation of railway tracks : collection of proceedings of 13th research and technical conference. Moscow : Publishing House of MIIT, 2016. Pp. 195–196.
12. Korolev V. V. Preparation of technical equipment and normative documentation on switches for high-speed lines [Podgotovka tekhnicheskikh sredstv i normativnoy dokumentatsii po strelochnomu khozyaystvu dlya liniy vysokoskorostnogo dvizheniya] // Implementation of modern structures and advanced technologies in the track economy. 2019. Vol. 1. No. 14. Pp. 21–26.
13. Theoretical approaches for modeling and calculating the consolidation of a composite weak bottom / A. Loktev, V. Korolev, I. Ulanov [et al.] // Transportation Research Procedia. 2022. Vol. 63. Pp. 938–945. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.06.092>.
14. Models of deformation behavior and analytical methods for determining settlement of weak soils / A. Loktev, V. Korolev, I. Ulanov [et al.] // Transportation Research Procedia. 2022. Vol. 63. Pp. 817–824. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.06.078>.
15. Korolev V. Methods for Analyzing Combinations of Wheelset Sizes and Switch Elements // Transportation Research Procedia. 2022. Vol. 63. Pp. 48–56. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.06.203>.

Объем статьи 0,46 авторских листа

УДК 625.142.1

Евгений Павлович Дудкин, доктор технических наук, профессор кафедры «Строительство дорог транспортного комплекса» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС), Санкт-Петербург, Россия,

Сергей Николаевич Корнилов, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Логистика и управление транспортными системами» Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова (МГТУ), Магнитогорск, Россия,

Максим Вячеславович Малахов, старший преподаватель кафедры «Строительство дорог транспортного комплекса» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС), Санкт-Петербург, Россия,

Нариман Надимбекович Султанов, кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительство дорог транспортного комплекса» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС), Санкт-Петербург, Россия

ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ НА БЕСШПАЛЬНОМ ОСНОВАНИИ

Evgeniy Pavlovich Dudkin, DSc in Engineering, Professor, Road Construction of Transport Systems Department, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (PSTU), St. Petersburg, Russia,

Sergey Nikolaevich Kornilov, DSc in Engineering, Professor, Head of Logistics and Transportation Systems Management Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University (NMSTU), Magnitogorsk, Russia,

Maxim Vyacheslavovich Malakhov, Senior Lecturer, Road Construction of Transport Systems Department, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (PSTU), St. Petersburg, Russia,

Nariman Nadimbekovich Sultanov, PhD in Engineering, Associate Professor, Road Construction of Transport Systems Department, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (PSTU), St. Petersburg, Russia

Features of calculation of railway track on sleeperless base

Аннотация

В статье предложена методика расчета на прочность и осадку бесшпальной конструкции, учитывающая максимальное количество факторов, оказывающих влияние на надежность и безопасность железнодорожного пути.

Ключевые слова: железнодорожный путь, бесшпальная конструкция, монолитное основание, многослойная конструкция плиты основания, методика расчета бесшпальных конструкций.

Abstract

The paper proposes a method for calculation of strength and settlement of a sleeperless construction that considers a maximum number of factors that affect reliability and safety of a railway track.

Keywords: railway track, sleeperless construction, solid base, multi-layer design of a base plate, method of calculation of sleeperless constructions.

DOI: 10.20291/1815-9400-2023-1-93-98

В настоящее время на магистральных железных дорогах и городском рельсовом транспорте достаточно широко используются бесшпальные конструкции пути. Основные преимущества таких конструкций [1]: меньшая ширина отвода трассы; компактные геометрические размеры поперечного сечения пути; большая устойчивость и сопротивление поперечным силам из-за высокой собственной массы конструкции; отсутствие вылетающих частиц балласта под воздействием аэродинамических сил; устойчивое положение пути, снижающее динамические силы; удобство укладки на мостах, эстакадах и тоннелях; возможность перемещения автотранспорта в экстренных ситуациях; увеличение межремонтных сроков и сроков службы пути; снижение эксплуатационных затрат; высокая устойчивость бесстыкового пути к температурному выбросу.

Однако эти конструкции имеют ряд особенностей, которые необходимо учитывать при расчете пути на прочность: рельсы опираются на сплошное железобетонное основание; основание может состоять из двух- или трехслойных железобетонных плит;

характеристики несущего железобетонного основания изменяются под воздействием агрессивной среды (например, природных или промышленных вод с повышенной кислотностью).

Конструкцию пути на монолитном основании можно рассчитать по трем схемам: как конструкцию автомобильной дорожной одежды жесткого типа, как плиту фундамента и как мостовую конструкцию [2–5]. По этим трем схемам были выполнены расчеты с учетом особенностей передачи нагрузки от рельса на плиту.

Анализ полученных результатов показал, что расчет несущей плиты как дорожной одежды жесткого типа не позволяет определить распределение возникающих в плите усилий по сечениям и не учитывает характер армирования, на выходе получают напряжения только в точке пятна контакта рельса и бетонной поверхности.

Расчет на прочность несущей плиты пути как мостовой конструкции по упрощенной схеме (балка на двух опорах) недопустим, а с учетом работы основания под плитой схема сводится к расчету плиты на упругом основании, т.е. фундаментной плиты.

При расчете конструкции как плиты фундамента определяются возникающие усилия в каждом конечном элементе, что позволяет проанализировать общее напряженное состояние плиты при различных вариантах ее армирования. Такой расчет показывает наиболее достоверные результаты: максимальное расхождение теоретических и экспериментальных данных составляет 16 % [3]. Этот усовершенствованный метод, который учитывает упругую работу основания, процент и характеристики армирования, а также срок эксплуатации конструкции (с учетом влияния дополнительных факторов), и может быть рекомендован для расчета несущей плиты на прочность. Однако метод применим, только если плита однослойная, если же несущая плита устроена как многослойная конструкция, то нужно учитывать влияние не только поездной нагрузки на плиту, но и взаимную работу некомпланарных плит, а также снижение прочностных характеристик при воздействии агрессивной среды.

В монографии А. Н. Пестрякова, И. Г. Овчинникова, В. П. Горшкова [6] представлены направления решения этих особенностей и предложен ряд возможных методик расчета грунтового основания. Наиболее интересные из них:

1) модель Винклера, которая дает наилучшие результаты сходимости расчетных и лабораторных данных при проектировании дорожных и аэродромных покрытий с основанием из водонасыщенных грунтов, особенно в песках и супесях. Кроме того, методика используется на участках с основаниями из грунтов с анизотропными свойствами (грунт с наклонным расположением пластов, искусственное свайное основание, сланцеватый скальный грунт);

2) модель грунтового основания в виде сжимаемого слоя конечной мощности [7–10]. Сжимаемый слой может быть линейно-деформируемым (характеризуется четырьмя параметрами E_n , E_B , m_n , m_B) или упругим (характеризуется двумя параметрами E_B и m_B). В данном случае степень распространения деформаций зависит от соотношения толщины слоя к диаметру штампа. В результате при малых толщинах модель приобре-

тает свойства Винклера, и ее деформации становятся местными, а при бесконечно большой толщине слоя модель превращается в однородное упругое полупространство. При этом в модели упругого полупространства, также являющегося моделью упругого основания, учтена осадка за пределами штампа. То есть данная методика учитывает деформации общего характера, которые чаще всего наблюдаются у грунтов оснований. Такая модель применяется при анализе упругой работы дорожных плит [11, 12].

В модели упругого полупространства принят ряд допущений: развитие деформаций местного характера невозможно, и материал модели принят сплошным;

все деформации упругие и линейно зависят от напряжений, после снятия нагрузок деформации полностью исчезают; при появлении продольных деформаций появляются и поперечные деформации, связь между которыми определяется коэффициентом Пуассона.

Для учета остаточных деформаций Н. М. Герсеванов и Д. Е. Польшин предложили использовать обобщенный параметр — коэффициент оседания [13], учитывающий и упругие, и остаточные деформации грунта, либо при расчетах грунтовых оснований методами теории упругости вместо модуля упругости и коэффициента Пуассона использовать модуль полной деформации и коэффициент Пуассона для полной деформации [13]. Также введены дополнительные параметры, которые характеризуют поведение линейно-деформируемого полупространства после снятия нагрузки — модуль упругости и коэффициент Пуассона. Таким образом, при нагружении модель ведет себя как упругая среда или упругое полупространство, однако после снятия нагрузки остаточные деформации появляются в том месте, где находился штамп, и вокруг него.

Интересной с точки зрения применимости расчета плит на грунтовом основании является методика, предложенная П. Л. Пастернаком, особенность которой — наличие двух коэффициентов: коэффициента сжатия и коэффициента сдвига.

При расчетах грунтового основания предлагается моделировать линейно-деформируемое полупространство, задаваться модулем упругости и коэффициентом Пуассона каждого слоя грунтового основания, значения которых будут приняты либо из нормативных источников (СП 22.13330.2020 «Основания зданий и сооружений»), либо из результатов инженерно-геологических изысканий.

Охарактеризовав методики расчетной модели грунтового основания, проанализируем напряженное состояние бетонного элемента, который может состоять из тела одного физико-механического свойства, а также из многослойной конструкции с разными физико-механическими свойствами каждого слоя.

Для этого рассмотрим дифференциальное уравнение изгиба пластины на упругом основании. Отобразим модель пластины в качестве конструктивного элемента, принимая справедливость следующих суждений:

между слоями пластины отсутствует давление; любой прямоугольный и нормальный элемент прямолинеен, имеет неизменяемую длину и нормальность к срединной плоскости как до, так и после деформирования пластины (рис. 1).

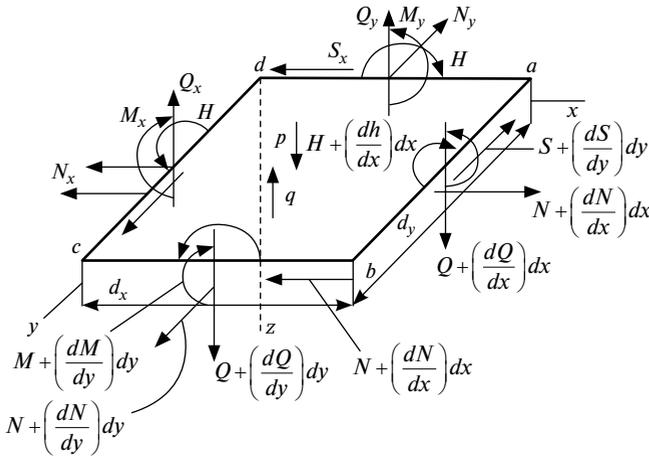


Рис. 1. Усилия, действующие на малый элемент пластины

Рассмотрению подлежит малый элемент пластины $abcd$ с размерами dx и dy , на который действует вертикальная нагрузка с интенсивностью p , направленная ортогонально плоскости элемента. На грани cd действуют поперечные к оси x силы Q_x и S_x , параллельная оси x и являющаяся растягивающей сила N_x , изгибающий момент M_x и крутящий момент H . На грани ab , которая расположена на бесконечно малом расстоянии dx от грани cd , усилия получают бесконечно малые приращения, которые равны

$$\frac{dQ_x}{dx} dx, \frac{dS_x}{dx} dx, \frac{dQN_x}{dx} dx, \frac{dM_x}{dx} dx, \frac{dH_x}{dx} dx.$$

Чтобы элемент находился в равновесии, должно выполняться условие равновесия проекций всех сил на координатные оси и условие равновесия моментов всех сил. Так как рассматривается объемный элемент, в котором три оси x, y, z , то условие равновесия элемента будет представлять собой систему из шести уравнений. Спроецируем все силы на ось z , составим уравнение равновесия моментов сил относительно оси x и получим уравнение

$$\frac{d^2 M_x}{dx^2} + 2 \frac{d^2 H}{dx dy} + \frac{d^2 M_y}{dx y^2} = -p.$$

Далее, в силу того что конструкция несущей плиты может быть одно- и многослойной, предположим, что она будет работать не как монолитный материал, свойства которого одинаковы во всех направлениях, а как нелинейный ортотропный разномодульный. Причиной этого может быть простой пример. Типичным ортотропным материалом является древесина, свойства которой неодинаковы в разных направлениях. Так и в нашем случае, когда несущая конструкция состоит из пирога плит, у которых разное армирование, а в каких-то слоях оно может и вообще отсутствовать, то встает вопрос о выводе уравнения, позволяющего описать работу данной конструкции. Рассмотрим несущую плиту как квазиоднородную среду, тогда плоское напряженное состояние можно описать следующим образом:

$$e_x = \frac{\sigma_x}{\Psi_{xi}} - \frac{\sigma_y}{\Psi_{yj}} \nu_{yj};$$

$$e_y = \frac{\sigma_y}{\Psi_{yi}} - \frac{\sigma_x}{\Psi_{xj}} \nu_{xj};$$

$$e_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G_j},$$

где $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}, e_x, e_y, e_{xy}$ — компоненты тензоров напряжений и деформаций; ν_{yj}, ν_{xj} — коэффициенты поперечной деформации; x, y — индексы направления; i, j — индексы приложения нагрузки в направлениях x и y соответственно: $i(j) = 1$ — растяжение, $i(j) = 2$ — сжатие; G_j — модуль сдвига; Ψ_{xi}, Ψ_{yj} — функции, принимаемые в виде:

$$\Psi_{xi} = \frac{\Phi_{xi}(e_u)}{e_u};$$

$$\Psi_{yj} = \frac{\Phi_{yj}(e_u)}{e_u},$$

где e_u — интенсивность деформаций; Φ_{xi}, Φ_{yj} — функции, аппроксимирующие диаграммы деформации материала в соответствующем направлении, которые можно представить как:

$$\Phi_{xi} = A_{xi} e_u^{k_{xi}} - B_{xi} e_u^{m_{xi}};$$

$$\Phi_{yj} = A_{yj} e_u^{k_{yj}} - B_{yj} e_u^{m_{yj}}.$$

Отметим, что для определения коэффициентов $A_{xi}, B_{xi}, A_{yj}, B_{yj}$ необходимо построить диаграммы растяжения (сжатия) в направлении x и y и вычислить их из условия наилучшей аппроксимации диаграмм. Далее, определив модуль сдвига через функции Ψ_{xi}, Ψ_{yj} и коэффициенты ν_{yj}, ν_{xj} получим выражения:

$$\sigma_x = \frac{\Psi_{xi}}{1 - \nu_{yj} \nu_{xj}} (e_x + \nu_{yj} e_y);$$

$$\sigma_y = \frac{\Psi_{yi}}{1 - \nu_{yj} \nu_{xj}} (e_y + \nu_{xj} e_x);$$

$$\tau_{xy} = G_j e_{xy}.$$

Коэффициенты модели, которая описывает деформирование бетона при плоском напряженном состоянии, должны определяться из экспериментов, которые проводятся для плоского напряженного состояния. Однако такие эксперименты представляют большую технологическую сложность, поэтому важно оценить погрешность вычисления коэффициентов для плоского напряженного состояния из результатов одноосного испытания [6] (рис. 2).

Сопоставляя результаты расчетов с коэффициентами, полученными по одноосным сжатиям, и реальные двухосные испытания, видим, что предлагаемая модель корректно описывает поведение материала как при плоском напряженном состоянии, так и при одноосном.

На данном этапе появляется возможность смоделировать поведение почти любого применяемого в конструкции пути материала (классического бетона с армированием или без армирования), учесть работу многослойной конструкции плиты, которая будет иметь разные свойства в разных направлениях, а также учесть работу фибробетона. Необходимо отметить, что при использовании многослойной конструкции плиты ее работу можно смоделировать и другим способом. Вертикальные слои такой плиты на упругом основании теоретически можно разбить на отдельные элементы, рассмотреть их взаимное влияние и, последовательно рассматривая реакции в вершинах конечных элементов, определить возникающие в железобетонной плите усилия и перемещения.

Для второй проблемы запишем дифференциальное уравнение изгиба бетонной пластины на упругом основании при условии воздействия агрессивной среды:

$$\frac{d^2}{dx^2} \left(D_1 \frac{d^2 w}{dx^2} \right) + \frac{d^2}{dx^2} \left(D_2 \frac{d^2 w}{dy^2} \right) + 2 \frac{d^2}{dx dy} \left(D_3 \frac{d^2 w}{dx dy} \right) + \frac{d^2}{dy^2} \left(D_2 \frac{d^2 w}{dx^2} \right) + \frac{d^2}{dy^2} \left(D_1 \frac{d^2 w}{dy^2} \right) = p(x, y) - q(x, y),$$

где:

$$D_1 = f_1 J_1^{\text{бет}} + f_2 J_1^{\text{бет}} + J_2^{\text{бет}};$$

$$D_2 = f_2 J_1^{\text{бет}} + f_1 J_1^{\text{бет}} + J_2^{\text{бет}};$$

$$D_3 = 2T_2^{\text{бет}} - 2 \frac{(T_2^{\text{бет}})^2}{T_0^{\text{бет}}};$$

$$f_1 = \frac{I_0^{\text{бет}} I_1^{\text{бет}} - J_0^{\text{бет}} J_1^{\text{бет}}}{(J_0^{\text{бет}})^2 - (J_1^{\text{бет}})^2};$$

$$f_2 = \frac{I_0^{\text{бет}} J_1^{\text{бет}} - J_0^{\text{бет}} I_1^{\text{бет}}}{(J_0^{\text{бет}})^2 - (J_1^{\text{бет}})^2}.$$

Математическое описание процесса разрушения материала бетона под воздействием агрессивной среды по толщине плиты задается системой уравнений:

$$C = 0 \text{ при } -\frac{h}{2} \leq z \leq \frac{h}{2} - L;$$

$$C = C_0 \left(1 + \frac{z}{L} + \frac{H}{2L} \right) \text{ при } \left(\frac{h}{2} - L \right) \leq z \leq L,$$

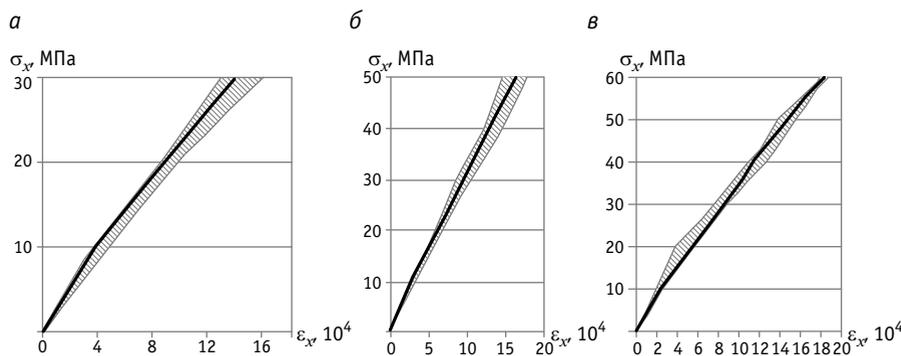


Рис. 2. Сопоставление экспериментальных значений (представлены в виде интервала) и теоретических расчетов деформаций для образцов с арматурой А-II: а — шаг арматуры 4d; б — шаг арматуры 3d; в — шаг арматуры 2d

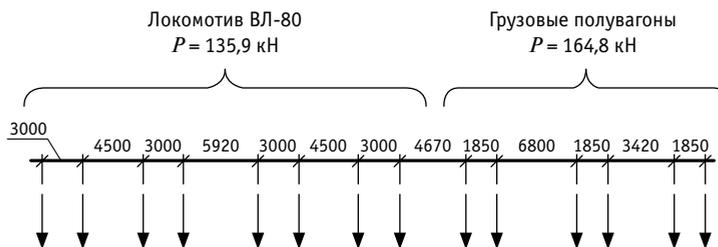


Рис. 3. Схема передачи нагрузки от подвижного состава на плиту

где z — ордината рассматриваемой точки (отсчитывается от срединной плоскости); h — толщина пластины; $L = a\sqrt{t}$ — фронт проникания агрессивной среды; a — коэффициент, характеризующий скорость продвижения размытого фронта; t — время.

Таким образом, используя методику моделирования и расчета фибробетона, где многослойность несущей конструкции верхнего строения железнодорожного пути обеспечивает анизотропные ортотропные свойства, а также методику расчета фундаментных плит (СП 22.13330.2020 «Основания зданий и сооружений»), можно предложить методику расчета беспальной конструкции железнодорожного пути на прочность и осадку, которая будет учитывать: поездной динамический характер нагрузки;

конструкцию несущей плиты (характер армирования по зонам, количество и физико-механические свойства конструктивных слоев плит);

свойства грунтов подплитного основания;

возможное влияние на прочность несущего элемента агрессивной среды в зависимости от срока эксплуатации.

По предложенной методике был выполнен расчет, в котором задана только вертикальная нагрузка от подвижного состава, пренебрегая усадочными, температурными и другими напряжениями, возникающими в плите.

Этапы расчета:

1. Создание расчетной схемы (геометрия плиты или плит, параметры основания).

2. Нагрузка плиты внешней силой. В данном случае рассматривается нагрузка от локомотива и вагона (рис. 3).

3. При работе в агрессивной среде несущая способность плиты изменяется. Для учета влияния агрессивной среды необходимо определить срок ее воздействия на конструкцию, поскольку от этого зависят текущие механические свойства несущей плиты. Кроме того, имея результаты лабораторных исследований, можно задавать это влияние коэффициентом, полученным по данным эксперимента, и снижать расчетную прочность несущей плиты на необходимое значение. В результате проведенных ранее исследований установлено, что за первые 5 лет воздействия агрессивной среды деформация плиты увеличивается на 10 %, за следующие 5 лет еще на 4 %.

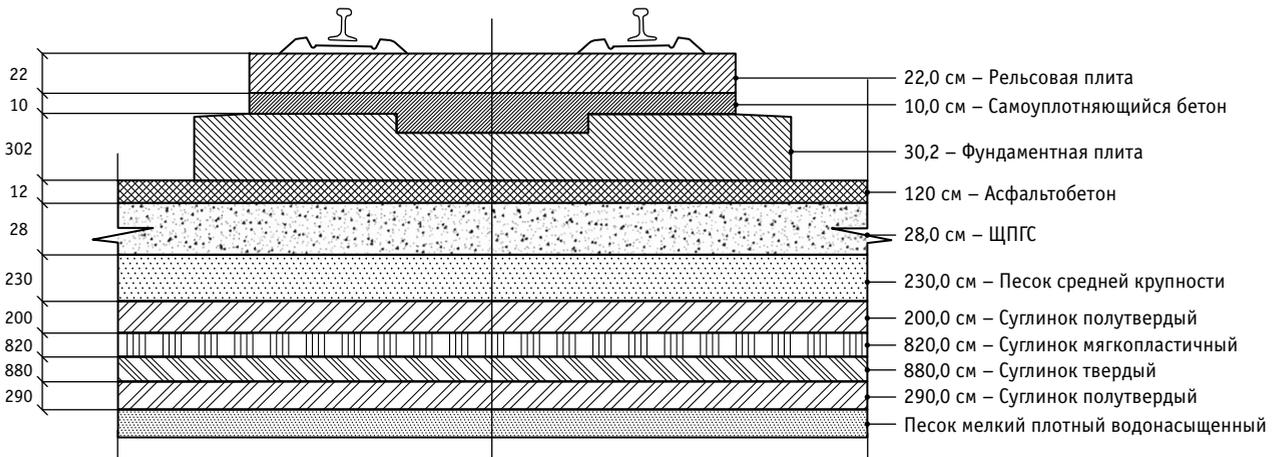


Рис. 4. Расчетная конструкция железнодорожного пути

Таблица 1

Расчетные характеристики материалов конструкции

Слой	Толщина слоя, м	Удельный вес, кг/м ³	Модуль деформации, МПа	Модуль упругости, МПа	Коэффициент Пуассона
1. Асфальтобетон	0,12	2400,00	255,00	480,00	
2. ЩПГС	0,28	2400,00	127,50	230,00	0,27
3. Песок средней крупности	2,30	1950,00	34,00	120,00	0,30
4. Суглинок полутвердый	2,00	2020,00	10,00	50,00	0,35
5. Суглинок мягкопластичный	1,70	2110,00	4,00	24,00	0,35
6. Суглинок полутвердый	1,10	2090,00	17,00	90,00	0,35
7. Суглинок полутвердый (2)	7,10	2180,00	31,00	100,00	0,35
8. Суглинок твердый	8,80	2200,00	37,00	107,00	0,35
9. Суглинок полутвердый (3)	2,90	2190,00	38,00	108,00	0,35
10. Песок мелкий плотный водонасыщенный		2100,00	47,00	100,00	0,35

4. Вычисление перемещений и усилий в плитах с использованием вышеприведенных систем дифференциальных уравнений.

Для облегчения выполнения расчетов в настоящее время логично пользоваться системами автоматизации: программными комплексами Matlab 5.2, ЛИРА САПР, СКАД и др. В этих программах расчет выполняется в том же порядке, однако внимания заслуживает этап, когда необходимо разбить расчетный элемент на конечные элементы, размеры которых оказывают решающее влияние на итоговую погрешность данных. Как показывают исследования, погрешность результатов для одного и того же элемента в зависимости от его размера может составлять от 0,053 до 1,008 %. Поэтому при разбивке сети необходимо учитывать толщину, длину и ширину расчетной конструкции и в соответствии с их взаимным соотношением подбирать размер конечных элементов, на которые программный комплекс будет делить расчетный элемент.

По предложенной методике выполнен расчет исследуемой на кольце ВНИИЖТа многослойной бесшпальной конструкции железнодорожного пути на прочность и осадку. Расчетные характеристики материалов в конструкции основания представлены на рис. 4 и в табл. 1.

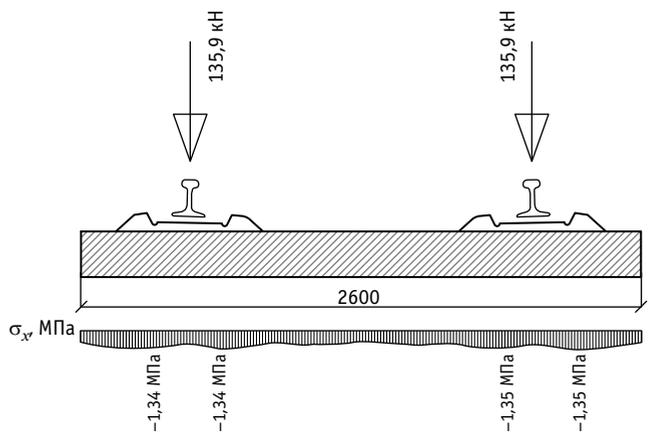


Рис. 5. Эпюра нормальных напряжений на поверхности рельсовой плиты

Результаты выполненного в программном комплексе Scad расчета напряжений, возникающих на поверхности рельсовой плиты рассмотренной конструкции, показаны на рис. 5.

Расхождение результатов расчета напряжений на поверхности плиты многослойной конструкции по предложенной методике и по полевым исследованиям составляет 18 %. Аналогичные результаты получены А. А. Сидоренко при обосновании требований к подплитному основанию при безбалластной монолитной конструкции верхнего строения пути с учетом действия поездной динамической на-

грузки по условию образования трещин на поверхности несущей плиты [14].

Таким образом, подтверждена перспективность использования в научных и проектных разработках предложенной методики расчета на прочность и осадку бесшпальной конструкции железнодорожного пути, учитывающей максимальное количество факторов, оказывающих влияние на его надежность и безопасность.

Литература

1. Савин А. В. Выбор конструкции пути для высокоскоростного движения // Транспорт Российской Федерации. 2017. № 1 (68). С. 18–21. ISSN 1994-831X.
2. СП 35.13330.2011. Мосты и трубы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.03-84*/ Минрегион России. Москва, 2011. 346 с.
3. Султанов Н. Н. Технико-экономическое обоснование перспективных конструкций трамвайных путей : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Санкт-Петербург, 2015. 270 с.
4. Методические рекомендации по проектированию жестких дорожных одежд (взамен ВСН 197-91). Москва : Росавтодор, 2004. 133 с.
5. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Москва : Стандартинформ, 2019. 124 с.
6. Пестряков А. Н., Овчинников И. Г., Горшков В. П. Пластины из фибробетона: эксперименты, модели деформирования, результаты расчета. Саратов : СГУ, 2004. 110 с.
7. Горбунов-Посадов М. И., Маликова Т. А., Соломин В. И. Расчет конструкций на упругом основании. Москва : Стройиздат, 1984. 679 с.
8. Черкасов И. И. Механические свойства грунтовых оснований. Москва : Стройиздат, 1958. 156 с.
9. Горбунов-Посадов М. И. Расчет конструкций на упругом основании. Москва, 1953. 74 с.
10. Цискрели Г. Д. Сопrotивление растяжению неармированных и армированных бетонов. Москва : Стройиздат, 1954. 149 с.
11. Иванов Н. Н. Проектирование автомобильных дорог. Ч. 1–2. Москва : Дориздат, 1948. 279 с., 258 с.
12. Леонович С. Н. Трещиностойкость и долговечность бетонных и железобетонных элементов в терминах силовых и энергетических критериев механики разрушения. Минск : Тыздзень, 1999. 264 с.
13. Герсеванов Н. М., Польшин Д. Е. Теоретические основы механики грунтов и их практические приложения. Москва : Стройиздат, 1948. 136 с.
14. Сидоренко А. А. Научное обоснование требований к подплитному основанию монолитного безбалластного пути, обеспечивающей трещиностойкость несущей плиты под поездной нагрузкой : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Санкт-Петербург, 2014. 143 с.

References

1. Savin A. V. Track design selection for high-speed movement [Vybor konstruktсии puti dlya vysokoskorostnogo dvizheniya] // Transport of the Russian Federation. 2017. No. 1 (68). Pp. 18–21. ISSN 1994-831X.
2. Code of Rules 35.13330.2011. Bridges and pipes [SP 35.13330.2011. Mosty i truby] / Ministry of Regional Development of the Russian Federation. Moscow, 2011. 346 p.
3. Sultanov N. N. Feasibility study of prospective designs of tram tracks [Tekhniko-ekonomicheskoe obosnovanie perspektivnykh konstruktсий tramvaynykh putey] : PhD in Engineering Thesis. St. Petersburg, 2015. 270 p.
4. Guidelines on design of rigid pavements [Metodicheskie rekomendatsii po proektirovaniyu zhestkikh dorozhnykh odezhd]. Moscow, 2004. 133 p.
5. Code of Rules 63.13330.2018. Concrete and reinforced concrete structures. General provisions [SP 63.13330.2018. Betonnye i zhelezobetonnye konstruktсии. Osnovnye polozheniya]. Moscow : Standardinform, 2019. 124 p.
6. Pestyakov A. N., Ovchinnikov I. G., Gorshkov V. P. Plates from fibrous concrete: experiments, deformation models, calculation results [Plastiny iz fibrobetona: eksperimenty, modeli deformirovaniya, rezul'taty rascheta]. Saratov : SSTU, 2004. 110 p.
7. Gorbunov-Posadov M. I., Malikova T. A., Solomin V. I. Calculation of structures on elastic foundation [Raschet konstruktсий na uprugom osnovanii]. Moscow : Stroyizdat, 1984. 679 p.
8. Cherkasov I. I. Mechanical properties of ground foundations [Mekhanicheskie svoystva gruntovykh osnovaniy]. Moscow : Stroyizdat, 1958. 156 p.
9. Gorbunov-Posadov M. I. Calculation of structures on elastic foundation [Raschet konstruktсий na uprugom osnovanii]. Moscow, 1953. 74 p.
10. Tsiskreli G. D. Tensile strength of non-reinforced and reinforced concretes [Soprotivlenie rastyazheniyu nearmirovannykh i armirovannykh betonov]. Moscow : Stroyizdat, 1954. 149 p.
11. Ivanov N. N. Design of automobile roads [Proektirovanie avtomobil'nykh dorog]. Part 1–2. Moscow : Dorizdat, 1948. 279 p., 258 p.
12. Leonovich S. N. Cracking resistance and service life of concrete and reinforced concrete elements in terms of strength and energy criteria of fracture mechanics [Treshhinostoykost' i dolgovechnost' betonnykh i zhelezobetonnykh elementov v terminakh silovykh i energeticheskikh kriteriev mekhaniki razrusheniya]. Minsk, 1999. 264 p.
13. Gersevanov N. M., Pol'shin D. E. Theoretical basics of soil mechanics and its practical applications [Teoreticheskie osnovy mekhaniki gruntov i ikh prakticheskie prilozheniya]. Moscow : Stroyizdat, 1948. 136 p.
14. Sidorenko A. A. Scientific substantiation of requirements to under-plate foundation for solid ballastless track that provide cracking resistance for bearing plate under train loading [Nauchnoe obosnovanie trebovaniy k podplitnomu osnovaniyu monolitnogo bezballastnogo puti, obespechivayushhikh treshhinostoykost' nesushhey plity pod poezdnoy nagruzkoy] : PhD in Engineering Thesis. St. Petersburg, 2014. 143 p.

Объем статьи 0,64 авторских листа

УДК 656.025.4:656.073

Алексей Тимофеевич Попов, кандидат технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Организация перевозок» Липецкого государственного технического университета (ЛГТУ), Липецк, Россия,

Ольга Анатольевна Сулова, кандидат технических наук, доцент кафедры «Организация перевозок» Липецкого государственного технического университета (ЛГТУ), Липецк, Россия,

Елена Александровна Воронкова, аспирант кафедры «Организация перевозок» Липецкого государственного технического университета (ЛГТУ), Липецк, Россия

ОПТИМИЗАЦИЯ ТРАНСПОРТНОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ АГЛОМЕРАЦИОННОГО ПРОИЗВОДСТВА С УЧЕТОМ ДИНАМИКИ ПОТОКОВ

Alexey Timofeevich Popov, PhD in Engineering, Professor, Head of Transportation Organization Department, Lipetsk State Technical University (LGTU), Lipetsk, Russia,

Olga Anatolyevna Suslova, PhD in Engineering, Associate Professor, Transportation Organization Department, Lipetsk State Technical University (LGTU), Lipetsk, Russia,

Elena Alexandrovna Voronkova, postgraduate student, Transportation Organization Department, Lipetsk State Technical University (LGTU), Lipetsk, Russia

Optimization of transport service of sinter production with the consideration for traffic dynamics

Аннотация

В статье рассмотрены особенности транспортного обслуживания агломерационного производства с учетом динамики потоков. На протяжении длительного периода, в течение которого эта проблема не исследовалась, произошли серьезные технологические трансформации предприятия. Интенсификация производственных процессов поставила новые задачи перед обслуживающим транспортом. Задача исследования состояла в построении математической модели транспортно-производственного типа для оптимизации работы агломерационного производства с сырьевыми потоками, приходящими в его адрес. В основу математической модели заложена динамическая транспортная задача с задержками.

Ключевые слова: агломерационное производство, промышленный транспорт, железорудное сырье, оптимизация транспортно-производственной системы, контактный график, математическая модель, простой вагонов, динамическая транспортная задача с задержками.

Abstract

The paper considers features of transport service of sinter production with the consideration for traffic dynamics. Over a long period of time during which the problem hadn't been studied, the enterprise faced serious technological transformations. Intensification of production processes set new tasks for industrial transport. The task consisted in creation of a mathematical model of a production and transport system for optimization of operation of sinter production with raw materials traffic. The mathematical model is based on a dynamic transportation problem with delays.

Keywords: sinter production, industrial transport, iron ore raw materials, optimization of production and transport system, contact schedule, mathematical model, delay of cars, dynamic transportation problem with delays.

DOI: 10.20291/1815-9400-2023-1-99-104

ВВЕДЕНИЕ

Металлургические предприятия являются одними из наиболее масштабных систем со сложной многоступенчатой организацией производства, в том числе производства горячего агломерата. В стремлении увеличить объемы и улучшить качество выпускаемой продукции они быстрыми темпами развивают технологии основных процессов и тем самым предъявляют новые требования к сопредельным подсистемам, в частности к железнодорожному транспорту.

ОСНОВЫ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ АГЛОМЕРАЦИОННОГО ПРОИЗВОДСТВА

Для выпуска офлюсованного и окускованного агломерата необходимы следующие виды сырья (табл. 1): доломит, известняк, известь, аглоруды, концентраты железорудные, отсев агломерата, окатышей, коксовая мелочь, колошниковая пыль, окалина, шламы и др., которые складываются в штабели на складе. Штабель представляет собой многокомпонентную, многослойную пирамиду, количество и объем слоев которой строго регламентированы. С одной стороны, формирование шихтового штабеля осуществляет промышленный транспорт по контактному графику, а с другой — магистральный железнодорожный транспорт в виде операторской компании, действующей на инфраструктуре общего пользования.

Таблица 1

Объем подхода потоков маршрутов исходного сырья для агломерационного производства [1]

Сырье	Количество вагонов, ед.	Масса, т	Соотношение, %
Концентрат железорудный	1388	95750	79,32
Окалина черных металлов	6	418	0,35
Руда железная	145	10168	8,50
Пыль колошниковая	10	522	0,43
Пыль аспирационная	10	573	0,47
Скрап конв. цехов (0–10 мм)	23	1445	1,22
Окалина конв. цехов	1	65	0,05
Окалина железная КЦ кр.	2	182	0,15
Окалина (горячая прокатка)	11	1001	0,83
Окалина изв.замасленная	6	534	0,45
Щебень фракционный	47	3255	2,61
Оксид (холодная прокатка)	1	78	0,07
Оксид динамных сталей	1	65	0,05
Отсев металл. доломит	1	79	0,07
Марганцовистый известняк	95	5863	4,49
Пыль колошниковая ДЦ-1	6	313,2	0,22
Пыль колошниковая ДЦ-2	5	261	0,22
Пыль аспирационная ДЦ-1	6	344,4	0,25
Пыль аспирационная ДЦ-2	5	287	0,25
ВСЕГО	1769	121203,6	100,00

Как показывает анализ табл. 1, поток концентрата железных руд является наиболее объемным в адрес агломерационной фабрики, минимальные потоки представлены оксидом динамных сталей, отсевом и окалиной. Отходы производства имеют наименьшие колебания по размеру и интервалу подачи партии вагонов на вагоноопрокидыватель, значительно ббльшая неравномерность характерна для маршрутов с рудой, рудным концентратом, известняком, доломитом, прибывающих с внешней сети [1].

По существующей технологии при выгрузке прибывшего железорудного сырья одновременно могут формироваться только два штабеля. Каждый из них представляет собой сложный, многокомпонентный пирог, в котором количество слоев, последовательность и объем каждого слоя строго регламентированы (табл. 2).

Вопрос оптимизации процесса выгрузки железорудного сырья металлургического комбината не рассматривался на протяжении 20 лет. За этот период число компонентов сырья для производства агломерата значительно выросло (см. табл. 1): если раньше их количество не превышало десяти позиций, то сейчас оно составляет 15–19 наименований, а количество слоев железорудного сырья в формируемом штабеле достигает 29.

Помимо большего числа компонентов агломерационной шихты, изменяются объемы готовой продукции, требующие увеличения производственных мощностей, и растет скорость

Таблица 2

Схема формирования штабелей железорудного сырья

№ п/п	Слой	Объем каждого слоя, т	Объем каждого слоя, ваг.
1	Концентрат железных руд	6000	90
2	Марганцовистый известняк	1080	16
3	Щебень	500	6
4	Концентрат железных руд	2000	30
5	Руда железная	2240	32
6	Концентрат железных руд	4500	128
7	Скрап	400	7
8	Концентрат железных руд	2000	30
9	Щебень	500	6
10	Концентрат железных руд	4500	128
11	Марганцовистый известняк	1010	15
12	Концентрат железных руд	2000	30
13	Руда железная	2240	32
14	Концентрат железных руд	4500	64
15	Щебень	500	6
16	Концентрат железных руд	9000	128
17	Скрап	400	7
18	Марганцовистый известняк	1010	15
19	Руда железная	2240	32
20	Щебень	500	6
21	Концентрат железных руд	12000	170
22	Щебень	500	6
23	Марганцовистый известняк	1010	15
24	Концентрат железных руд	4500	64
25	Скрап + окалина	400	7
26	Руда железная	1680	24
27	Концентрат железных руд	9000	128
28	Щебень	500	6
29	Концентрат железных руд	18000	256

спекания агломерата на агломерационной ленте. Эти факторы значительно усложняют работу железнодорожного транспорта по подаче необходимых видов сырья на блок из четырех вагоноопрокидывателей. Растет количество вагонов с различными видами грузов в ожидании выгрузки, требуется дополнительное путевое развитие в выставочно-приемочных парках, что является естественной реакцией транспортной системы на увеличение размеров и структуры транспортных потоков. При ожидании подхода нужного типа сырья для завершения отсыпки соответствующего слоя увеличивается простой вагонов с другими видами шихтовых материалов, несмотря на свободу вагоноопрокидывателей. Упущенная перерабатывающая способность транспортно-грузового комплекса несет угрозу сокращения объемов производства агломерата из-за повышения сроков формирования штабеля и сдвига момента начала его

разработки в технологическом процессе агломерации в сторону опоздания. Показатели функционирования транспортной подсистемы также ухудшаются.

Для решения проблемы предложено исследовать взаимодействие в системе «производство — транспорт — потребление» с использованием оптимизационной модели на основе динамической транспортной задачи с задержками (ДТЗЗ) [2, 3]. Функционал этой транспортно-производственной задачи должен оценивать транспортные расходы, затраты на хранение грузов в виде «склада на колесах» (простой груженых вагонов в ожидании выгрузки), возможные ущербы производства от опозданий и недопоставки грузов. Цели выполнения расчетов на модели заключаются в определении совместимости графиков отгрузки шихтовых материалов с потребным графиком выгрузки аглопроизводства, а также в минимизации транспортных издержек, простой вагонов и грузов в ожидании выгрузки, возможного ущерба потребителя от опоздания и недостатка грузов.

Эксперименты на модели должны оценить варианты взаимодействия в системе поставщиков и потребителей при обычной потоковой выгрузке в темпе прибытия грузов и в альтернативной инновационной схеме выгрузки в многослойный штабель по требованиям агломерационной технологии.

В роли поставщиков агломерационной шихты выступают цеха металлургического комбината (отходы производства) и сырьевые источники с внешней сети (горно-добывающие предприятия, обогатительные фабрики). В роли потребителей рассматриваются штабели с шихтовыми материалами.

В первом цикле экспериментов решается однопродуктовая транспортная задача, что обусловлено полной взаимозаменяемостью видов шихтовых материалов в штабеле. Во втором цикле в роли потребителей выступают отдельные слои штабелей, что трансформирует задачу в многопродуктовую. Для ее решения предлагается веер отдельных однопродуктовых задач по излагаемой методике с многослойным наложением результатов. Оценивается возможность одновременного формирования одного, двух и трех штабелей.

Сравнение результатов экспериментов на модели дает полную экономико-математическую оценку дополнительной работы и затрат транспортной подсистемы при обслуживании агломерационного производства в условиях ужесточившихся требований.

ПОСТАНОВКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Минимизируется функционал [1, 2]

$$F = \sum_{t=0}^T \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n C_{ij}(t) \cdot U_{ij}(t) + \sum_{t=0}^T \sum_{i=1}^m C_j^{**}(t) \cdot X_j^B(t) + \sum_{t=0}^T \sum_{j=1}^n C_j^{**}(t) \cdot \Delta U_{ij}(t) \cdot \Delta t_{ij} \Rightarrow \min, \quad (1)$$

где $X_j^B(t)$ — запас на колесах железорудного сырья (вагоны, ожидающие выгрузки в парке прибытия) у потребителя j в момент времени t ; $C_j^{**}(t)$ — удельные складские затраты на единицу груза у j -го потребителя в момент времени t ; $C_{ij}(t)$ — удельные затраты на транспортировку от i -го поставщика j -му потре-

бителю; $C_j^{**}(t)$ — удельные производственные издержки из-за опоздания единицы груза на единицу времени t ; $U_{ij}(t)$ — поставки от i -го поставщика j -му потребителю; $\Delta U_{ij}(t)$ — объем опаздывающей перевозки от i -го поставщика j -му потребителю; Δt_{ij} — время опоздания поставки $\Delta U_{ij}(t)$.

Изначально известны: объем железорудного сырья (A_i), поступающего в адрес агломерационной фабрики от системы поставщиков, $i = \overline{1, m}$; объем сырья B_j , необходимый для формирования, заполнения определенного слоя в штабеле, $j = \overline{1, n}$; удельная стоимость транспортировки единицы груза в момент времени t — $C_{ij}(t)$. Период оптимизации выражен в форме дискретных тактов $[0, T]$, $T \in \{0, 1, 2, \dots\}$. Определяется план перевозок U_{ij} по которому функционал F примет минимальное значение.

На минимизацию функционала F накладывается ряд ограничений [2–5].

1. Динамика связей поставщиков и потребителей:

$$U_{ij}^+(t) = U_{ij}^-(t - t_{ij}); \quad (2)$$

$$U_{ij}^+(t + t_{ij}) = U_{ij}^-(t), \quad (3)$$

где $U_{ij}^+(t)$ — поставка от i -го поставщика, пришедшая в текущий момент времени t , к j -му потребителю; $U_{ij}^-(t)$ — поставка j -му потребителю, вышедшая от i -го поставщика в текущий момент времени t ; t_{ij} — длительность транспортировки от A_i к B_j .

2. Уравнение динамики запасов потребителей [2–5]

$$X_j^B(t + 1) = X_j^B(t) + \sum_{i=1}^m U_{ij}^+(t) - b_j(t), \quad (4)$$

где $b_j(t)$ — объем спроса потребителя j в момент времени t .

3. Уравнение баланса объемов отправляемого сырья, объемов спроса и объемов перевозок [2–5]

$$\sum_{t=0}^T \sum_{i=1}^m a_i(t) = \sum_{t=0}^T \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n U_{ij}(t) = \sum_{t=0}^T \sum_{j=1}^n b_j(t). \quad (5)$$

4. Ограничение естественной неотрицательности объемов поставляемой продукции и запасов [2–5]

$$U_{ij}(t) \geq 0; X_j^B(t) \geq 0.$$

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ДТЗЗ

Как отмечалось ранее, штабель сырья для производства агломерата представляет собой сложный, многокомпонентный пирог, соответственно в адрес агломерационной фабрики из других цехов и со станций примыкания приходит несколько видов сырья, которое является основой для производства упомянутой продукции.

Транспортирование части шихты осуществляется в соответствии с контактным графиком. Контактный график — это система организации внутривозовских перевозок в вагонах собственного парка, совокупный план поездной, грузовой

и маневровой работы, увязанный с производственным режимом функционирования цехов металлургического комбината. Графиком предусматривается закрепление перевозочных средств за устойчивыми грузопотоками предприятия [6]. Контактный график рассчитывается на суточный период. Оперативное планирование, контроль и управление этим процессом возлагаются на специально выделенного диспетчера, имеющего должностные полномочия на корректировку и адаптацию параметров по актуальным заявкам производства. Фрагмент исполненного контактного графика приведен в табл. 3.

Контактный график наряду с расписанием прибытия маршрутов с внешней сети служит основой для построения математической модели, определяя в ней параметры $a_i(t)$, формируя требования $b_j(t)$ и нормируя t_{ij} .

РЕШЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Для решения динамической транспортной задачи с задержками строится блочно-диагональная матрица стоимостей размерностью $mT \times nT$ (табл. 4) [2, 6–10], где m — число постав-

щиков; n — число потребителей; T — число тактов в периоде оптимизации; C_{ij} — стоимость перевозки единицы продукции от i -го поставщика к j -му потребителю; $C_{ij} + C_j^*(t) \cdot \Delta t^{XP}$ — стоимость доставки с учетом стоимости хранения товара (Δt^{XP} — количество тактов хранения); $C_{ij} + C_j^{**}(t) \cdot \Delta t^{OP}$ — стоимость доставки с учетом стоимости потерь производства из-за опоздания груза (Δt^{OP} — количество тактов опоздания). Величины Δt^{XP} и Δt^{OP} определяются на этапе построения матрицы стоимостей для всех условно свободных клеток с учетом возможного отклонения фактической корреспонденции от клетки с корреспонденцией «точно в срок» на каждый такт дискретизации времени в модели.

Задача решается с использованием оригинального авторского программного продукта [11].

Результаты решения плана-матрицы сведены в табл. 5.

Решение ДТЗЗ представляет собой оптимальный план перевозок от поставщиков к потребителям в виде расписания с анализом затрат по элементам функционала. Организаторам перевозочного процесса (диспетчерам по сырью управления

Таблица 3

Фрагмент контактного графика работы станции «Н» с железорудным сырьем

№ графика	Род груза	Род вагона	Место постановки	Оборот	Число вагонов		Прибытие		Продолжительность операции		Отправление	
					в обороте	в подаче	Время	№ поезда	Начало	Окончание	Время	№ поезда
15, 28–32	Коксовые отходы	ПВ	В/о	24	34	7–13	01:00	801	03:00	05:20	09:00	804
						8–21	14:30	807	16:30	18:30	20:40	812
5	Коксовые отходы	ПВ	В/о	24	36	5–18	02:00	701	03:30	05:00	10:00	720
5		ПВ	В/о			5–18	14:00	705	15:30	17:00	22:00	724
24	Аспирационная пыль	ПВ	В/о	48	2	1	14:30	807	16:30	18:30	20:40	812
24	Колошниковая пыль	ПВ	В/о	24	7	1–4	14:30	807	23:00	01:00	09:00	804
24		ПВ	В/о			3–7	01:00	801	03:00	05:20	09:00	804
50	Колошниковая пыль ДП-6, ДП-7	ПВ	В/о	48	9	1–6	14:00	705	23:00	01:00	10:00	720
50	Аспирационная пыль ДП-6, ДП-7	ПВ	В/о	24	12	5–12	02:00	701	03:30	05:00	10:00	720
23	Окалина	ПВ	В/о	24	4	4	17:05	1509	23:30	03:30	05:05	456
60	Окись железа	ПВ	В/о	48	2	1	17:05	1509	23:30	03:30	05:05	456
14	Окалина	ПВ	В/о	24	3	3	17:05	1509	21:00	23:00	02:20	1502
6	Щебень конвертерный	ПВ	В/о	24	12	6	04:15	1501	10:00	14:00	20:40	1506
						6	17:05	1509	21:00	23:00	02:20	1502
25	Известь	ПВ	Приемные бункеры	36	18	3–6	03:25	601	10:00	11:30	16:53	1304
						3–6	11:20	605	21:00	22:30	02:13	602
25	Отсев известняка	ПВ	В/о	36	6	2–4	03:25 11:20	601 605	13:00	14:30	16:53	1304
26	Известь	ХП ПВ	Приемные бункеры	24	26	9–13	00:25	725	02:00	04:00	10:00	720
						9–13	10:45	721	14:00	16:00	22:00	724
26	Отсев известняка	ПВ	В/о	24	12	3–6	00:25	725	03:00	04:30	10:00	720
						3–6	10:45	721	13:00	14:30	22:00	724

Примечание. В/о — вагонопрокидыватель.



транспортной логистики, диспетчерскому аппарату операторских компаний) он позволяет определять моменты несогласованного отправления поставок, недостающие и избыточные объемы поставок в различные моменты времени. Таким образом, появляется возможность организовать динамическое согласование поставок и заказов.

Полученное расписание может быть использовано в оперативном режиме в качестве диспетчерской «няни». Проведение циклов экспериментов с вариантами поставщиков и числом штабелей, их слоев позволяет обоснованно выбрать вид оптимальной инфраструктуры исследуемой системы. Экономическая оценка в процессе решения этих задач дает основание для определения внетранспортного экономического эффекта в основном производстве. Данный эффект проявляется в виде возможных результатов увеличения объемов производства и улучшения его качественных характеристик в зависимости от прилагаемых транспортом затрат и усилий.

ВЫВОДЫ

Изложенная методика безотносительно конкретного объекта исследования позволяет учитывать:

- время нахождения грузов в пути (транспортные задержки, транспортные опоздания);
 - динамику запасов у потребителя;
 - колебания спроса производства по объему и времени;
 - колебания производства по объему и времени;
 - изменения стоимости перевозок;
 - изменения стоимости хранения грузов в запасе у потребителя;
 - изменения стоимости ущербов потребителя во времени из-за опоздания и недопоставки груза.
- Кроме того, методика дает возможность:
- получать ответы на вопросы, кто, кому, сколько и когда должен отправить груз, чтобы минимизировать транспортно-складские издержки и возможные поте-

Принципы формирования матрицы удельных стоимостей ДТЗЗ

	$b_1 1(1)$	...	$b_1 5(1)$	...	$B_{29} 1(29)$	...	$B_{29} 5(29)$	
$a_1(0)$	$C_{11} + C_1^{**} \cdot \Delta t$	...	C_{11}	...	$C_{1(29)} + C_{29}^* \cdot \Delta t$	...	$C_{1(29)} + C_{29}^* \cdot \Delta t$	$A_1(0)$
...
$a_5(0)$	$C_{51} + C_1^{**} \cdot \Delta t$	...	C_{51}	...	$C_{5(29)} + C_{29}^* \cdot \Delta t$	...	$C_{5(29)} + C_{29}^* \cdot \Delta t$	$A_5(0)$
...
$a_1(29)$	$C_{11} + C_1^{**} \cdot \Delta t$	...	C_{11}	...	$C_{1(29)} + C_{29}^* \cdot \Delta t$	...	$C_{1(29)} + C_{29}^* \cdot \Delta t$	$A_1(29)$
...
$a_5(29)$	$C_{51} + C_1^{**} \cdot \Delta t$	...	C_{51}	...	$C_{5(29)} + C_{29}^* \cdot \Delta t$	...	$C_{5(29)} + C_{29}^* \cdot \Delta t$	$A_5(29)$

Таблица 4

Фрагмент оптимизированного плана перевозки продукции

Поставщик	Потребитель	Объем перевозок груза, ваг	Время отправления, такт	Время прибытия, такт	Транспортные задержки, такт	Время ожидания (опоздания), такт	Время хранения, такт	Стоимость перевозок общего объема материалов, руб.	Затраты производства из-за ожидания, руб.	Затраты на хранение, руб.	Общая стоимость перевозки продукции, руб.
...
A_1	B_1	64	1	2	1	-	-	617242	-	-	617242
...
A_1	B_6	64	2	6	4	-	-	617242	-	-	617242
...
A_1	B_9	49	2	9	7	1	-	357798	51338	-	409136
...
A_1	B_{28}	48	5	12	7	-	2	350496	-	19571	370067
...

Таблица 5

ри производства из-за опоздания и недопоставки грузов;

корректировать производственные программы поставщиков и потребителей в виде изменения времени и объемов отправления и предъявляемого спроса; сравнивать инфраструктурные изменения и различные варианты организации выгрузки.

В целом использование методики в оперативном управлении транспортно-

логистическими системами и в стратегическом менеджменте предприятия обеспечивает развитие цифровизации управленческой деятельности. Все итоговые результаты решения сводятся в таблицу оптимизированного плана перевозки продукции (см. табл. 5), которая содержит ответы на поставленные вопросы, дает максимальную визуализацию процесса перевозок и помогает вносить грамотные корректировки.

Литература

1. Попов А. Т., Сулова О. А., Воронкова Е. А. Оптимизация процесса выгрузки железорудного сырья на примере металлургического комбината // Мир транспорта. 2020. Т. 18. № 3. С. 148–162. ISSN 2073-7432.
2. Попов А. Т., Гнедаш М. А. Оптимизация транспортных потоков в системе «производство — транспорт — потребление»: монография. Липецк : ЛГТУ, 2006. 179 с.
3. Попов А. Т., Сулова О. А., Воронкова Е. А. Оптимизация взаимодействия агломерационного и доменного производства на основе динамической транспортной задачи с задержками // Вестник ЛГТУ. 2018. № 2 (36). С. 66–74. ISSN 2304-9235.
4. Phillips D. T., Garcia-Diaz A. Fundamentals of Network Analysis. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, 1981. 474 p. URL: https://books.google.ru/books/about/Fundamentals_of_network_analysis.html?id=w2FRAAAAMAAJ&redir_esc=y (дата обращения: 01.11.2022).
5. Козлов П. А. Теоретические основы, организационные формы, методы оптимизации гибкой технологии транспортного обслуживания заводов черной металлургии : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Липецк, 1988. 377 с.
6. Рахмангулов А. Н. Железнодорожные транспортно-технологические системы: организация функционирования : монография. Магнитогорск : МГТУ им. Г. И. Носова, 2014. 300 с.
7. Козлов П. А., Миловидов С. П., Попов А. Т. Организация работы технологического транспорта в промышленных системах // Экономика и математические методы. 1986. № 4 (22). С. 697–703. ISSN 2304-9235.
8. Козлов П. А., Владимирская И. П. Оптимизация взаимодействия поставщиков и потребителей при случайном разбросе в потреблении и времени доставки // Вестник РГУПС. 2009. № 2 (34). С. 66–70. ISSN 0201-727X.
9. Нестеров Е. П. Транспортные задачи линейного программирования. Москва : Транспорт, 1971. 216 с.
10. Канторович Л. В., Горстко А. Б. Математическое оптимальное программирование в экономике. Москва : Знание, 1968. 96 с.
11. Гнедаш М. А., Попов А. Т. Динамическая транспортная задача с задержками : свидетельство об отраслевой регистрации разработки № 5735. ЛГТУ, 21.02.2006.

References

1. Popov A. T., Suslova O. A., Voronkova E. A. Optimization of the Process of Unloading of Iron Ore Raw Materials: The Case of a Steel Plant [Optimizatsiya protsessa vygruzki zhelezorudnogo syr'ya na primere metallurgicheskogo kombinata] // World of Transport and Transportation. 2020. Vol. 18. No. 3. Pp. 148–162. ISSN 2073-7432.
2. Popov A. T., Gnedash M. A. Optimization of transport flows in the system «production — transport — consumption» [Optimizatsiya transportnykh potokov v sisteme «proizvodstvo — transport — potrebleniye»] : monograph. Lipetsk : LSTU, 2006. 179 p.
3. Popov A. T., Suslova O. A., Voronkova E. A. Optimization of interaction between agglomeration and blast-furnace production on the basis of a dynamic transport problem with delays [Optimizatsiya vzaimodeistviya aglomeratsionnogo i domennogo proizvodstva na osnove dinamicheskoy transportnoy zadachi s zaderzhkami] // Bulletin of Lipetsk State Technical University. 2018. No. 2 (36). Pp. 66–74. ISSN 2304-9235.
4. Phillips D. T., Garcia-Diaz A. Fundamentals of Network Analysis. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, 1981. 474 p. URL: https://books.google.ru/books/about/Fundamentals_of_network_analysis.html?id=w2FRAAAAMAAJ&redir_esc=y (access date: 01.11.2022).
5. Kozlov P. A. Theoretical basis, organizational forms, methods of optimization of flexible transport service methods at ferrous metallurgy plants [Teoreticheskie osnovy, organizatsionnye formy, metody optimizatsii gibkoy tekhnologii transportnogo obsluzhivaniya zavodov chernoy metallurgii] : DSc in Engineering Thesis. Lipetsk, 1986. 377 p.
6. Rakhmangulov A. N. Railway transport and technological systems: organization of functioning [Zheleznodorozhnye transportno-tekhnologicheskie sistemy: organizatsiya funktsionirovaniya] : monograph. Magnitogorsk : Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2014. 300 p.
7. Kozlov P. A., Milovidov S. P., Popov A. T. Organization of work of technological transport in industrial systems [Organizatsiya raboty tekhnologicheskogo transporta v promyshlennykh sistemakh] // Economics and Mathematical Methods. 1986. No. 4 (22). Pp. 697–703. ISSN 0424-7388.
8. Kozlov P. A., Vladimirskaia I. P. Optimization of provider-consumer interaction in event of random scatter in consumption and delivery time [Optimizatsiya vzaimodeistviya postavshhikov i potrebiteley pri sluchaynom razbrose v potreblenii i vremeni dostavki] // Vestnik RGUPS. 2009. No. 2 (34). Pp. 66–70. ISSN 0201-727X.
9. Nesterov E. P. Transport problems of linear programming [Transportnye zadachi lineynogo programmirovaniya]. Moscow : Transport, 1971. 216 p.
10. Kantorovich L. V., Gorstko A. B. Mathematical optimal programming in economics [Matematicheskoe optimal'noe programmirovanie v ekonomike]. Moscow : Knowledge, 1968. 96 p.
11. Gnedash M. A., Popov A. T. Dynamic transportation problem with delays [Dinamicheskaya transportnaya zadacha s zaderzhkami] : certificate of an industry registration of a program No. 5735. LSTU, 21.02.2006.

Объем статьи 0,6 авторских листа

УДК 656.029.6

Александр Григорьевич Матвеев, студент Санкт-Петербургского горного университета (СПГУ),
Санкт-Петербург, Россия,

Татьяна Анатольевна Менухова, кандидат технических наук, доцент кафедры транспортно-технологических процессов и машин Санкт-Петербургского горного университета (СПГУ), Санкт-Петербург, Россия

ПОВЫШЕНИЕ СОХРАННОСТИ ДОСТАВКИ ТАРНО-ШТУЧНОГО ГРУЗА: МОМЕНТ РИСКА И СПОСОБЫ СОКРАЩЕНИЯ РИСКА УТРАТЫ ГРУЗА ПРИ ДОСТАВКЕ

Alexander Grigoryevich Matveev, student, Saint Petersburg Mining University (SPMU), St. Petersburg, Russia,

Tatyana Anatolyevna Menukhova, PhD in Engineering, Associate Professor, Transport and Technological Processes and Machines Department, Saint Petersburg Mining University (SPMU), St. Petersburg, Russia

Increase of safety of palletized-piece cargo delivery: moment of risk and ways to decrease cargo loss risk at delivery

Аннотация

В статье проанализирована работа склада транспортной компании и предложены способы расчета потребности предприятия в транспортной таре с учетом сезонных колебаний спроса, разных объемов грузов и наличия побочных остатков продукции, требующие минимальных затрат.

Ключевые слова: транспортная тара, коробки, риск боя, остатки склада, безопасность, аналитический и математический методы прогнозирования.

Abstract

The paper analyses an operation of a transportation company warehouse and suggests ways to calculate requirements of company in master containers with the consideration for seasonal fluctuations of demand, various volumes of cargo and presence of side residue of cargo, which require minimum costs.

Keywords: master container, boxes, breakage risk, warehouse residue, safety, analytical and mathematical methods of forecasting.

DOI: 10.20291/1815-9400-2023-1-105-109

ВВЕДЕНИЕ

При перевозке и хранении грузов любое складское и транспортное предприятие нуждается в достаточном количестве транспортной тары. Нехватка последней тормозит работу предприятия, удлиняет время доставки грузов, создает угрозу порчи и/или утраты товара, причинения вреда здоровью работников. В конечном счете это приводит к дополнительным издержкам предприятия не только на этапе внутрискладской обработки, но и при перевозках.

Специфика продаж как B2B, так и B2C сопряжена с постоянно меняющимся спросом на тот или иной товар. Именно по этой причине невозможно предугадать или нормировать объем отгружаемой продукции по каждому заказу. В связи с ненормированным количеством stock keeping unit (единица складского учета, SKU) по каждому сборочному листу усложняется процесс комплектования груза в условиях дефицита транспортной тары (коробок), что в значительной степени замедляет работу. Вместе с тем возрастает утомляемость комплектовщика, повышается риск порчи товарно-материальных ценностей (ТМЦ), а целостность будущего пакета может оказаться под угрозой. Таким образом, ключевым моментом становится обеспечение сохранности груза во время всего процесса доставки в интересах как грузоотправителя, так и компаний, осуществляющих хранение и перевозку данного груза [1–3].

Например, при сборе SKU бутылок в количестве, не кратном числу мест в коробке/стяжке, комплектовщик вынужден за неимением пустых коробок освободить какую-либо другую транспортную тару от содержимого и использовать ее в сборке пакета. В свою очередь, это приводит к появлению отдельно стоящих бутылок в ячейках или около них, которые мешают свободно брать товар, повышая риск боя ТМЦ.

Подобная ситуация может повлиять даже на соседние ячейки и привести к еще более опасному положению товара в ячейке. Из-за свободно стоящих в соседних ячейках бутылок комплектовщик не может дотянуться до дальних рядов сверху и берет ближайšie

коробки снизу. При этом картонная подложка (разделитель слоев в штабеле коробок на паллете), которую невозможно убрать, начинает прогибаться из-за отсутствия опоры снизу.

Даже в случаях, когда бутылок может быть немного, сохраняется повышенный риск опрокидывания. Например, при использовании штабелера нижние опорные вилы часто немного смещают нижнюю паллету в ячейке. Если штабелерщик не заметит отдельно стоящую бутылку, это может привести к ее падению от толчка.

На основании вышеизложенного можно утверждать, что нехватка тары создает риски для компании, поэтому актуальность настоящего исследования определяется необходимостью выполнить анализ потребностей в транспортной таре, чтобы обеспечить ее достаточное количество.

Базой для исследования выбрано ООО «МАВТ-ТРАНС» (Челябинск), которое входит в группу компаний «МАВТ» — одного из крупнейших на Урале дистрибьюторов алкогольной продукции. На рынке ГК «МАВТ» работает с 1991 г. и включает в себя две розничных сети — «МАВТ-Винотека» в Челябинской области и «МАГНУМ-Винотека» в Екатеринбурге, а также компанию по организации оптовых поставок «МАВТ-Про» [4].

Специфика работы ГК «МАВТ» заключается в оперировании большим количеством хрупкой пакированной и непакетированной потребительской тары (бутылок), поэтому расчеты, приведенные ниже, основаны на том, что подобная тара не терпит деформаций и теряет свою целостность (разрушается). Используемая методика по расчету потребности в транспортной таре для увеличения сохранности груза может рассматриваться как универсальная при вводе поправочного коэффициента, показывающего долю утраты груза из-за транспортной тары. В расчетах этот коэффициент принят за единицу в связи с повышенной хрупкостью перевозимой продукции.

Для определения потребности в транспортной таре и снижения издержек предприятия при выполнении исследования были использованы эмпирический и теоретический подходы. Первый основан на непосредственном наблюдении за работой склада и учете фактического дефицита тары и боя продукции. Для теоретического подхода применялись математические методы, такие как расчет вероятности и математического ожидания боя. Основная часть вычислений выполнена в табличном редакторе MS Excel, в котором использовались некоторые надстройки, например Power Pivot и Power Query, с предварительным синтаксическим анализом на языке Python.

ЭМПИРИЧЕСКИЙ ПОДХОД К РЕШЕНИЮ ПРОБЛЕМЫ

Сбор заказов на складе происходит круглосуточно. В течение дневной смены комплектуется минимальное количество заказов (по сравнению с ночной сменой) и собираются пустые коробки, которые в дальнейшем используются комплектующими. Несмотря на кажущийся большой объем транспортной тары, этого количества хватает только на две смены (ночную и дневную).

Таким образом, основная причина боя — неоплошность сотрудников, а отсутствие в достаточном количестве коробок для размещения бутылок. Примерно из пяти случаев боя товара только один происходит по вине работника.

Компанией установлены издержки по бою — 0,2 % от входящего оборота (2,5 млрд руб. в год), что составляет приблизительно 5 млн руб. в год. Как показывает реальный опыт, четыре из пяти случаев, или 80 % боя, приходится на бой из-за отсутствия тары. Во избежание этой проблемы смоделируем ситуацию, когда денежный эквивалент по данным потерям компания могла бы тратить на коробки. Следовательно, можно выделить на приобретение коробок до 4 млн руб. в год. Главное условие — средства на приобретение коробок должны быть всегда меньше суммы, заранее выделяемой на бой, так как может оказаться невыгодно сохранять ТМЦ, прибегая к подобным затратам.

В 2021 г. было 247 рабочих дней. С учетом сезонности спроса ГК «МАВТ» привлекает своих сотрудников к сверхурочной работе. По данным табелей учета рабочего времени, суммарно за год на одного работника пришлось в среднем 288 рабочих дней, а дельта переработок от нормальной продолжительности рабочего времени в год составила 41 день.

Методом наблюдений было установлено, что за одни сутки расходуется примерно 320 коробок (без учета сезонности спроса). С учетом дельты переработок и коэффициента повышенного спроса (2,7) в год требуется примерно $247 \cdot 320 + 41 \cdot 320 \cdot 2,7 = 114\,464$ коробки.

Каждые вторые сутки получается собрать примерно 100 освободившихся коробок. Следовательно, за год (исходя из 288 рабочих смен) можно собрать 14 тыс. коробок. Если будут дополнительные пустые коробки (купленные), то, возможно, получится собрать даже больше, так как не возникнет острой необходимости опустошать занятые. Поэтому новых коробок понадобится только 100 464.

При бюджете в 4 млн руб. можно потратить на одну коробку до 34,95 руб. С учетом этого каждый год прирост составит примерно $288/2 \cdot 100 = 14\,400$ коробок (без учета сезонности), что поможет сэкономить 503 214,98 руб. при указанной цене за единицу.

Например, коробка с габаритами 380×228×287 мм на 8 бутылок из буро го картона Т-23С на рынке с учетом НДС стоит 24,8 руб., что в 1,409 раза меньше максимально возможной цены за коробку. Тем самым общая стоимость составит 2 838 707,2 руб., т.е. чистая экономия — 1 161 292,8 руб. [5, 6]. С учетом 1 млн руб., предварительно выделенного исключительно на бой (0,04 % от входящего оборота), суммарные затраты и на бой, и на коробки составят 0,15 %, что на 1 161 292,80 руб. меньше изначально заложенной цены. Может показаться, что приобретаемая выгода несоизмеримо мала по сравнению с вложенными средствами. Однако стоит заметить, что это не доход как таковой, а предотвращенные потери, следовательно, вместо того чтобы потерять $2\,838\,707,2 + 1\,161\,292,80 = 4$ млн руб., будет потрачено только 2 838 707,2 руб., т.е. сохранено 29,03 %. Соответственно подобное вложение для предприятия достаточно обоснованно. Более того, дополнительно появляется доход от реализации сохраненного товара. Также необходимо заметить, что так как в коробке можно размещать сразу 8 бутылок объемом 0,75 л, то общая потребность в коробках снизится, а значит, сократятся затраты на их приобретение (в настоящее время на складе используются преимущественно 6-местные коробки).



В последующем величина предотвращенного ущерба будет возрастать, поскольку не каждый год придется покупать такое количество коробок, как изначально, а только восполнять вышедшие из строя (при условии, что порожние коробки будут возвращаться на склад).

Если же брать в расчет дополнительное количество коробок (без учета сезонности, так как возрастающий остаток пустых коробок часто нивелируется повышенным последующим спросом, что неизбежно сглаживает среднее значение до обычного сбора дополнительных коробок, как это было показано выше), то при бюджете в 4 млн руб. можно потратить на одну коробку до 39,97 руб. (общее число коробок уменьшилось до 100 064 шт.).

Идентичная коробка, имеющая габариты 380×228×287 мм, с учетом НДС по-прежнему стоит 24,8 руб., что уже в 1,612 раза меньше максимально возможной цены для организации-перевозчика. Тогда общая стоимость необходимых коробок (100 064 шт.) составит 2 481 587,20 руб., а предотвращенный ущерб 4 000 000 – 2 481 587,20 = 1 518 412,80 руб. (экономия 37,96 %). Так как 1 млн руб. изначально заложен на бой бутылок по вине персонала (0,04 % от входящего оборота), то суммарная доля затрат на потери составит 0,139 %, что на 0,06 % меньше исходного уровня издержек по этой причине.

Дополнительно снизить расходы на приобретение коробок можно путем размещения заказа для магазинов ГК «МABT» с количеством каждого SKU, кратного количеству единиц в коробке. Это позволит формировать пакет только с целыми (нераспакованными) коробками, что приведет к сокращению времени не только сборки заказа комплектовщиком, но и проверки заказа кладовщиком, так как последний сможет идентифицировать товар не по бутылкам, а по коробкам.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К РЕШЕНИЮ ПРОБЛЕМЫ

В отличие от эмпирического, теоретический подход дает возможность строить более точный прогноз потребности тары, уменьшения боя и издержек компании. Для целей исследования взята информация по обороту товара на изучаемом складе за 2020 г.

В рамках данной работы рассматривается возможность снижения боя за счет приобретения дополнительных коробок. Сам по себе бой — событие не достоверное, а вероятное. Соответственно существует некоторая доля вероятности, с которой разобьется условная бутылка, причем для каждого SKU это значение будет своим. Для дальнейшего прогнозирования и добавления некоторого аппроксимирующего фактора используем математическое ожидание для SKU за годовой период рассматриваемой отчетности (табл. 1) [7]:

$$M(X) = \sum_{i=1}^n x_i \cdot p_i, \tag{1}$$

где x_i — некоторое случайное значение; p_i — соответствующая вероятность.

Имея математическое ожидание и вероятность боя, рассмотрим ежемесячно каждый SKU по остатку товара к количеству единиц в коробке. Назовем данный вид остатка бескоробочным (табл. 2).

Таблица 1

Пример расчетов математического ожидания боя

SKU	Математическое ожидание боя $M(X)$
ОакхартОриджиналНаОснРома (0,5 л)	0,0000601
ОакхартОриджиналНаОснРома (0,7 л)	Нет данных
Торрес5 СолераРезерва 38 % (0,5 л)	0,0000160
Торрес10 ГранРезерва 38 % (0,5 л)	Нет данных
Ханская (0,5 л)	0,0000164
БелугаХантингТравяной (0,5 л)	0,0001384
СэйлорДжерри пряный (0,7 л)	Нет данных
ДокторПерцеффНа мед.лимон (0,5 л)	0,0000495
TUNDRA AUTHENTIC ВодКрСев (0,5 л)	0,0000013

Таблица 2

Пример бескоробочного остатка, шт.

SKU	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь
Martini Bianco (0,5 л)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ЧинзаноБьянко вермут б.сл. (0,5 л)	10	6	1	7	11	6	5	1	0	0	5	2
Чинзано Россо кр.сл. 15 % (0,5 л)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Фаустино VII Виура б.сух. (0,75 л)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ЖПШенеМерло кр.п/с (0,75 л)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Гордонс сухой 47,3 % (0,375 л)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
МозтШандИмперБрют бел. п/сл. (0,75 л)	5	4	1	4	3	2	2	0	1	4	1	1

Знак «–» показывает отсутствие информации. Отсюда можно сделать вывод, что компания не ведет детальный учет по всем позициям. Также можно заметить, что выборки по табл. 1 и табл. 2 не соответствуют. Это сделано намеренно. Во-первых, сам анализ распространялся на тысячи позиций, а не только на те, которые указаны в таблицах, поэтому не представляется возможным показать весь объем обработанной информации. Во-вторых, здесь не делается никакого сравнения конкретно с вышеуказанными таблицами или с другими товарами вообще, а лишь приведены некоторые параметры, присущие каждому товару.

Полученный бескоробочный остаток, в отличие от товара, находящегося в коробках, подвержен риску боя. Поэтому именно к полученным значениям остатка применяем математическое ожидание и получаем потенциальный бой по каждому SKU в штучном измерении [8].

Стоит уточнить, что в зависимости от хрупкости товара коэффициент защиты тарой $k_{\text{ПГПТ}}$, показывающий долю возможных повреждений, приходящихся на тару, может быть разным. Например, для рассматриваемых бутылок он принимается равным 1, а для более прочного груза — менее 1. Этот коэффициент применяется следующим образом:

$$C_T = C_{\text{т.ед}} \cdot N_{\text{прогн}} \cdot k_{\text{ПГПТ}}, \quad (2)$$

где C_T — общие прогнозируемые затраты на тару, руб.; $C_{\text{т.ед}}$ — стоимость единицы рассматриваемой тары, руб.; $N_{\text{прогн}}$ — прогнозируемое потребное количество тары.

Количество вероятного боя умножаем на максимальную цену рассматриваемого товара на конец года. Использование максимальной цены обусловлено двумя факторами. Во-первых, могут остаться нераспроданные партии, пришедшие по другой цене. Во-вторых, мы используем распределенную вероятность в виде математического ожидания, поэтому максимальная цена за период покажет сумму боя на конец периода [9].

Для суммарного количества потенциального (вероятного) боя (320 973 бутылки) можно рассчитать требуемое количество коробок (табл. 3). Наиболее часто встречающийся вариант — 6 бутылок в коробке, однако коробка на 12 бутылок дает расширенные возможности для загрузки при незначительном увеличении стоимости самой коробки. С другой стороны, открытая коробка на 12 бутылок не обладает достаточной прочностью и весьма тяжелая для ручного перемещения, поэтому стоит обратить внимание на варианты коробок, рассчитанных на 6 или 8 бутылок.

Коробка с габаритами 380×228×287 мм на 8 бутылок из бумажного картона Т-23С будет стоить с НДС 24,8 руб. Для суммарного остатка в 320 973 бескоробочных бутылки потребуются около 40 128 коробок на 8 мест каждая, что будет соответствовать стоимости в 995 174,40 руб. Получается, что общая сумма на приобретение коробок составит 19,90 % от выделяемой компанией суммы на бой, или 0,04 % от входящего оборота.

Для сравнения: при эмпирическом подходе 0,04 % от оборота выделялось только на бой по вине сотрудников, которого нельзя избежать, а суммарные затраты с учетом приобретения коробок должны были составить 0,15 %. В таком случае было бы логично предположить, что и к полученным затратам на короб-

ки при теоретическом подходе необходимо прибавить величину неизбежных потерь по вине сотрудников. Однако стоит заметить, что по рассматриваемой методике мы сводили весь риск порчи материальных ценностей в область бескоробочного остатка, пребывающего в виде остатков на складе, т.е. единицы товара, не попадающие в формируемый пакет, именно реальное количество бутылок, оставшихся без коробки на складе. По этой причине данный метод расчетов дает нам окончательную величину расходов для снижения риска боя за счет приобретения коробок в сумме 995 174,40 руб. Так как на коробку ложатся все затраты по бою, а личная ответственность не входит в рассматриваемый процент от оборота, то в расчетах будем использовать 0,2 % входящего оборота (5 млн руб.). Тогда экономия составит $5\,000\,000 - 995\,174,40 = 4\,004\,825,6$ руб., а экономическая эффективность будет $4\,004\,825,6 / 995\,174,40 = 4,02$ руб. на каждый вложенный рубль в коробки.

Таблица 3

Сравнение потребности в коробках по месяцам, шт.

Месяц	Требуемое количество коробок		
	на 6 бутылок	на 8 бутылок	на 12 бутылок
Январь	4263	3198	2132
Февраль	4057	3043	2029
Март	4068	3051	2034
Апрель	4340	3255	2170
Май	4513	3385	2257
Июнь	4405	3304	2203
Июль	4432	3324	2216
Август	4421	3316	2211
Сентябрь	4700	3525	2350
Октябрь	4666	3500	2333
Ноябрь	4646	3484	2323
Декабрь	4991	3743	2496
Итого коробок в год	53502	40128	26754

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрены разные подходы к определению риска боя бутылок на складе организации-дистрибьютора, а также показана экономическая целесообразность снижения бескоробочного хранения товара.

Для компании самый простой путь предотвращения потенциального ущерба по причине боя бутылок — приобретение достаточного количества тары. Так, при эмпирическом подходе авторы исходили из того, что 80 % суммы, заложенной на случайный бой, — условный эквивалент боя из-за недостаточной организации работы с товаром на складе, вторым способом (теоретическим подходом) этот эквивалент был выведен не в денежном выражении, а в штучном (был рассчитан и в денежном выражении, когда остаток умножали на цену товара за конец отчетного периода, но это относится к сравнению потенциальных потерь товара и затрат на покупку коробок). Именно штучный эквивалент позволяет четко понять, сколько товара компания потеряет. Исходя из этого возможно рассчитать потребность в закупе коробок. Допущение, что

весь товар хранится в коробках (по нашему методу), сводит вероятность боя к нулю (не потому, что они действительно обеспечат 100 % сохранности товара, а потому что рассматриваемая причина боя — нехватка транспортной тары). Бой по вине сотрудников также возможен, но он расценивается как личная ответственность каждого работника, и компания в данном случае убытки не несет.

На основании примененных подходов показано, что за счет достаточного количества тары компания-дистрибьютор экономит от 29,0 до 80,0 % издержек, связанных с порчей товара по причине дефицита тары. Кроме того, сохраненный товар при реализации принесет дополнительный доход. Таким образом, затраты на приобретение дополнительной тары экономически обоснованы и выгодны.

Литература

1. Обзор судебной практики по спорам, связанным с договорами перевозки груза и транспортной экспедиции : утв. Президиумом Верховного Суда Российской Федерации 20.12.2017 г. URL: <https://legalacts.ru/sud/obzor-sudebnoi-praktiki-po-sporam-sviazannym-s-dogovorami-perevozki-gruza-i-transportnoi-ekspeditsii/> (дата обращения: 13.09.2022).
2. Менухова Т. А. Многокритериальная среда мультимодальных перевозок грузов // Современные образовательные технологии в подготовке специалистов для минерально-сырьевого комплекса : сборник научных трудов I Всероссийской научной конференции, Санкт-Петербург, 28 сентября 2017 г. Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский горный университет, 2017. С. 178–184.
3. Менухова Т. А. Повышение эффективности эксплуатации транспортных средств посредством планирования перевозок через единый центр // Транспортное планирование и моделирование : сборник трудов II Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 24–25 мая 2017 г. Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2017. С. 194–197.
4. Организация ООО «МАВТ-ТРАН». URL: <https://www.list-org.com/company/3289441> (дата обращения: 14.09.2022).
5. ГОСТ 9142–2014. Ящики из гофрированного картона. Общие технические условия. Москва : Стандартинформ, 2019. 28 с.
6. Картонные коробки. Четырехклапанные. URL: <https://tara174.ru/catalog/kartonnye-korobki> (дата обращения: 09.09.2021).
7. Числовые характеристики дискретных случайных величин. URL: http://edu.tltsu.ru/er/book_view.php?book_id=1cee&page_id=19502 (дата обращения: 07.09.2021).
8. Математические ожидания и дисперсии стандартных распределений величины. URL: <https://tvims.nsu.ru/chernova/tv/lec/node46.html> (дата обращения: 05.09.2021).
9. Математическое ожидание и дисперсия. URL: <https://uchebnik-online.net/book/521-statisticheskaya-obrabotka-rezultatov-uchebno-issledovatel'skoj-deyatelnosti-uchashhixsya-uchebno-posobie-melnikova-yub/21-212-matematicheskoe-ozhidanie-i-dispersiya.html> (дата обращения: 07.09.2021).

Объем статьи 0,6 авторских листа

References

1. Overview of judicial practice according to disputes connected with freight transportation and freight forwarding agreements [Obzor sudebnoy praktiki po sporam, svyazannym s dogovorami perezozki gruzov i transportnoy ekspeditsii] : approved by Presidium of the Supreme Court of the Russian Federation dated 20.12.2017. URL: <https://legalacts.ru/sud/obzor-sudebnoi-praktiki-po-sporam-sviazannym-s-dogovorami-perevozki-gruza-i-transportnoi-ekspeditsii/> (access date: 13.09.2022).
2. Menukhova T. A. Multicriterial environment of multimodal freight traffic [Mnogokriterial'naya sreda mul'timodal'nykh perezozok gruzov] // Modern education technologies in preparation of specialists for natural resources sector : collection of scientific papers of 1st All-Russian scientific conference, St. Petersburg, September 28, 2017. St. Petersburg : Saint Petersburg Mining University, 2017. Pp. 178–184.
3. Menukhova T. A. Increase of efficiency of vehicles operation by planning of transportation through a single centre [Povyshenie effektivnosti ekspluatatsii transportnykh sredstv posredstvom planirovaniya perezozok cherez edinyy tsentr] // Transport planning and modelling : proceedings of 2nd International research and practice conference, St. Petersburg, May 24–25, 2017. St. Petersburg : Saint Petersburg Mining University, 2017. Pp. 194–197.
4. «MAVT-TRANS» LLC [Organizatsiya OOO «MAVT-TRANS»]. URL: <https://www.list-org.com/company/3289441> (access date: 14.09.2022).
5. GOST 9142–2014. Boxes of corrugated board. General specifications [Yashhiki iz gofrirovannogo kartona. Obshhie tekhnicheskie usloviya]. Moscow : Standartinform, 2019. 28 p.
6. Cardboard boxes. Four-valve [Kartonnye korobki. Chetyrekhklapannye]. URL: <https://tara174.ru/catalog/kartonnye-korobki> (access date: 09.09.2021).
7. Numerical characteristics of discrete random variables [Chislovyie kharakteristiki diskretnykh sluchaynykh velichin]. URL: http://edu.tltsu.ru/er/book_view.php?book_id=1cee&page_id=19502 (access date: 07.09.2021).
8. Mathematical expectations and dispersions of standard value distributions [Matematicheskie ozhidaniya i dispersii standartnykh raspredeleniy velichiny]. URL: <https://tvims.nsu.ru/chernova/tv/lec/node46.html> (access date: 05.09.2021).
9. Mathematical expectation and dispersion [Matematicheskoe ozhidanie i dispersiya]. URL: <https://uchebnik-online.net/book/521-statisticheskaya-obrabotka-rezultatov-uchebno-issledovatel'skoj-deyatelnosti-uchashhixsya-uchebno-posobie-melnikova-yub/21-212-matematicheskoe-ozhidanie-i-dispersiya.html> (access date: 07.09.2021).

УДК 621.314.6:621.311.44

Андрей Николаевич Штин, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение транспорта» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,

Константин Геннадьевич Шумаков, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение транспорта» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,

Дмитрий Валентинович Лесников, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение транспорта» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,

Леонид Александрович Фролов, старший преподаватель кафедры «Электроснабжение транспорта» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия

ПРОЦЕССЫ КОММУТАЦИИ ВЕНТИЛЬНЫХ ТОКОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ВОЛЬТОДОБАВОЧНОГО УСТРОЙСТВА

Andrey Nikolaevich Shtin, PhD in Engineering, Associate Professor, Transport Power Supply Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,

Konstantin Gennadyevich Shumakov, PhD in Engineering, Associate Professor, Transport Power Supply Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,

Dmitriy Valentinovich Lesnikov, PhD in Engineering, Associate Professor, Transport Power Supply Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,

Leonid Alexandrovich Frolov, Senior Lecturer, Transport Power Supply Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia

Processes of commutation of rectifier currents of a semi-conductor booster

Аннотация

Обеспечение возрастающих размеров движения, особенно на участках постоянного тока, — одна из важнейших задач системы электроснабжения железной дороги. Для этой цели на тяговых подстанциях применяют различные способы и средства усиления электроснабжения, в том числе вольтодобавочные устройства, представляющие собой два параллельных тиристорных моста, зашунтированных диодами.

В статье рассмотрены три процесса коммутации вентильных токов, происходящих в вольтодобавочных устройствах: между двумя тиристорами, между шунтирующим диодом и тиристорами, а также между тиристорами и шунтирующим диодом. Представлено подробное математическое описание этих процессов. Получена общая формула для расчета всех трех углов коммутации, по которой выполнены расчеты. Достоверность полученных выражений подтверждена на физической модели.

Ключевые слова: вольтодобавочное устройство, коммутация, угол коммутации, угол регулирования, вентильный ток, шунтирующий диод.

Abstract

One of the main tasks of a railway power supply system is the provision of increased traffic volumes especially on direct current railway sections. For this reason the personnel of traction substations uses various means and methods of power supply strengthening including boosters representing two parallel thyristor bridges shunted by diodes.

The paper considers three processes of commutation of rectifier currents arising in boosters: between two thyristors, between a shunt diode and thyristors and between thyristors and a shunt diode. The paper presents a detailed mathematical description of these processes. As a result, the authors gained a general formula for calculation of all three angles of commutation, with the use of which the authors have carried out all calculations. Reliability of gained expressions is confirmed on a physical model.

Keywords: booster, commutation, commutation angle, regulation angle, rectifier current, shunt diode.

DOI: 10.20291/1815-9400-2023-1-110-115

В настоящее время на сети железных дорог для увеличения объема перевозимых грузов активно внедряется тяжеловесное движение. Пропуск поездов повышенной массы предъявляет особые требования к системе электроснабжения, в том числе необходимость усиления действующей системы электроснабжения [1–3]. Один из возможных и перспективных способов усиления — использование полупроводниковых вольтодобавочных устройств (ВДУ) [4, 5], внедрение которых на участках магистральных железных дорог уже ведется. Эти устройства представляют собой (рис. 1) регулируемый выпрямительный преобразователь, выполненный по 12-пульсовой схеме параллельного типа и включающий [4, 5] (рис. 1): преобразовательный трансформатор T с $S'_{1H} = 1,937$ МВА;

регулируемый выпрямитель, имеющий $U'_{dH} = 500$ В и $I'_{dH} = 3150$ А, с двумя параллельными тиристорными мостами UZY' и $UZ\Delta$;

два шунтирующих диода $V DY$ и $V D\Delta$, включенных параллельно тиристорным мостам.

На тяговой подстанции ВДУ включается последовательно с основным выпрямительным преобразователем (ОВП, см. рис. 1), который содержит преобразовательный трансформатор T и 12-пульсовый выпрямитель с $U_{dH} = 3300$ В и $I_{dH} = 3150$ А, состоящий из двух диодных мостов UZY , $UZ\Delta$.

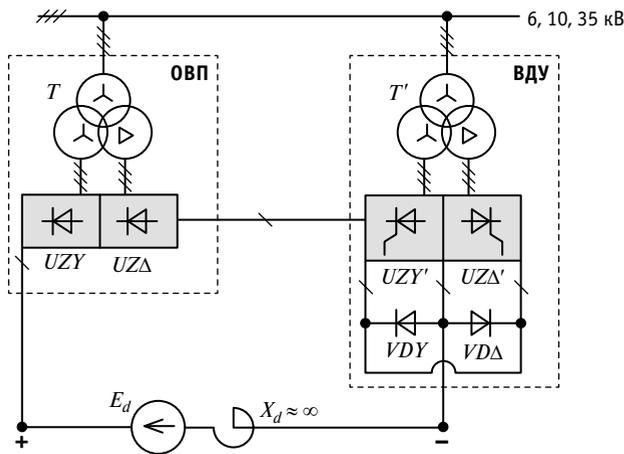


Рис. 1. Принципиальная схема соединения основного выпрямительного преобразователя и вольтодобавочного устройства

В [5] проанализированы основные режимы работы ОВП и ВДУ при условии, что индуктивное сопротивление питающей сети и преобразовательного трансформатора равно нулю. В данной работе рассмотрим процессы коммутации вентильных токов (КВТ), происходящие в ВДУ, на примере тиристорного моста UZY' с шунтирующим диодом VDY , подключенного к вентильной обмотке (ВО), соединенной в «звезду».

Как показано в [5], такой мост в зависимости от угла регулирования α может иметь два режима работы:

режим 1 — $0 \leq \alpha \leq \pi/3$, работают только тиристоры $VS1-VS6$ и VDY ;

В режиме 1 КВТ происходит между двумя тиристорами одной (катодной или анодной) группы тиристорного моста. На рис. 2а, б изображены схема и временные диаграммы работы ВДУ при переходе тока с $VS1$ на $VS3$. На рис. 2б показаны диаграммы линейных напряжений ВО (u'_2), тока управления (i'_G) и выпрямленного тока коммутирующих тиристоров (i'_d). Напряжение, под действием которого происходит коммутация (u'_{ba}), показано на рис. 2б заштрихованной фигурой.

Процессы КВТ, происходящие в тиристорном мосте, описаны в [6]. При этом выражения для определения токов коммутирующих тиристоров и угла коммутации имеют следующий вид:

$$i_{VS1} = I_d - i'_k = I_d - \frac{\sqrt{6} \cdot U'_{2\Phi}}{2 \cdot X'_\gamma} \cdot (\cos \alpha - \cos \theta);$$

$$i_{VS3} = i'_k = \frac{\sqrt{6} \cdot U'_{2\Phi}}{2 \cdot X'_\gamma} \cdot (\cos \alpha - \cos \theta); \quad (1)$$

$$\gamma' = \arccos \left(\cos \alpha - \frac{2 \cdot X'_\gamma}{\sqrt{6} \cdot U'_{2\Phi}} \right) - \alpha,$$

где i_{VS} — мгновенное значение тока тиристора ВДУ во время КВТ, А; i_d — среднее значение выпрямленного тока ВДУ, А; i'_k — мгновенное значение тока КЗ во время КВТ с тиристора на тиристор, А; $U'_{2\Phi}$ — действующее значение фазного

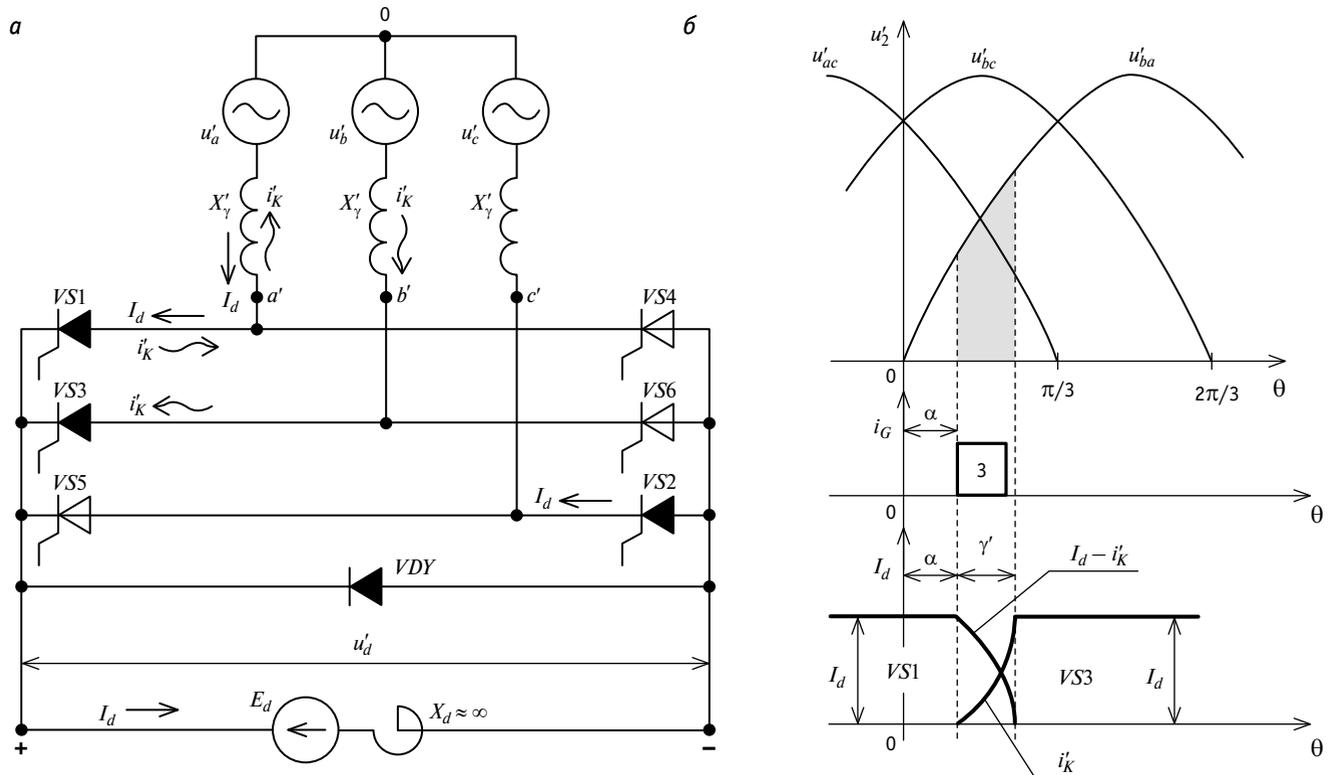


Рис. 2. Схема ВДУ (а) и диаграммы напряжений и токов (б) при коммутации тока с $VS1$ на $VS3$ в режиме 1

напряжения В0 трансформатора ВДУ, В; X'_γ — индуктивное сопротивление питающей сети и преобразовательного трансформатора, приведенное к напряжению В0 трансформатора ВДУ, Ом; γ' — угол коммутации при переходе тока с тиристора на тиристор, эл. град.

При $\pi/3 < \alpha \leq 2\pi/3$ (режим 2) в схеме вначале работает шунтирующий диод, а потом два тиристора — один в катодной, а другой в анодной группе. Поэтому здесь происходят два процесса КВТ:

- 1) переход тока с шунтирующего диода на тиристоры;
- 2) переход тока с тиристоров на шунтирующий диод.

На рис. 3 показан первый из них — переход тока с диода VDY' на тиристоры $VS2$ и $VS3$.

На интервале от $0 < \theta < \alpha$ выпрямленный ток проводит диод VDY' (рис. 3б, диаграмма i_d).

В момент $\theta = \alpha$ подаются импульсы управления на $VS3$ и $VS2$ (диаграмма i_G). Они открываются, и между фазами b и c через диод VDY , проводящий ток I_d происходит двухфазное короткое замыкание (КЗ) (рис. 3а), причем ток КЗ i'_{K1} направлен от фазы с большим (u'_b) к фазе с меньшим (u'_c) потенциалом. Для этого контура составим уравнение по второму закону Кирхгофа, начиная от точки 0 по направлению тока КЗ i'_{K1} :

$$u'_b - X'_\gamma \cdot \frac{\partial i'_{K1}}{\partial \theta} - X'_\gamma \cdot \frac{\partial i'_{K1}}{\partial \theta} - u'_c = 0 \Rightarrow 2 \cdot X'_\gamma \cdot \frac{\partial i'_{K1}}{\partial \theta} = u'_{bc}, \quad (2)$$

где i'_{K1} — мгновенное значение тока двухфазного КЗ при КВТ с шунтирующего диода на тиристоры, А.

Из выражения (2) следует, что коммутация тока с диода VDY на тиристоры $VS2$ и $VS3$ происходит под действием линейного напряжения В0 u'_{bc} , которое показано на рис. 3б заштрихованной фигурой.

Учитывая положение оси ординат на рис. 3б, запишем

$$\frac{\partial i'_{K1}}{\partial \theta} = \frac{\sqrt{6} \cdot U'_{2\Phi} \cdot \sin\left(\theta + \frac{\pi}{3}\right)}{2 \cdot X'_\gamma}. \quad (3)$$

Проинтегрировав обе части равенства (3), получим

$$i'_{K1} = C - \frac{\sqrt{6} \cdot U'_{2\Phi}}{2 \cdot X'_\gamma} \cdot \cos\left(\theta + \frac{\pi}{3}\right), \quad (4)$$

где C — постоянная интегрирования, А.

Из рис. 3б следует, что коммутация начинается в момент $\theta = \alpha$. При этом ток $i'_{K1} = 0$. Тогда

$$C = \frac{\sqrt{6} \cdot U'_{2\Phi}}{2 \cdot X'_\gamma} \cdot \cos\left(\alpha + \frac{\pi}{3}\right). \quad (5)$$

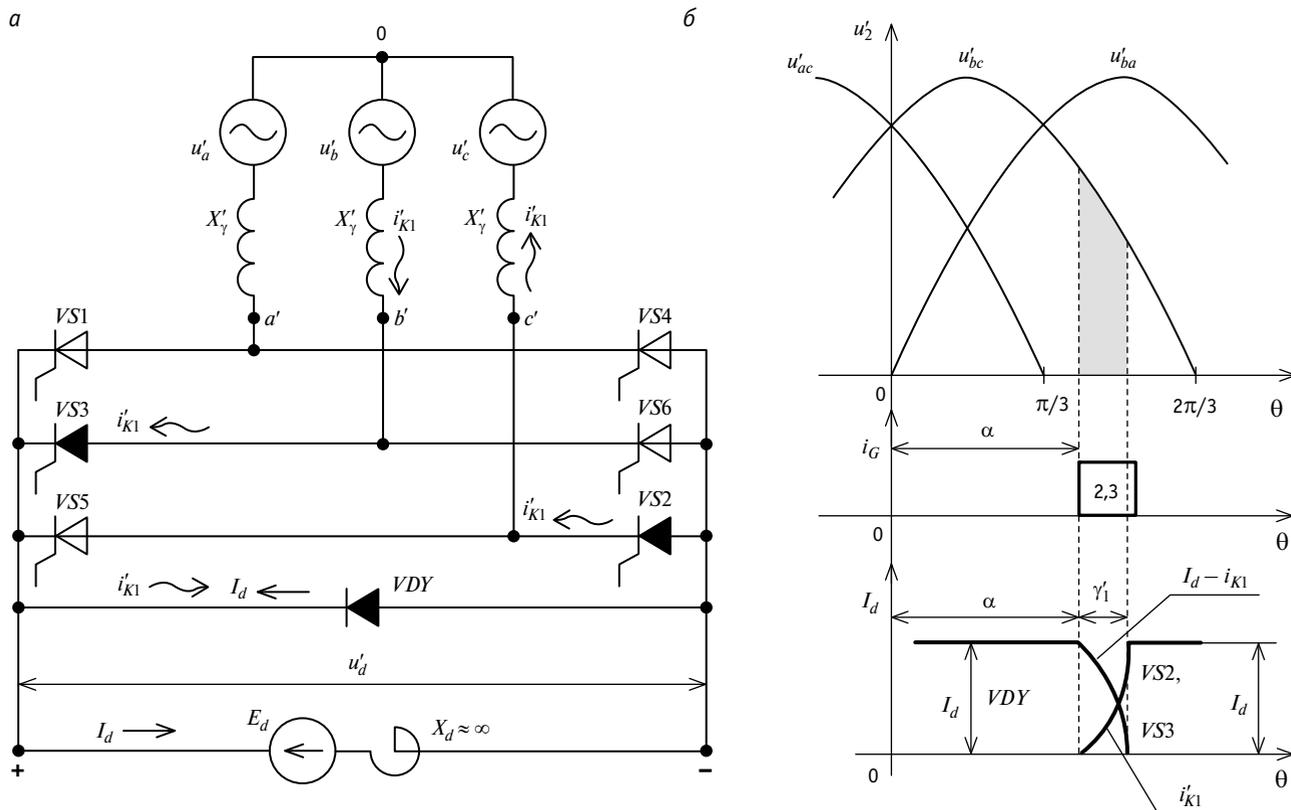


Рис. 3. Схема ВДУ (а) и диаграммы напряжений и токов (б) при коммутации тока с VDY' на $VS2$ и $VS3$ в режиме 2 работы ВДУ

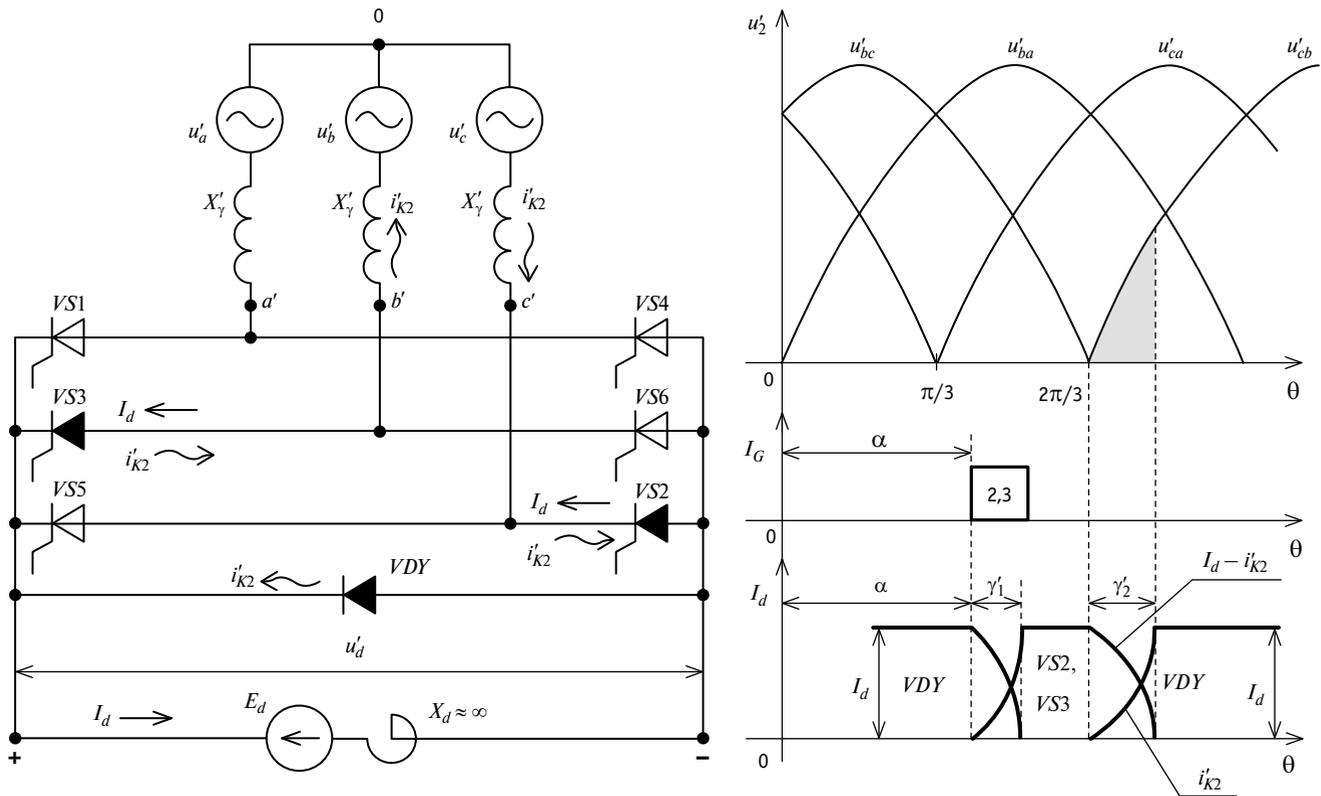


Рис. 4. Схема ВДУ (а) и диаграммы напряжений и токов (б) при коммутации тока с VS2 и VS3 на VDY в режиме 2 работы ВДУ

Подставляя (5) в (4), получим

$$i'_{k1} = \frac{\sqrt{6} \cdot U'_{2\Phi}}{2 \cdot X'_\gamma} \cdot \cos\left(\alpha + \frac{\pi}{3}\right) - \frac{\sqrt{6} \cdot U'_{2\Phi}}{2 \cdot X'_\gamma} \cdot \cos\left(\theta + \frac{\pi}{3}\right) = \frac{\sqrt{6} \cdot U'_{2\Phi}}{2 \cdot X'_\gamma} \cdot \left[\cos\left(\alpha + \frac{\pi}{3}\right) - \cos\left(\theta + \frac{\pi}{3}\right) \right]. \quad (6)$$

Процесс коммутации закончится в момент $\theta = \alpha + \gamma'_1$, когда $i'_{k1} = I_d$ (диаграмма i_d на рис. 3б). Подставив эти равенства в (6), получим окончательные выражения для определения токов коммутирующих вентилей и угла коммутации при переходе тока с шунтирующего диода на тиристоры в режиме 2 работы ВДУ:

$$i_{VDY} = I_d - i'_{k1} = I_d - \frac{\sqrt{6} \cdot U'_{2\Phi}}{2 \cdot X'_\gamma} \cdot \left[\cos\left(\alpha + \frac{\pi}{3}\right) - \cos\left(\theta + \frac{\pi}{3}\right) \right];$$

$$i_{VS2,3} = i'_{k1} = \frac{\sqrt{6} \cdot U'_{2\Phi}}{2 \cdot X'_\gamma} \cdot \left[\cos\left(\alpha + \frac{\pi}{3}\right) - \cos\left(\theta + \frac{\pi}{3}\right) \right]; \quad (7)$$

$$\gamma'_1 = \arccos \left[\cos\left(\alpha + \frac{\pi}{3}\right) - \frac{2 \cdot X'_\gamma \cdot I_d}{\sqrt{6} \cdot U'_{2\Phi}} \right] - \left(\alpha + \frac{\pi}{3} \right),$$

где i_{VDY} — мгновенное значение тока шунтирующего диода при КВТ с диода на тиристоры, А; γ'_1 — угол коммутации при переходе тока с диода на тиристоры, эл. град.

Рассмотрим второй процесс КВТ в режиме 2 работы ВДУ — при переходе тока с тиристоров VS2 и VS3 на диод VDY (рис. 4).

На интервале от $\alpha + \gamma'_1 < \theta < 2\pi/3$ выпрямленный ток проводят тиристоры VS2 и VS3 (диаграмма i_d на рис. 4б).

В момент $\theta = 2\pi/3$ напряжение u'_{cb} становится положительным (диаграмма u'_2 на рис. 4б). Под действием этого напряжения открывается шунтирующий диод VDY, и между фазами c и b происходит двухфазное КЗ (рис. 4а), причем ток КЗ i'_{k2} направлен от фазы с большим (u'_c) к фазе с меньшим (u'_b) потенциалом. Для этого контура составим уравнение по второму закону Кирхгофа, начиная от т. 0 по направлению тока КЗ i'_{k2} :

$$u'_c - X'_\gamma \cdot \frac{\partial i'_{k2}}{\partial \theta} - X'_\gamma \cdot \frac{\partial i'_{k2}}{\partial \theta} - u'_b = 0 \Rightarrow 2 \cdot X'_\gamma \cdot \frac{\partial i'_{k2}}{\partial \theta} = u'_{cb}, \quad (8)$$

где i'_{k2} — мгновенное значение тока двухфазного КЗ при КВТ с тиристоров на шунтирующий диод, А.

Из выражения (8) следует, что коммутация тока с тиристоров VS2 и VS3 на диод VDY происходит под действием линейного напряжения ВО u'_{cb} , которое показано на рис. 4б заштрихованной фигурой.

Учитывая положение оси ординат на рис. 4б, запишем

$$\frac{\partial i'_{k2}}{\partial \theta} = - \frac{\sqrt{6} \cdot U'_{2\Phi} \cdot \sin\left(\theta + \frac{\pi}{3}\right)}{2 \cdot X'_\gamma}.$$

Проинтегрировав обе части последнего равенства, получим

$$i'_{K2} = C + \frac{\sqrt{6} \cdot U'_{2\Phi}}{2 \cdot X'_\gamma} \cdot \cos\left(\theta + \frac{\pi}{3}\right), \quad (9)$$

где C — постоянная интегрирования.

Из рис. 4б следует, что коммутация начинается в момент $\theta = 2\pi/3$, когда ток $i'_{K2} = 0$. Поэтому

$$C = -\frac{\sqrt{6} \cdot U'_{2\Phi}}{2 \cdot X'_\gamma} \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{3} + \frac{\pi}{3}\right) = \frac{\sqrt{6} \cdot U'_{2\Phi}}{2 \cdot X'_\gamma}.$$

Подставляя это значение в (9), получим

$$\begin{aligned} i'_{K2} &= \frac{\sqrt{6} \cdot U'_{2\Phi}}{2 \cdot X'_\gamma} + \frac{\sqrt{6} \cdot U'_{2\Phi}}{2 \cdot X'_\gamma} \cdot \cos\left(\theta + \frac{\pi}{3}\right) = \\ &= \frac{\sqrt{6} \cdot U'_{2\Phi}}{2 \cdot X'_\gamma} \cdot \left[1 + \cos\left(\theta + \frac{\pi}{3}\right)\right]. \end{aligned} \quad (10)$$

Процесс коммутации закончится в момент $\theta = 2\pi/3 + \gamma'_2$, когда $i'_{K2} = I_d$ (диаграмма i_d на рис. 4б). Подставив эти равенства в (10), получим окончательные выражения для определения токов коммутирующих вентилей и угла коммутации при переходе тока с шунтирующего диода на тиристоры в режиме 2 работы ВДУ:

$$\begin{aligned} i_{VS2,3} &= I_d - i'_{K2} = I_d - \frac{\sqrt{6} \cdot U'_{2\Phi}}{2 \cdot X'_\gamma} \cdot \left[1 + \cos\left(\theta + \frac{\pi}{3}\right)\right]; \\ i_{VDY} &= i'_{K2} = \frac{\sqrt{6} \cdot U'_{2\Phi}}{2 \cdot X'_\gamma} \cdot \left[1 + \cos\left(\theta + \frac{\pi}{3}\right)\right]; \\ \gamma'_2 &= \arccos\left[1 - \frac{2 \cdot X'_\gamma \cdot I_d}{\sqrt{6} \cdot U'_{2\Phi}}\right], \end{aligned} \quad (11)$$

где γ'_2 — угол коммутации при переходе тока с тиристоров на диод, эл. град.

Чтобы обобщить формулы для 6- и 12-пульсовых преобразователей, рассмотрим в выражениях (1), (7), (11) слагаемое

$$\frac{2 \cdot X'_\gamma \cdot I_d}{\sqrt{6} \cdot U'_{2\Phi}}. \quad (12)$$

Индуктивное сопротивление питающей сети и преобразовательного трансформатора, приведенное к напряжению ВО трансформатора ВДУ, в формулах (1), (7), (11) можно найти при помощи следующего выражения [6]:

$$X'_\gamma = \frac{3 \cdot U'^2_{2\Phi}}{S'_{IH}} \cdot \frac{u'_{K\Sigma}, \%}{100}, \quad (13)$$

где $u'_{K\Sigma}, \% = u'_{KC}, \% + u'_{KT}, \%$ — суммарное напряжение КЗ питающей сети и преобразовательного трансформатора ВДУ;

S'_{IH} — номинальная мощность сетевой обмотки преобразовательного трансформатора ВДУ, кВА.

Напряжение КЗ питающей сети можно найти по известной формуле [6]

$$u'_{KC}, \% = \frac{S'_{IH}}{S_{K1}} \cdot 100 \%,$$

где S_{K1} — мощность КЗ на шинах сетевой обмотки преобразовательного трансформатора ВДУ, кВА.

Выпрямленный ток можно записать как

$$I_d = k'_3 \cdot I'_{dH}, \quad (14)$$

где k'_3, I'_{dH} — соответственно коэффициент загрузки и номинальный выпрямленный ток ВДУ.

Подставим выражения (13) и (14) в слагаемое (12)

$$\frac{2 \cdot 3 \cdot U'_{2\Phi} \cdot k'_3 \cdot I'_{dH}}{\sqrt{6} \cdot U'_{2\Phi} \cdot S'_{IH}} \cdot \frac{u'_{K\Sigma}, \%}{100}. \quad (15)$$

Обозначим:

$$A = \frac{3 \cdot U'_{2\Phi} \cdot I'_{dH}}{\sqrt{6} \cdot S'_{IH}}; \quad (16)$$

$$k_{U2} = \frac{U'_{2\Phi}}{U'_{d0}}; \quad k_{S1} = \frac{S'_{IH}}{P'_{d0}}, \quad (17)$$

где U'_{d0} — выпрямленное напряжение холостого хода ВДУ, В; $P'_{d0} = U'_{d0} \cdot I'_{d0}$ — условная мощность ВДУ, кВт.

Подставляя выражения (17) в (16), получим

$$A = \frac{3 \cdot k_{U2} \cdot U'_{d0} \cdot I'_{dH}}{\sqrt{6} \cdot k_{S1} \cdot P'_{d0}} = \frac{3 \cdot k_{U2}}{\sqrt{6} \cdot k_{S1}}. \quad (18)$$

Величина A , определяемая по (18), носит название «коэффициент наклона внешней характеристики».

Для 6-пульсовой мостовой схемы выпрямления [6]:

$$k_{U2} = \frac{\pi}{3\sqrt{6}}; \quad k_{S1} = \frac{\pi}{3}; \quad A_6 = \frac{3 \cdot \pi \cdot 3}{\sqrt{6} \cdot 3\sqrt{6} \cdot \pi} = 0,5. \quad (19)$$

Для 12-пульсовой схемы выпрямления [6]:

$$\begin{aligned} k_{U2} &= \frac{\pi}{6\sqrt{6}}; \quad k_{S1} = \frac{\pi}{6} \cdot \sqrt{2 + \sqrt{3}}; \\ A_{12} &= \frac{3 \cdot \pi \cdot 6}{\sqrt{6} \cdot 6\sqrt{6} \cdot \pi \cdot \sqrt{2 + \sqrt{3}}} = 0,2588. \end{aligned} \quad (20)$$

Таким образом, выражения (1), (7), (11) можно обобщить для 6- и 12-пульсовых преобразователей следующим образом:

$$\gamma'_j = \arccos\left(\cos\varphi_j - 2 \cdot A \cdot k'_3 \cdot \frac{u'_{K\Sigma}, \%}{100}\right) - \varphi_j, \quad (21)$$

где φ_j — угол, определяемый по табл. 1, эл. град.

Таблица 1

Значения угла φ_j в выражении (21), эл. град.

Диапазон изменения α в ВДУ	Процесс КВТ	φ_j
$0 \leq \alpha \leq \pi/3$	С тиристора на тиристор	α
$\pi/3 < \alpha \leq 2\pi/3$	С диода на тиристоры	$\alpha + \pi/3$
$\pi/3 < \alpha \leq 2\pi/3$	С тиристоров на диод	0

По выражению (21) выполнены расчеты углов коммутации γ' , γ'_1 , γ'_2 , которые представлены в виде графиков на рис. 5. Расчеты произведены для 12-пульсового ВДУ при значениях $u_{k\Sigma} = 17\%$ и $k'_3 = 0,25$.

Достоверность полученных расчетных формул подтверждена на физической модели мощностью 30 кВА. Были сделаны замеры углов коммутации (21) при нагрузке, соответствующей углу коммутации ВДУ при $\alpha = 0$. Полученные экспериментальные данные и их сравнение с расчетными приведены в табл. 2.

Таблица 2

Расчитанные по выражению (21) и экспериментальные значения углов коммутации ВДУ

Угол коммутации	Расчет	Эксперимент
γ' при $\alpha = 30^\circ$	2,43	2,5
γ'_1 при $\alpha = 90^\circ$	2,63	3
γ'_2	12	12

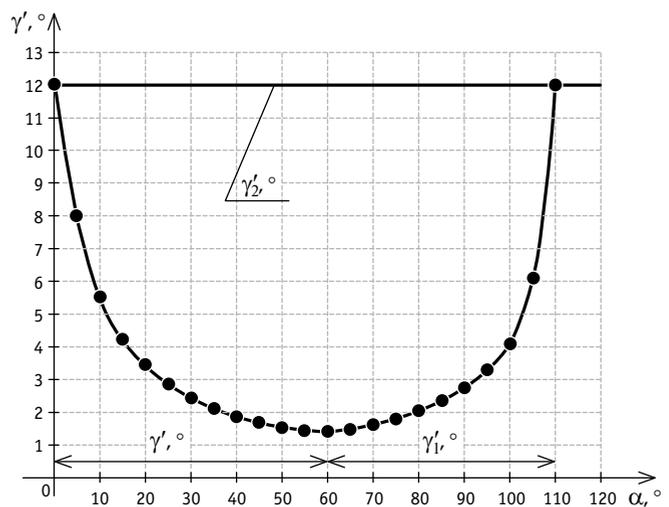


Рис. 5. Зависимости углов коммутации ВДУ в функции от угла регулирования при постоянной нагрузке

ВЫВОДЫ

1. Для тиристорного моста с шунтирующим диодом рассмотрены процессы и получены формулы для расчета токов и углов при коммутации вентильных токов:

- с тиристоров на тиристоры одной группы;
- с шунтирующего диода на тиристоры;
- с тиристоров на шунтирующие диоды.

2. Выполнены расчеты углов коммутации 12-пульсового ВДУ для рассмотренных процессов при постоянной нагрузке в зависимости от угла регулирования.

3. Теоретические выкладки подтверждены экспериментальными исследованиями.

Литература

- Исследование методов усиления тяговой сети постоянного тока / Д. Н. Дураков, М. И. Куштан, В. В. Лобынцев, Г. В. Дожина // Электроника и электрооборудование транспорта. 2019. № 2. С. 26–29. ISSN 1812-6782.
- Закарукин В. П., Крюков А. В., Алексеенко В. А. Эффективность применения вольтодобавочных устройств в электротяговых сетях // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. 2013. Т. 2. С. 108–112.
- Бебрис А. Н., Мохов А. А., Штин А. Н. Усиление тяговой сети постоянного тока при помощи управляемых тиристорных преобразователей // Наука и образование транспорту. 2019. № 1. С. 356–359.
- НИИЭФА-ЭНЕРГО. URL: <http://www.nfenergo.ru/content/files/catalog1/Katalog2162020.pdf> (дата обращения: 05.12.2022).
- Режимы работы полупроводникового вольтодобавочного устройства для регулирования напряжения на тяговых подстанциях / А. С. Низов, А. Н. Штин, К. Г. Шумаков, Д. В. Лесников // Инновационный транспорт. 2022. № 4 (46). С. 58–64. DOI: 10.20291/2311-164X-2022-4-58-64. ISSN 2311-164X.
- Бурков А. Т. Электроника и преобразовательная техника. Т. 2. Москва : УМЦ ЖДТ, 2015. 307 с.

References

- Investigation of the dc traction power supply strengthening methods [Issledovanie metodov usileniya tyagovoy seti postoyannogo toka] / D. N. Durakov, M. I. Kushtan, V. V. Lobyntsev, G. V. Dozhina // Electronics and electrical equipment of transport. 2019. No. 2. Pp. 26–29. ISSN 1812-6782.
- Zakaryukin V. P., Kryukov A. V., Alexeenko V. A. Efficiency of boosters application in power traction networks [Effektivnost' primeneniya vol'todobavochnykh ustroystv v elektrodyagovykh setyakh] // Transport infrastructure of the Siberian Region. 2013. Vol. 2. Pp. 108–112.
- Bebris A. N., Mokhov A. A., Shtin A. N. Improvement of direct current power traction network with the use of controlled thyristor converters [Usilenie tyagovoy seti postoyannogo toka pri pomoshhi upravlyaemykh tiristornykh preobrazovateley] // Science and education for transport. 2019. No. 1. Pp. 356–359.
- NIIEFA-ENERGO [NIIEFA-ENERGO]. URL: <http://www.nfenergo.ru/content/files/catalog1/Katalog2162020.pdf> (access date: 05.12.2022).
- Operation modes of a semiconductor voltage-boosting device for voltage regulation at traction substations [Rezhimy raboty poluprovodnikovogo vol'todobavochnogo ustroystva dlya regulirovaniya napryazheniya na tyagovykh podstantsiyakh] / A. S. Nizov, A. N. Shtin, K. G. Shumakov, D. V. Lesnikov // Innotrans. 2022. No. 4 (46). Pp. 58–64. DOI: 10.20291/2311-164X-2022-4-58-64. ISSN 2311-164X.
- Burkov A. T. Electronics and converter equipment [Elektronika i preobrazovatel'naya tekhnika]. Vol. 2. Moscow : UMTs ZhDT, 2015. 307 p.

УДК 629.423.3

Алексей Анатольевич Ковалев, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение транспорта» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,

Александр Владимирович Андрюков, ассистент кафедры «Электроснабжение транспорта» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ СТРЕЛ ПРОВЕСА КОНТАКТНОГО ПРОВОДА НА ВОЗМОЖНОСТЬ ПОВЫШЕНИЯ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ НА УЧАСТКЕ КОНТАКТНОЙ СЕТИ ЕКАТЕРИНБУРГ — ЧЕЛЯБИНСК

Alexey Anatolyevich Kovalev, PhD in Engineering, Associate Professor, Transport Power Supply Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,

Alexander Vladimirovich Andryukov, Assistant Lecturer, Transport Power Supply Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia

Assessment of influence of contact wire sag on possibility of increase of driving speed on the Ekaterinburg — Chelyabinsk catenary section

Аннотация

Приведены результаты сравнения механического расчета анкерного участка контактной сети Екатеринбург — Челябинск для трех компенсированных контактных подвесок. Рассчитаны стрелы провеса контактных проводов, построены монтажные таблицы и графики для каждого климатического района трассы Екатеринбург — Челябинск, что позволит сделать верные выводы о повышении скоростей движения на этом участке.

Ключевые слова: скорость движения, контактный провод, стрела провеса, климатический район, трасса Екатеринбург — Челябинск.

Abstract

The paper presents results of comparison of mechanical calculation of the Ekaterinburg — Chelyabinsk tension catenary section for three compensated catenary suspensions. The authors have calculated catenary wire sags and created wire lists and diagrams for each climatic region for the Ekaterinburg — Chelyabinsk line, which will allow making correct conclusions on increase of driving speed on this section.

Keywords: driving speed, contact wire, sag, climatic region, Ekaterinburg — Chelyabinsk railway line.

DOI: 10.20291/1815-9400-2023-1-116-119

Отсутствие резерва при эксплуатации контактной сети, на которую оказывают воздействие внешние факторы (максимальные и минимальные температуры, гололедообразование и т.д.), приводит к необходимости выполнения множества требований, направленных на поддержание ее безаварийной работы. Одно из основных таких требований — обеспечение бесперебойного токосъема при различных климатических условиях (образование льда, сильный ветер и др.). При повышении температуры стрелы провеса увеличиваются, а натяжение несущего троса в компенсированной контактной подвеске остается неизменным независимо от температуры [1].

Стрела провеса, которая влияет на безопасность, надежность и качество токосъема, проявляется не только при повышении температуры окружающей среды летом, но и при образовании гололеда на проводах контактной подвески зимой. В результате этого качество токосъема снижается, а износ контактных проводов растет [2–4].

Чтобы снизить влияние температуры на увеличение стрел провеса, применяют специально разработанные компенсационные устройства, при этом значение натяжения сохраняется независимо от температуры окружающей среды [5]. Однако проблема увеличения стрел провеса при образовании гололеда на проводах контактной подвески в настоящее время решена не в полном объеме.

Для оценки влияния стрел провеса контактных проводов на качество токосъема и на возможность повышения скорости движения поездов авторами выполнен расчет на участке контактной сети Екатеринбург — Челябинск. Трасса Екатеринбург — Челябинск включает три выделенных климатических района: IIa, IIб и III [6].

Результат расчетов монтажных таблиц и монтажных кривых представляет собой зависимость стрел провеса в пролете от температуры окружающей среды (в диапазоне от минимальной t_{\min} до максимальной t_{\max}). Расчет монтажных стрел провеса проводов выполнен для всех пролетов участков контактной сети.

В настоящее время на главных путях Свердловской и Южно-Уральской железных дорог широко применяются контактные подвески Бр-120+2МФ-100+2А-185, М-95+2НЛФ-100+2А-185 и М-120+2МФ-100+2А-185. Рассмотрев эти подвески, авторы определили, как стрела провеса влияет на движение поездов при различных видах подвески.

Стрела провеса контактного провода при температурах t_i в реальных пролетах рассчитывается по формуле

$$f_{xi} = \varphi_{xi} \cdot (F_{xi} - F_{0i}), \quad (1)$$

где f_{xi} — стрела провеса контактного провода, м; φ_{xi} — конструктивный коэффициент цепной подвески; F_{xi} — стрела провеса несущего троса, м; F_{0i} — стрела провеса несущего троса при беспровесном положении провода, м.

По результатам расчетов построены зависимости $F_{xi}(t_x)$ и $f_{xi}(t_x)$.

1. Данные расчета для контактной подвески Бр-120+2МФ-100+2А-185 (климатический район III, $t_{\min} = -10$ °С, $t_{\max} = 37$ °С, температура беспровесного состояния контактного провода $t_0 = -5$ °С) приведены в табл. 1.

Зависимости стрел провеса контактного провода МФ-100 для контактной подвески Бр-120+2МФ-100+2А-185 представлены на рис. 1.

2. Данные расчета для контактной подвески М-120+2МФ-100+2А-185 (климатический район IIб, $t_{\min} = -24$ °С, $t_{\max} = 36$ °С, температура беспровесного состояния контактного провода $t_0 = -10$ °С) представлены в табл. 2.

Зависимости стрел провеса контактного провода МФ-100 для контактной подвески М-120+2МФ-100+2А-185 показаны на рис. 2.

3. Данные расчета для контактной подвески М-95+2НЛФ-100+2А-185 (климатический район IIа, $t_{\min} = -38$ °С, $t_{\max} = 35$ °С, температура беспровесного состояния контактного провода $t_0 = -20$ °С) приведены в табл. 3.

Таблица 1

Результаты расчета стрел провеса контактного провода для контактной подвески Бр-120+2МФ-100+2А-185

$t_x, \text{°C}$	$f_{p1(70 \text{ м})}, \text{ м}$	$f_{p2(65 \text{ м})}, \text{ м}$	$f_{p3(60 \text{ м})}, \text{ м}$
-10	-0,010	-0,008	-0,006
-5	0,000	0,000	0,000
0	0,009	0,008	0,006
5	0,018	0,015	0,012
10	0,029	0,023	0,018
15	0,038	0,030	0,024
20	0,046	0,037	0,030
25	0,054	0,043	0,034
30	0,063	0,051	0,041
35	0,071	0,058	0,046
37	0,075	0,060	0,048

Таблица 2

Результаты расчета стрел провеса контактного провода для контактной подвески М-120+2МФ-100+2А-185

$t_x, \text{°C}$	$f_{p1(70 \text{ м})}, \text{ м}$	$f_{p2(65 \text{ м})}, \text{ м}$	$f_{p3(60 \text{ м})}, \text{ м}$
-24	-0,028	-0,023	-0,018
-19	-0,018	-0,014	-0,011
-14	-0,007	-0,006	-0,005
-9	0,002	0,001	0,001
-4	0,011	0,009	0,007
1	0,021	0,017	0,014
6	0,030	0,024	0,019
11	0,038	0,031	0,025
16	0,047	0,038	0,030
21	0,055	0,045	0,035
26	0,063	0,051	0,041
31	0,071	0,058	0,046
36	0,078	0,063	0,050

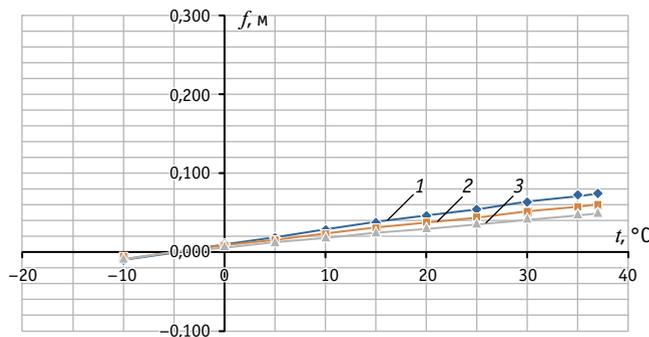


Рис. 1. Зависимость стрел провеса (f) контактного провода МФ-100 для контактной подвески Бр-120+2МФ-100+2А-185 от температуры при длине пролета: 1 — 70 м; 2 — 65 м; 3 — 60 м

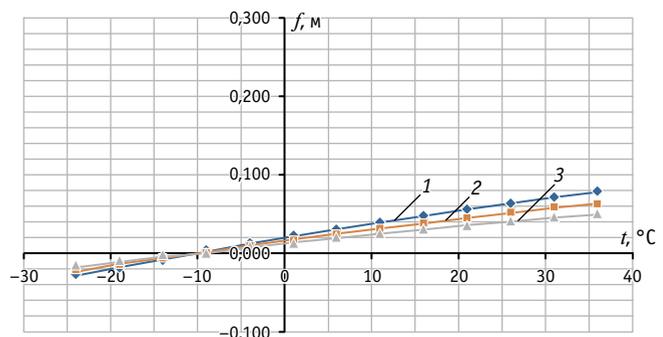


Рис. 2. Зависимость стрел провеса (f) контактного провода МФ-100 для контактной подвески М-120+2МФ-100+2А-185 от температуры при длине пролета: 1 — 70 м; 2 — 65 м; 3 — 60 м

Таблица 3

Результаты расчета стрел провеса контактного провода для контактной подвески М95–2НЛФ100+2А-185

$t_x, ^\circ\text{C}$	$f_{p1(70\text{ м})}, \text{ м}$	$f_{p2(65\text{ м})}, \text{ м}$	$f_{p3(60\text{ м})}, \text{ м}$
-38	-0,034	-0,027	-0,021
-33	-0,023	-0,018	-0,015
-28	-0,012	-0,009	-0,007
-23	-0,003	-0,002	-0,002
-18	0,005	0,004	0,003
-13	0,013	0,011	0,008
-8	0,021	0,017	0,013
-3	0,028	0,023	0,018
2	0,035	0,028	0,022
7	0,042	0,034	0,027
12	0,048	0,039	0,031
17	0,055	0,045	0,035
22	0,060	0,049	0,039
27	0,061	0,051	0,043
33	0,063	0,052	0,046
35	0,064	0,055	0,047

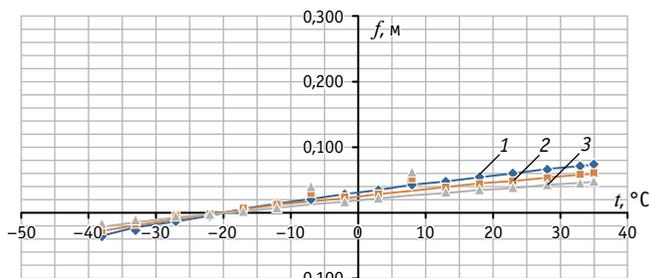


Рис. 3. Зависимость стрел (f) провеса контактного провода НЛФ-100 от температуры при длине пролета: 1 — 70 м; 2 — 65 м; 3 — 60 м

Таблица 4

Нормированные значения стрел провеса в зависимости от скорости движения поездов, мм

Скоростной режим	Стрела провеса контактного провода в середине пролета при длине пролета, м					
	60			65		
	Промежуточный пролет	Переходный пролет	60	65	70	60
КС-200	0,05	0,055	0,06	-0,03	-0,03	-0,03
КС-160, КС-140, КС-120	0,06	0,065	0,07	-0,02	-0,02	-0,02
КС-140, КС-120	0,07	0,075	0,08	-0,01	-0,01	-0,01

Зависимости стрел провеса контактного провода НЛФ-100 для контактной подвески М-95+2НЛФ-100 иллюстрирует рис. 3.

Из полученных монтажных таблиц и графиков следует, что наименьшие стрелы провеса контактного провода имеет контактная подвеска М-120+2МФ100 на участке III (при максимальной температуре, равной $37\text{ }^\circ\text{C}$, $f_{xi} = 0,078\text{ м}$; при минимальной температуре, равной $-10\text{ }^\circ\text{C}$, $f_{xi} = -0,01\text{ м}$), а наибольшие стрелы провеса у подвески М95+2НЛФ100 на участке IIa (при максимальной температуре, равной $35\text{ }^\circ\text{C}$, $f_{xi} = 0,064\text{ м}$; при минимальной температуре, равной $-38\text{ }^\circ\text{C}$, $f_{xi} = -0,034\text{ м}$).

Значения стрел провеса в зависимости от длины пролета и скоростного режима приведены в табл. 4 [7].

Исследования показали, что при скоростях движения поездов до 200 км/ч лучшие условия взаимодействия токоприемника и контактной сети возникают тогда, когда между крайними струнами располагается контактный провод со стрелой провеса, равной $0,001$ длины [8]. Это означает, что в пролетах длиной 70 м при удалении первой простой струны от опоры на 10 м оптимальная стрела провеса контактного провода на участке контактной сети 60 м будет равна 60 мм , что и показано в табл. 4.

Сравнение нормированных величин стрел провеса (см. табл. 4) с результатами, полученными авторами, показывает, что у подвески М95+2НЛФ100+2А185 стрелы провеса при максимальной температуре контактного провода НЛФ-100 приближаются к оптимальным значениям при скоростях движения от 160 до 200 км/ч (КС-200): при длине пролета 70 м стрела провеса $f_{xi} = 0,064\text{ м}$; при длине пролета 65 м $f_{xi} = 0,053\text{ м}$; при длине пролета 60 м $f_{xi} = 0,047\text{ м}$. Это значит, что на участке контактной сети можно увеличить скорость движения поездов до 200 км/ч .

В декабре 2017 г. участок высокоскоростной магистрали (ВСМ) между Екатеринбург и Челябинском был включен в Транспортную стратегию Российской Федерации до 2030 г. в качестве элемента программы развития ОАО «РЖД». Сегодня время в пути на пассажирском поезде от Екатеринбурга до Челябинска составляет $4\text{ ч } 9\text{ мин}$ [9]. Хотя строительство выделенной магистрали для реализации высоких скоростей в Уральском регионе пока приостановлено из-за недостатка денежных средств, по результатам представленного исследования можно утверждать, что существующая инфраструктура позволяет повысить скорость движения на III участке даже с учетом непростых климатических условий. По предварительной оценке, время в пути может быть сокращено на 40 мин . Если к проекту высокоскоростной магистрали вернуться, то, по оценке специалистов, время в пути между Екатеринбург и Челябинском займет всего $1\text{ ч } 10\text{ мин}$ при максимальной скорости поезда 300 км/ч , что позволит сформировать на базе ВСМ единую агломерацию Уральского региона.

В ближайшей перспективе авторы планируют составить карту рисков отказов контактной сети на выбранных участках из-за гололедообразования. Это даст возможность оценить необходимость модернизации инфраструктуры и более точно обобщать экономические затраты на проект.

Литература

1. Марквардт К. Г. Контактная сеть. Москва : Транспорт, 1994. 335 с.
2. Кисслинг Ф., Пушманн Р., Шмидер А. Контактные сети электрифицированных железных дорог. Проектирование. Расчет. Сооружение. Монтаж. Эксплуатация : 1-е изд. Москва : Сименс Россия, 2018. 1429 с.
3. Галкин А. Г., Ковалев А. А., Микава А. В. Применение контракта жизненного цикла для инфраструктурного комплекса системы токосъема // Транспорт Урала. 2012. № 3 (34). С. 85–89. ISSN 1815-9400.
4. Ковалев А. А., Микава А. В. Определение максимальной продолжительности жизненного цикла консолей контактной сети // Транспорт Урала. 2019. № 4 (63). С. 86–90. DOI: 10.20291/1815-9400-2019-4-86-90. ISSN 1815-9400.
5. Михеев В. П. Контактные сети и линии электропередачи. Москва : Маршрут, 2003. 416 с.
6. Андриюков А. В., Ковалев А. А. Анализ надежности устройств контактной сети на участке Екатеринбург — Челябинск // Инновационный транспорт. 2021. № 2 (40). С. 54–58. DOI: 10.20291/2311-164X-2021-2-54-58. ISSN 2311-164X.
7. Ковалев А. А. Развитие инфраструктурного комплекса системы токосъема // Инновационный транспорт. 2013. № 2 (8). С. 43–46. ISSN 2311-164X.
8. Комплексное внедрение инноваций на железнодорожном транспорте России / А. А. Ковалев, Ф. С. Несмелов, А. В. Микава [и др.] // Транспортное дело России. 2013. № 4. С. 24–26. ISSN 2072-8689.
9. Разработка контактной сети для ВСМ России / В. А. Иванов, Е. В. Кудряшов, А. Г. Галкин, А. А. Ковалев // Инновационный транспорт. 2011. № 1 (1). С. 16–21. ISSN 2311-164X.

Объем статьи 0,67 авторских листа

References

1. Markvardt K. G. Contact line [Kontakt'naya set']. Moscow : Transport, 1994. 335 p.
2. Kiessling F., Puschmann R., Schmieder A. Contact Lines for Electric Railways: Planning, Design, Implementation, Maintenance [Kontakt'nye seti elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog. Proektirovanie. Raschet. Sooruzhenie. Montazh. Ekspluatatsiya] : 1st ed. Moscow : Siemens Russia, 2018. 1429 p.
3. Galkin A. G., Kovalev A. A., Mikava A. V. Using lifecycle contract for infrastructure complex of current collection system [Primenenie kontrakta zhiznennogo tsikla dlya infrastruktornogo kompleksa sistemy tokos"ema] // Transport of the Urals. 2012. No. 3 (24). Pp. 85–90. ISSN 1815-9400.
4. Kovalev A. A., Mikava A. V. Determination of maximum life cycle of catenary cantilevers [Opredelenie maksimal'noy prodolzhitel'nosti zhiznennogo tsikla konsoley kontaktnoy seti] // Transport of the Urals. 2019. No. 4 (63). Pp. 86–90. DOI: 10.20291/1815-9400-2019-4-86-90. ISSN 1815-9400.
5. Mikheev V. P. Contact lines and transmission lines [Kontakt'nye seti i linii elektoperedachi]. Moscow : Route, 2003. 416 p.
6. Andryukov A. V., Kovalev A. A. Analysis of reliability of contact network devices on the Yekaterinburg — Chelyabinsk section [Analiz nadezhnosti ustroystv kontaktnoy seti na uchastke Ekaterinburg — Chelyabinsk] // Innotrans. 2021. No. 2 (40). Pp. 54–58. DOI: 10.20291/2311-164X-2021-2-54-58. ISSN 2311-164X.
7. Kovalev A. A. Development of infrastructure complex of current collection system [Razvitie infrastruktornogo kompleksa sistemy tokos"ema] // Innotrans. 2013. No. 2 (8). Pp. 43–46. ISSN 2311-164X.
8. Integrated implementation of innovation on Russian railways [Kompleksnoe vnedrenie innovatsiy na zheleznodorozhnom transporte Rossii] / A. A. Kovalev, F. S. Nesmelov, A. V. Mikava [et al.] // Transport business of Russia. 2013. No. 4. Pp. 24–26. ISSN 2072-8689.
9. Development of catenary for Russian high-speed railways [Razrabotka kontaktnoy seti dlya VSM Rossii] / V. A. Ivanov, E. V. Kudryashov, A. G. Galkin, A. A. Kovalev // Innotrans. 2011. No. 1 (1). Pp. 16–21. ISSN 2311-164X.

УДК 621.332.23

Евгений Юрьевич Тряпкин, старший преподаватель кафедры «Системы электроснабжения» Дальневосточного государственного университета путей сообщения (ДВГУПС), Хабаровск, Россия,

Иван Владимирович Игнатенко, кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Системы электроснабжения» Дальневосточного государственного университета путей сообщения (ДВГУПС), Хабаровск, Россия,

Сергей Анатольевич Власенко, кандидат технических наук, доцент кафедры «Системы электроснабжения» Дальневосточного государственного университета путей сообщения (ДВГУПС), Хабаровск, Россия,

Наталья Константиновна Шурова, кандидат технических наук, доцент кафедры «Системы электроснабжения» Дальневосточного государственного университета путей сообщения (ДВГУПС), Хабаровск, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИЧИН ВОЗНИКНОВЕНИЯ ПОВЫШЕННЫХ ПОТЕНЦИАЛОВ ТЯГОВОЙ РЕЛЬСОВОЙ СЕТИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ПУТЕМ РЕГИСТРАЦИИ ДАННЫХ В РЕЖИМЕ ЕДИНОГО ВРЕМЕНИ

Evgeniy Yuryevich Tryapkin, Senior Lecturer, Power Supply Systems Department, Far Eastern State Transport University (FESTU), Khabarovsk, Russia,

Ivan Vladimirovich Ignatenko, PhD in Engineering, Head of Power Supply Systems Department, Far Eastern State Transport University (FESTU), Khabarovsk, Russia,

Sergey Anatolyevich Vlasenko, PhD in Engineering, Associate Professor, Power Supply Systems Department, Far Eastern State Transport University (FESTU), Khabarovsk, Russia,

Natalya Konstantinovna Shurova, PhD in Engineering, Associate Professor, Power Supply Systems Department, Far Eastern State Transport University (FESTU), Khabarovsk, Russia

Study of causes of increased potentials of alternating current traction rail network by registration of data in united time mode

Аннотация

Рассмотрены результаты прямого инструментального исследования параметров рельсовой плети в условиях действующего участка тяговой сети, позволяющие оценить влияние несинусоидальности и величины тока на процесс формирования потенциала «рельс — земля». Представлена функция для частного случая вычисления формы напряжения на участке рельсовой плети. Сделан вывод, что эта функция может служить элементом расчета электрических процессов в обратной рельсовой сети переменного тока 25 кВ.

Ключевые слова: рельсовая сеть, тяговый ток, асимметрия тягового тока, потенциал «рельс — земля».

Abstract

The paper considers results of straight instrumental study of rail line parameters in conditions of operating section of traction network that allow assessing influence of non-sinusoidality and current value on the process of creation of «rail — ground» potential. The paper presents a formula for a particular case of calculation of voltage form on a rail line section. As a result, this function may be an element of calculation of electrical processes in 25kV alternating current back rail network.

Keywords: rail network, traction current, asymmetry of traction current, «rail — ground» potential.

DOI: 10.20291/1815-9400-2023-1-120-125

ВВЕДЕНИЕ

Проблема повышенных потенциалов «рельс — земля» наиболее остро проявляется на грузонапряженных направлениях Транссибирской магистрали. Особенно часто повышенные потенциалы «рельс — земля» оказывают негативное влияние на работу устройств железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ), что обусловлено появлением поперечной асимметрии тока, а также воздействием непосредственно потенциала на цепи питания и заземления устройств ЖАТ и питающих их устройств. Поперечная асимметрия тока возникает из-за повышения тока утечки или пробоя разрядников (при превышении потенциала их электрической прочности) на заземляемые на рельс конструкции. Также повреждению подвержена и иная сопутствующая инфраструктура. Главным источником риска может быть нарушение электробезопасности со стороны работающего персонала.

Цель исследования, представленного в статье, — анализ проблемы и выявление причин появления повышенных потенциалов «рельс — земля», а также обобщение и описание некоторых влияющих факторов. Понимание этих процессов позволяет разработать эффективные технические и организационные мероприятия по снижению потенциалов и, как следствие, по увеличению надежности работы оборудования ин-

фраструктуры железнодорожного транспорта, предотвращению электротравматизма при работе в цепях и устройствах обратной рельсовой сети переменного тока.

Ранее сотрудниками кафедры «Системы электроснабжения» Дальневосточного государственного университета путей сообщения (ДВГУПС) уже изучались причины возникновения высоких потенциалов «рельс — земля» на участках Дальневосточной железной дороги (ДВЖД). Так, в 2018 г. выполнены экспериментальные исследования с использованием, кроме переносных инструментальных приборов, специально созданных регистраторов, позволивших получить расширенную картину работы рельсовых сетей. В результате были сформулированы следующие выводы:

не обнаружены отказы устройств тяговой сети, а также обратной рельсовой сети, ставшие причиной появления повышенных потенциалов «рельс — земля»;

причиной появления повышенных потенциалов «рельс — земля» послужило высокое сопротивление рельсовой линии обратному тяговому току, а также высокое сопротивление цепи «балласт — земля» из-за сезонной сухости и наличия геополтна с изоляционными свойствами в основании балластной призмы. При этом сопротивление рельсовой линии составляло 1,2 Ом/км, что превышало значения, приведенные в литературных источниках (например, в [1]), а потенциалы «рельс — земля» достигали 1000 В и выше.

В последующем при проведении теоретических исследований было выдвинуто предположение, что одним из важных факторов появления высоких потенциалов «рельс — земля» могла стать несинусоидальность тягового тока. Изучение работы имитационных схем в программном комплексе MATLAB-Simulink показало, что даже при одинаковом действующем значении тягового тока, но в условиях разных зон работы выпрямительно-инверторного преобразователя (ВИП) электровоза параметры падения напряжения на участке рельсовой цепи значительно отличаются. При движении электровоза на низких скоростях и на низких зонах регулирования создаются гораздо более сильные колебания напряжения в рельсовой сети, чем на высоких [2].

Для детального анализа электрических процессов, происходящих в рельсовой сети, а также для внедрения средств защиты от появления повышенных потенциалов «рельс — земля» необходимо использовать математические и имитационные модели, в состав которых должны входить алгоритмы расчета исследуемых электрических цепей. Любой анализ электрической цепи возможен, только если известны параметры основных ее элементов и значения протекающего тока [3]. При рассмотрении реального участка рельсовой сети отсутствуют сведения о форме тягового тока в рельсах, а также о влиянии его формы и величины на параметры рельсов, которые бы сходились с ранее полученными результатами измерений.

Как показал анализ, при определении токораспределения в рельсовой сети, а также при расчетах потенциалов «рельс — земля» большинство исследователей опираются на классическую модель представления рельсовой сети переменного тока [4–6]. Однако эта модель содержит ряд упрощений, в частности, не подразумевает протекания тяговой составляющей тока

в рельсах. На основании выполненных нами исследований было установлено, что именно тяговая составляющая тока — основной источник высоких потенциалов «рельс — земля» [1].

Параметры сопротивления рельса описаны в литературных источниках и справочных системах информационных комплексов (например, КОРТЭС). Так, исследования Л. Р. Неймана [7] позволяют рассчитать активное сопротивление рельсов, Ом, по формуле

$$R_p = \frac{l}{P} \sqrt{\mu_{ст} \rho \omega}, \quad (1)$$

где l — длина рельса, м; P — периметр сечения рельса, мм; $\mu_{ст}$ — абсолютная статическая магнитная проницаемость рельсовой стали, Гн/м; ρ — удельное сопротивление рельсовой стали, Ом·мм²/м; ω — угловая частота, рад/с.

В работах [8, 9] приведены сведения о параметрах сопротивления рельсов в зависимости от величины протекающего в них тока. Авторы обеих работ сходятся во мнении, что при увеличении протекающего тока сопротивление рельса возрастает (рис. 1).

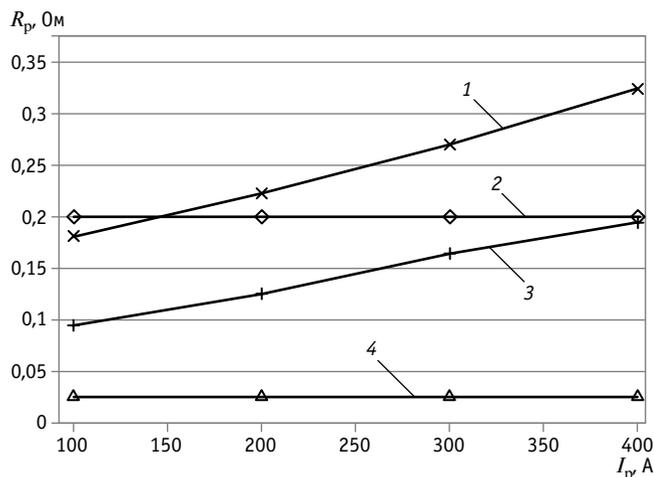


Рис. 1. Значения активных сопротивлений 1 км рельса:

- 1 — сопротивление рельса по данным литературного источника [9];
- 2 — сопротивление рельса типа Р65, принятого в программном комплексе КОРТЭС для переменного тока;
- 3 — сопротивление рельса по данным литературного источника [8];
- 4 — сопротивление рельса Р65 постоянному току; I_p — ток рельса

В работе [10] для определения активного сопротивления рельса в условиях сильных электромагнитных полей предлагается пользоваться выражением

$$R_p = \frac{9,1 \cdot 10^{-3}}{P} \sqrt{\mu} \cdot k_{rH}, \quad (2)$$

где μ — относительная магнитная проницаемость рельсовой стали; k_{rH} — безразмерный коэффициент,

$$k_{rH} = \cos(45^\circ - \psi/2), \quad (3)$$

где ψ — аргумент комплексной магнитной проницаемости.

Повышение активного сопротивления объясняется тем, что рельсы на участках переменного тока работают в зоне незначительных (слабых) полей, и при росте напряженности магнитного поля H в рельсах вплоть до 12–15 А/см относительная магнитная проницаемость рельсовой стали μ увеличивается [7]. В этих условиях эффективная глубина проникновения переменного тока в проводник снижается, что становится причиной роста сопротивления.

Определение значения сопротивления рельса в условиях электромагнитного влияния тяговой сети осложняется наличием электромагнитных взаимодействий рельса с другими объектами. Например, в [8] сопротивление контура «рельс — земля» без учета стыков предлагается рассчитывать по следующей формуле:

$$\bar{Z}_p = R_p + r_3 I + j(X_p) + j \frac{\omega \mu_0 \cdot 10^{-3}}{2\pi} \ln \frac{D_3}{R} \cdot I, \quad (4)$$

где r_3 — сопротивление, учитывающее активные потери мощности в земле и вычисляемое по приближенным формулам $r_3 = \frac{\pi \omega}{2} \cdot 10^{-4}$, Ом/км; X_p — внутреннее индуктивное сопротивление рельса, Ом; μ_0 — магнитная постоянная, Гн/м; R — радиус эквивалентной окружности рельса, м; D_3 — эквивалентная глубина протекания тока в земле при учете однослойного грунта, м, рассчитанная по приближенным значениям

$$D_3 = \frac{3,695}{2\sqrt{\omega \gamma_3 \mu_0}}; \gamma_3 — \text{проводимость земли, См/м.}$$

Сложность даже такого приближенного расчета состоит в необходимости учитывать все сопутствующие контуры «проводник — земля», а несинусоидальный характер тока делает подобный расчет затруднительным. При этом речь идет только о расчете сопротивления контура для наведенной составляющей тока. Как было показано ранее, тяговую составляющую тока принято не учитывать, а сопротивление «рельс — земля» принимать равным 0.

Для определения характера сопротивления рельса в условиях электромагнитного взаимодействия с тяговой сетью могут использоваться экспериментальные измерения. Например, совместное измерение рельсовых нитей (сопротивление рельсовой плети) [11], а также способ измерения сопротивления рельса тяговому току [12]. Второй способ позволяет измерять сопротивление рельсов при непосредственном воздействии тока поезда, однако связан с заземлением одной части измеряемого участка, что меняет условия протекания тягового тока. Внесение изменений в характеристики работы исследуемой цепи может оказать влияние на параметры рельсовой линии.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Для измерения параметров рельсовой сети необходимо оборудование, соответствующее следующим требованиям:

1) регистрация должна производиться с частотой, достаточной для определения формы регистрируемых сигналов и их основных гармоник и удовлетворяющей требованию теоремы Котельникова;

2) регистрирующие приборы не должны иметь общего электрического контура, кроме измеряемых цепей;

3) регистраторы должны поддерживать возможность длительной автономной работы на весь период проведения испытаний;

4) цепь измерений не должна оказывать значимое влияние на процессы в исследуемых цепях;

5) регистрация должна проводиться абсолютно синхронно на уровне работы аналого-цифровых преобразователей, чтобы анализировать регистрируемые значения в одних осях координат;

6) регистраторы должны иметь возможность работать на расстоянии друг от друга от 100 до 2000 м.

Этим требованиям удовлетворяют автономные мобильные регистрирующие комплексы, входящие в состав цифровой измерительной системы. Разработанный сотрудниками ДВГУПС мобильный комплекс длительной регистрации электротехнических процессов, работающий в режиме единого времени, включает в себя автономный и переносной измерители для регистрации сигнала. Синхронизация полученных измерительных значений по оси абсцисс достигается применением спутниковой синхронизации измерителей, а также наличием точных, до наносекунд, часов времени на борту устройств [13]. Это позволяет синхронизировать работу аналого-цифровых преобразователей всех измерителей и осуществлять сбор данных в режиме единого времени. Технические параметры регистраторов системы приведены в табл. 1.

Эксперименты проводились на двух участках ДВЖД (далее обозначенных как участок А и участок Б), подверженных высокому потенциалу «рельс — земля». Эксперименты выполнялись в зимнее время при температуре окружающего воздуха от -17 до -30 °С. За время проведения экспериментов собрано несколько часов синхронных регистрируемых значений напряжений на участках рельсовой линии на различном удалении друг от друга, а также мгновенные значения протекающих токов. Регистрация осуществлялась с разрешением 256 точек на период основной частоты, что соответствует параметрам стандарта МЭК 61850 9.2 LE 256 SV. Схема эксперимента изображена на рис. 2.

Фрагменты графиков зарегистрированных значений токов и напряжений показаны на рис. 3. Рассмотрим поведение кривой потенциала «рельс — земля». На рис. 3 представлена измеренная зависимость $U_p = f(I_p)$ для одного рельса в границах блок-участка. Условия измерения следующие: электровоз заезжает на блок-участок, ток утечки в землю через балласт не учитывается из-за незначительной величины (менее 1 А), т.е. токи в начале и конце блок-участков примерно одинаковы ($I_{A1} \approx I_{A3}$), значение напряжения в рельсе $U_p = U_1 - U_3$.

Как следует из рис. 3, основная составляющая падения напряжения на участке рельса — это всплеск напряжения при коммутационном переключении ВИП электровоза [14].

Результатом проведенных измерений стали многочисленные параметры рельсовой сети и рельсовой плети. В табл. 2 представлены усредненные за периоды замеров значения сопротивления рельсовой плети для различных гармоник на каждом участке, приведенные к длине 1 км.

Таблица 1

Технические параметры регистраторов

Параметр	Тип оборудования		
	Регистратор тяговой подстанции	Регистратор поста секционирования	Портативный регистратор сигналов
Количество входов напряжения, диапазон измерений	3 (0–200 В)	1 (0–200 В)	До 2 (0–3000 В)
Количество входов тока, диапазон измерений	12 (0–25 А)	4 (0–25 А)	До 2 (0–25 А) До 2 (0–1000 А)
Частота проводимых замеров	12800 с/с	12800 с/с	12800 с/с
Длительность записи на внутренний накопитель	Потоковая 1500 ч	Потоковая 1600 ч	Потоковая 100 ч
GPS/ГЛОНАСС синхронизация времени	PPS, NMEA, встроенные часы точного времени	PPS, NMEA, встроенные часы точного времени	PPS, NMEA, встроенные часы точного времени
Питание	Сеть ~100–260 В, встроенный ИБП, источник = 9–18 В	Сеть ~100–260 В, встроенный ИБП, источник = 9–18 В	Встроенный АКБ, источник = 9–18 В
Размеры, мм	330×230×120 455×330×152	330×230×120	330×230×120
Масса, кг	7/5	1,7	12

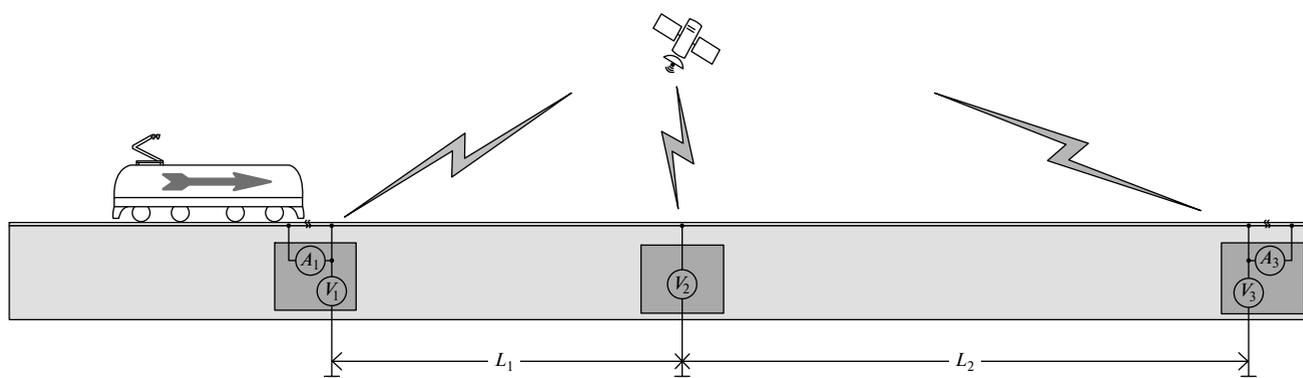


Рис. 2. Схема проведения эксперимента (участок А):

V_1, V_2, V_3 — места контроля напряжения «рельс — земля» первого, второго и третьего регистраторов соответственно;
 A_1, A_3 — места контроля тока рельсовой плети первого и третьего регистраторов;
 L_1, L_2 — расстояние удаления между первым и вторым, а также между вторым и третьим регистраторами соответственно

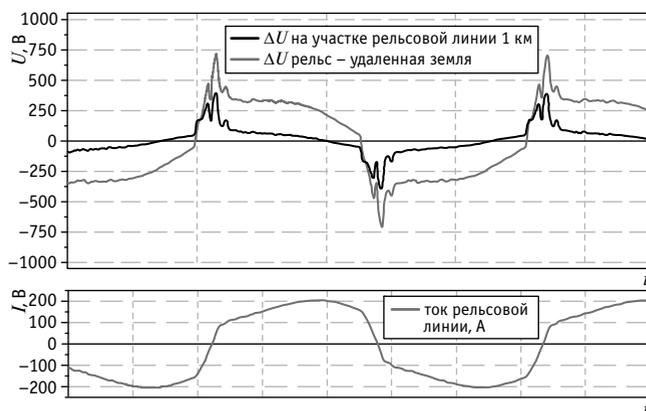


Рис. 3. Пример представления результатов измерений (участок Б)

Таблица 2

Параметры сопротивления рельсовой линии, Ом

f гармоники, Гц	Участок А		Участок Б	
	R_p	X_p	R_p	X_p
50	0,115	0,316	0,16	0,614
150	0,265	0,848	0,401	1,468
250	0,65	1,49	0,546	2,164
350	0,623	1,885	0,671	2,974
450	0,973	2,194	0,787	3,647
550	1,959	3,027	1,058	3,858
650	2,835	3,668	1,443	4,709
750	2,943	2,721	2,311	4,985

Как показал контроль продольных параметров рельса, его сопротивление снижается при увеличении протекающего тока, что не согласуется с общепринятыми утверждениями. График зависимости активного $R_p = f(I)$ и индуктивного $X_p = f(I)$ сопротивления рельса от протекающего тока представлен на рис. 4, значения указаны для длины 1 км.

Согласно рис. 4, сопротивление рельсовой плети убывает при увеличении протекающего тока, что противоречит данным, представленным на рис. 1. Объяснением такого сопротивления могут служить ранее не учтенные электромагнитные процессы, происходящие в рельсовой линии.

В экспериментах также была синтезирована формула расчета огибающей формы напряжения от формы тока $U = f(I)$:

$$U = 1,39 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{\partial I}{\partial t} + 0,174 \cdot I - 66,56 \int_0^t I dt, \quad (5)$$

где I — ток, протекающий в цепи, А.

Пример выполнения функции нахождения формы огибающей напряжения от тока представлен на рис. 5.

Шумы в полученной функции объясняются значительной степенью влияния шага дискретизации регистратора тока, а также воздействием помех (шумом) от электронных систем регистратора. Использование представленной функции позволяет определить форму напряжения при любой форме тока и не ограничиваться измеренными данными. Кроме того, структура уравнения дает возможность применить для ее обработки такие функции, как функция ПИД-регулирования, широко распространенная в системах автоматического управления.

ВЫВОДЫ

В статье отмечена сложность проведения анализа работы рельсовой линии — элемента обратной рельсовой сети. Из-за влияния множества взаимосвязанных параметров, часть из которых можно рассчитать приближенно, точность исследования

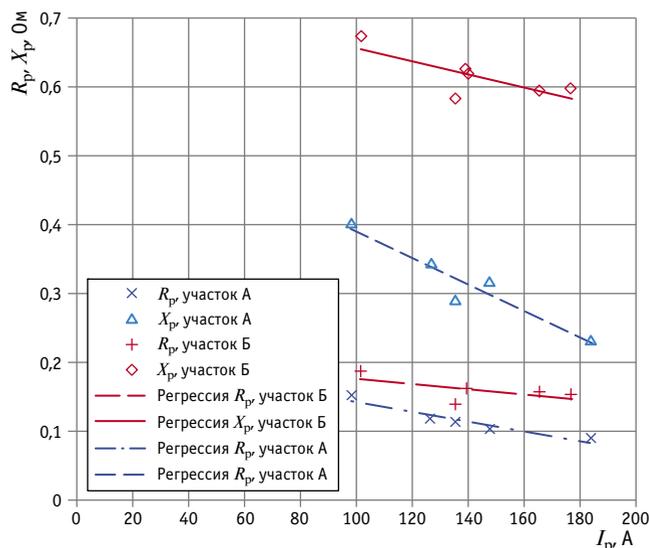


Рис. 4. График зависимости сопротивления 1 км рельсовой плети для $f = 50$ Гц от тока в рельсе (для всех точек графика электровоз заезжает на контролируемый блок-участок)

потенциалов в рельсовых сетях была низкой, а расчеты не согласовывались с экспериментальными данными.

Представлены результаты прямого инструментального исследования параметров рельсовой плети в условиях действующего участка тяговой сети. Полученные параметры позволяют определять влияние несинусоидальности и величины тока на процесс формирования потенциала на участке рельсовой плети. Такая информация дает возможность развить адекватные схемы замещения рельсовой сети. Составлена формула для частного случая расчета формы напряжения на участке рельсовой плети. Предложенная функция может использоваться как элемент расчета электрических процессов в обратной рельсовой сети переменного тока 25 кВ.

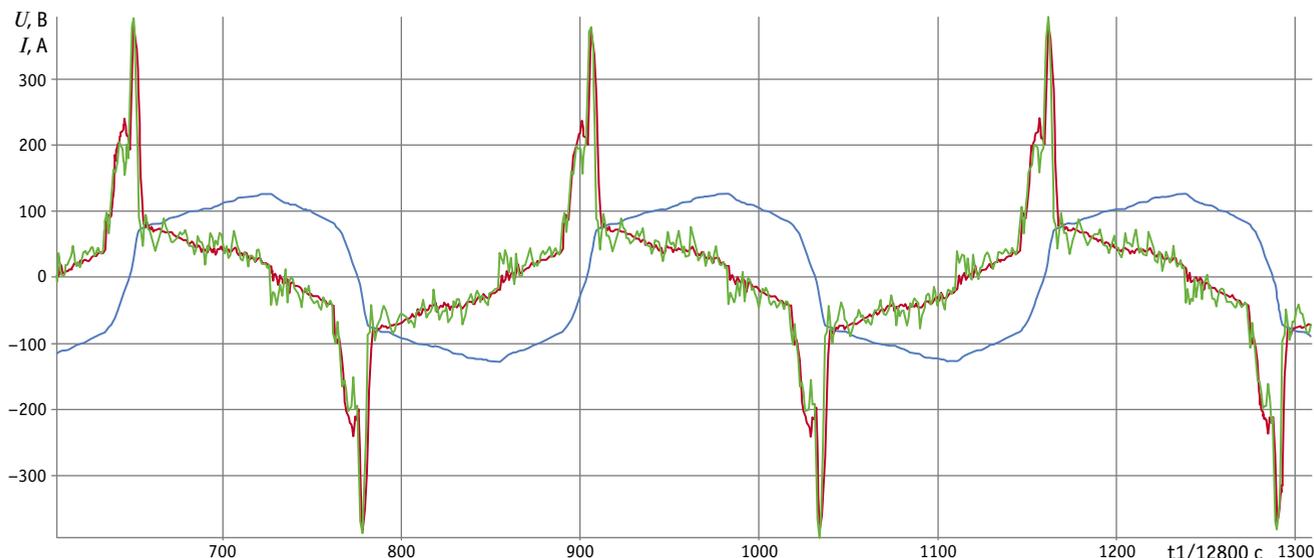


Рис. 5. Функция $U = f(I)$ для участка рельсовой плети в условиях электромагнитной обстановки тяговой сети переменного тока:
— ток рельса; — напряжение на участке рельсовой линии; — функция $U = f(I)$

Литература

1. Impact of Return Traction Current Harmonics on the Value of the Potential of the Rail Ground for the AC Power Supply System / I. Ignatenko, E. Tryapkin, S. Vlasenko [et al.] // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2020. Vol. 1115. Pp. 117–127. DOI: 10.1007/978-3-030-37916-2_13.
2. Тряпкин Е. Ю., Шурова Н. К. Исследование влияния режима работы электроподвижного состава на потенциал в рельсовой цепи // *Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона*. 2020. № 4 (25). С. 74–78. ISSN 2415-8658.
3. Ионкин П. А. Теоретические основы электротехники. Основы теории цепей. Ч. 1. Москва : Высшая школа, 1965. 735 с.
4. Марквардт К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог. Москва : Транспорт, 1982. 528 с.
5. Марквардт К. Г. Энергоснабжение электрических железных дорог. Москва : Трансжелдориздат, 1958. 288 с.
6. Бадёр М. П. Электромагнитная совместимость. Москва : УМК МПС, 2002. 638 с.
7. Нейман Л. Р. Поверхностный эффект в ферромагнитных телах. Москва ; Ленинград : Госэнергоиздат, 1949. 190 с.
8. Фигурнов Е. П. Сопротивление электротяговой сети // *Электричество*. 1997. № 5. С. 23–29. ISSN 0013-5380.
9. Шаманов В. И., Ведерников Б. М., Шульц В. А. Электрические и магнитные параметры рельсовых линий для сигнального и тягового токов // *Вестник КазАТК*. 2016. № 2 (97). С. 43–51. ISSN 1609-1817.
10. Фигурнов Е. П., Стороженко Д. Е. Электрическое сопротивление рельсов // *Транспорт-2004 : труды Всероссийской научно-практической конференции*. Ростов-на-Дону : РГУПС, 2004. С. 169–170.
11. Шаманов В. И., Трофимов Ю. А. Параметры рельсовых линий в задачах электромагнитной совместимости // *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование*. 2015. № 4 (48). С. 196–203. ISSN 1813-9108.
12. Способ измерения электрических сопротивлений в неоднородных рельсовых нитях на электрифицированных участках железных дорог / В. И. Шаманов, А. Е. Ваньшин, Д. В. Денежкин [и др.] : патент 2695438 Российская Федерация. № 2018136134 ; заявл. 12.10.2018 ; опубл. 23.07.2019, Бюл. № 21.
13. Тряпкин Е. Ю., Игнатенко И. В., Власенко С. А. Система синхронизации времени для работы распределенной измерительной системы // *Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона*. 2021. № 4 (29). С. 72–76. ISSN 2415-8658.
14. Investigation of the Conditions for the Occurrence of Rail-Ground Potentials on AC Railways / E. Tryapkin, I. Ignatenko, S. Vlasenko [et al.] // *Networked Control Systems for Connected and Automated Vehicles*. 2022. Vol. 510. Pp. 893–902. DOI: 10.1007/978-3-031-11051-1_92.

Объем статьи 0,7 авторских листа

References

1. Impact of Return Traction Current Harmonics on the Value of the Potential of the Rail Ground for the AC Power Supply System / I. Ignatenko, E. Tryapkin, S. Vlasenko [et al.] // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2020. Vol. 1115. Pp. 117–127. DOI: 10.1007/978-3-030-37916-2_13.
2. Tryapkin E. Yu., Shurova N. K. Examining the influence of electric rolling stock operating mode on the potential in the rail chain [Issledovanie vliyaniya rezhima raboty elektropodvizhnogo sostava na potentsial v rel'sovoy tsepi] // *Transport of the Asia-Pacific region*. 2020. No. 4 (25). Pp. 74–78. ISSN 2415-8658.
3. Ionkin P. A. Theoretical basics of electrical engineering. Basics of circuit theory [Teoreticheskie osnovy elektrotehniki. Osnovy teorii tsepey]. Part 1. Moscow : Higher School, 1965. 735 p.
4. Markvardt K. G. Power supply of electrified railways [Elektrosnabzhenie elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog]. Moscow : Transport, 1982. 528 p.
5. Markvardt K. G. Power supply of electric railways [Energosnabzhenie elektricheskikh zheleznykh dorog]. Moscow : Transzheldorizdat, 1958. 288 p.
6. Bader M. P. Electromagnetic compatibility [Elektromagnitnaya sovmestimost']. Moscow : UMC MPS, 2002. 638 p.
7. Neyman L. R. Surface effect in ferromagnetic bodies [Poverkhnostnyy effekt v ferromagnitnykh telakh]. Moscow ; Leningrad : Gosenergoizdat, 1949. 190 p.
8. Figurnov E. P. Resistance of power traction network [Soprotivlenie elektroyagovoy seti] // *Electricity*. 1997. No. 5. Pp. 23–29. ISSN 0013-5380.
9. Shamanov V. I., Vedernikov B. M., Shults V. A. Electric and magnetic parameters of rail lines for signaling and traction current [Elektricheskie i magnitnye parametry rel'sovykh liniy dlya signal'nogo i tyagovogo tokov] // *Bulletin of KazATK*. 2016. No. 2 (97). Pp. 43–51. ISSN 1609-1817.
10. Figurnov E. P., Storozhenko D. E. Electrical resistance of rails [Elektricheskoe soprotivlenie rel'sov] // *Transport-2004 : proceedings of All-Russian scientific and practical conference*. Rostov-on-Don : RSTU, 2004. Pp. 169–170.
11. Shamanov V. I., Trofimov Yu. A. Rail lines specifications in the tasks of electromagnetic compatibility [Parametry rel'sovykh liniy v zadachakh elektromagnitnoy sovmestimosti] // *Modern technologies. System analysis. Modeling*. 2015. No 4 (48). Pp. 196–203. ISSN 1813-9108.
12. Method for measuring electrical resistance in non-uniform rail threads on electrified sections of railways [Sposob izmereniya elektricheskikh soprotivleniy v neodnorodnykh rel'sovykh nityakh na elektrifitsirovannykh uchastkakh zheleznykh dorog] / V. I. Shamanov, A. E. Vanshin, D. V. Denezhkin [et al.] : patent 2695438 Russian Federation. No. 2018136134 ; filed 12.10.2018 ; publ. 23.07.2019, Bulletin No. 21.
13. Tryapkin E. Yu., Ignatenko I. V., Vlasenko S. A. Time synchronization system for operation of a distributed measuring system [Sistema sinkhronizatsii vremeni dlya raboty raspredelennoy izmeritel'noy sistemy] // *Transport of the Asia-Pacific region*. 2021. No. 4 (29). Pp. 72–76. ISSN 2415-8658.
14. Investigation of the Conditions for the Occurrence of Rail-Ground Potentials on AC Railways / E. Tryapkin, I. Ignatenko, S. Vlasenko [et al.] // *Networked Control Systems for Connected and Automated Vehicles*. 2022. Vol. 510. Pp. 893–902. DOI: 10.1007/978-3-031-11051-1_92.

Подписка на 2023 год.

Периодичность — 4 номера в год.

ф. СП-1

АБОНЕМЕНТ

на ~~газету~~
журнал

46463

(индекс издания)

Транспорт Урала

(наименование издания)

Количество
комплектов:

на 2023 год по месяцам:

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
X	X	X	X	X	X						

Куда

(почтовый индекс)

(адрес)

Кому

(фамилия, инициалы)

ДОСТАВОЧНАЯ КАРТОЧКА

на ~~газету~~
журнал

46463

(индекс издания)

Транспорт Урала

(наименование издания)

Стои- мость	подписки	руб. ____ коп.	Количество комплектов:
	переадресовки	руб. ____ коп.	

на 2023 год по месяцам:

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
X	X	X	X	X	X						

Куда

(почтовый индекс)

(адрес)

Кому

(фамилия, инициалы)

Научно-технический журнал «Транспорт Урала»

DOI:10.20291/1815-9400

№ 1 (76), 2023 год

Издается с июня 2004 г. Выходит 4 раза в год

Подписной индекс в общероссийском каталоге «Пресса России» — 46463

Издание зарегистрировано в Министерстве Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций 27 мая 2004 г.

Свидетельство о регистрации ПИ № 77-18098

Свидетельство на товарный знак (знак обслуживания) № 577040.

Зарегистрировано в Государственном реестре товарных знаков и знаков обслуживания Российской Федерации 6 июня 2016 г.

Учредитель и издатель:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО УрГУПС)

Адрес учредителя и издателя:

620034, Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66

Адрес редакции:

620034, Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66

Тел. (343) 221-24-90

<http://www.usurt.ru/transporturala>

e-mail: EPupova@usurt.ru

Главный редактор:

Александр Геннадьевич Галкин

Научный редактор:

Александр Эрнстович Александров

Выпускающий редактор и корректор:

Елена Семеновна Пупова,

тел. (343) 221-24-90, 8-912-61-07-229,

e-mail: EPupova@usurt.ru

Верстка и дизайн:

Андрей Викторович Трубин

Автор фотографии на обложке:

Дмитрий Васильевич Поморцев

Журнал включен ВАК в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук

Подписано в печать 31.03.2023

Выход в свет 28.04.2023

Тираж 250 экз. (1-й з-д 1–40)

Формат 60×90/8

Цена 563,42 руб.

Изготовлено в ИБК УрГУПС,

620034, Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66

Заказ № 15

© ФГБОУ ВО «Уральский государственный университет путей сообщения», 2023