

# ТРАНСПОРТ

НАУЧНО - ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

## УРАЛ

**ИНТЕГРАТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ИНФРАСТРУКТУРОЙ  
В ПЕРЕВОЗОЧНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ**

**ОПЕРАЦИОННЫЕ ЦИКЛЫ  
ТРАНСПОРТНО-ЭКСПЕДИТОРСКИХ ПРЕДПРИЯТИЙ**

**МЕТОДИКА ИНЖЕНЕРНОЙ ОЦЕНКИ  
ВЛИЯНИЯ БАЗЫ ВАГОНА  
НА ЕГО ДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ**

**НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ  
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА,  
АРМИРОВАННОГО ГЕОСИНТЕТИЧЕСКИМИ МАТЕРИАЛАМИ**

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ  
МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ  
РАСЧЕТА ЭЛЕКТРОТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ  
В КОНТАКТНОЙ ПОДВЕСКЕ ПОСТОЯННОГО ТОКА**

**ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ  
ЧАСТНЫХ ЛОКОМОТИВОВ НА СЕТИ РЖД**



# TRANSPORT

## SCIENTIFIC JOURNAL OF THE URALS

### МЕЖДУНАРОДНЫЙ РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

1. Александр Галкин, д-р техн. наук, профессор, главный редактор журнала «Транспорт Урала», Екатеринбург, Россия
2. Александер Сладковски, д-р техн. наук, профессор, Силезский технический университет, Польша
3. Эдуард Горкунов, д-р техн. наук, профессор, академик РАН, Екатеринбург, Россия
4. Аксель Шмидер, д-р, «Сименс АГ», отраслевой сектор, департамент транспорта «Железнодорожное строительство», Эрланген, Германия
5. Эрки Хамалайнен, д-р экон. наук, университет Аалто, Школа экономики, Финляндия

### РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

1. Александров Александр Эрнстович, д-р техн. наук, доцент, научный редактор, Екатеринбург
2. Булаев Владимир Григорьевич, д-р техн. наук, доцент, Екатеринбург
3. Галиев Ильхам Исламович, д-р техн. наук, профессор, Омск
4. Козлов Петр Алексеевич, д-р техн. наук, профессор, Москва
5. Комаров Константин Леонидович, д-р техн. наук, профессор, Новосибирск
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. Румянцев Сергей Алексеевич, д-р техн. наук, с.н.с., Екатеринбург
10. Сай Василий Михайлович, д-р техн. наук, профессор, зам. главного редактора, Екатеринбург
11. Смольянинов Александр Васильевич, д-р техн. наук, профессор, Екатеринбург
12. Туранов Халибулла Туранович, д-р техн. наук, профессор, Екатеринбург
13. Хоменко Андрей Павлович, д-р техн. наук, профессор, Иркутск
14. Шароглазов Борис Александрович, д-р техн. наук, профессор, Челябинск

### INTERNATIONAL EDITORIAL BOARD

1. Alexander Galkin, DSc, professor, editor-in-chief of the journal «Transport of the Urals», Ekaterinburg, Russia
2. Alexander Sladkowski, professor, Silesian University of Technology, Poland
3. Eduard Gorkunov, DSc, professor, academician of Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia
4. Axel Schmieder, DSc, Siemens AG, Industry Sector, Mobility Division, Transportation Engineering, Erlangen, Germany
5. Erkki Hamalainen, DSc, Aalto University School of Economics, Finland

### EDITORIAL BOARD

1. Alexandrov Alexander Ernstovich, DSc, associate professor, science editor, Ekaterinburg
2. Bulaev Vladimir Grigorievich, DSc, associate professor, Ekaterinburg
3. Galiev Ilkham Islamovich, DSc, professor, Omsk
4. Kozlov Petr Alexeyevich, DSc, professor, Moscow
5. Komarov Konstantin leonidovich, DSc, professor, Novosibirsk
6. Lapshin Vasily Fedorovich, DSc, professor, Ekaterinburg
7. Larin Oleg Nikolayevich, DSc, professor, Moscow
8. Ledyayev Alexander Petrovich, DSc, professor, Saint-Petersburg
9. Rumyantsev Sergey Alexeyevich, DSc, senior staff scientist, Ekaterinburg
10. Say Vasily Mikhaylovich, DSc, professor, deputy editor-in-chief, Ekaterinburg
11. Smolyaninov Alexander Vasiliyevich, DSc, professor, Ekaterinburg
12. Turanov Khabibulla Turanovich, DSc, professor, Ekaterinburg
13. Khomenko Andrey Pavlovich, DSc, professor, Irkutsk
14. Sharoglazov Boris Alexandrovich, DSc in Engineering, professor, Chelyabinsk



**ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ТРАНСПОРТА**

П. А. Козлов, В. С. Колокольников, Е. В. Копылова. Об имитационном моделировании и имитационных системах .....	3
Н. Ф. Сирина, С. С. Юшкова. Интегративное управление инфраструктурой в перевозочной деятельности железных дорог .....	7
Х. Т. Туранов, А. А. Гордиенко, Х. Х. Джалитов. О движении вагона на скоростных участках сортировочной горки .....	18
Н. А. Тушин, О. В. Осокин, А. В. Чумаков. Операционные циклы транспортно-экспедиторских предприятий .....	24
А. Л. Казаков, М. М. Павидис. Об одном подходе к моделированию работы сортировочных станций .....	29

**АВТОМАТИКА, ТЕЛЕМЕХАНИКА И СВЯЗЬ**

А. В. Горелик, В. И. Линьков, В. С. Дорохов, П. А. Невазов. Проблемы эффективного планирования капитального ремонта и модернизации объектов железнодорожной автоматики и телемеханики .....	36
--	----

**ВАГОНЫ И ВАГОННОЕ ХОЗЯЙСТВО**

А. В. Смольянинов. Методика инженерной оценки влияния базы вагона на его динамические параметры .....	41
А. В. Додонов, А. Е. Афанасьев, А. А. Хоменко, А. А. Иванов. Разработка и апробация методики ресурсных испытаний узла заделки стойки вагона-платформы для лесоматериалов .....	45
Ю. В. Савушкина, К. В. Кыак. Методика выбора оптимальных параметров саморазгружающихся бункерных вагонов .....	52

**ГРУЗОВЫЕ И ПАССАЖИРСКИЕ ПЕРЕВОЗКИ**

В. С. Колокольников, Т. С. Тунева. Обоснование эффективности увеличения ходовых скоростей грузовых поездов .....	61
К. И. Корниенко. Влияние изменения величины и длины противоуклона в конце пути сортировочного парка на качество его заполнения при расформировании составов .....	66

**ПУТЬ И ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО**

А. В. Петряев. Несущая способность железнодорожного земляного полотна, армированного геосинтетическими материалами .....	71
---	----

**ТРАНСПОРТНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ**

Л. В. Плотников, Н. И. Григорьев, Н. С. Кочев. Улучшение техничко-экономических показателей поршневых двигателей за счет применения эффекта эжекции в выпускной системе .....	76
---	----

**АВТОМОБИЛЬНЫЙ ТРАНСПОРТ**

С. Н. Кривцов, Т. И. Кривцова. Влияние добавки этилового спирта на топливную экономичность автомобиля с бензиновым двигателем .....	81
--	----

**ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ТЯГА**

А. П. Буйносов, С. Н. Антропов. Исследование волнообразного износа рельсов с учетом теории трения пары «колесо — рельс» .....	86
--	----

**ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ**

А. Б. Батрашов, А. В. Паранин, К. Г. Шумаков. Совершенствование математической модели расчета электротепловых процессов в контактной подвеске постоянного тока .....	90
Е. Ю. Салита, Т. В. Ковалева, А. В. Никонов. Результаты диагностики силовых вентилей преобразователей на тяговых подстанциях .....	97
Б. А. Аржанников, Т. С. Тарасовский. Методика расчета напряжений и токов преобразовательного трансформатора с тиристорно- реакторным переключателем устройством при пофазном регулировании напряжения .....	101

**ПОДВИЖНОЙ СОСТАВ И ТЯГА**

А. В. Галицкий, Л. А. Каштанов. Перспективы использования частных локомотивов на сети РЖД .....	108
--	-----

**АСПИРАНТСКАЯ ТЕТРАДЬ**

А. В. Никонов. Оценка влияния преобразователей напряжения СТАТКОМ на работу фазочувствительных защит контактной сети переменного тока .....	113
---	-----

**GENERAL TRANSPORT PROBLEMS**

P. A. Kozlov, V. S. Kolokolnikov, E. V. Kopylova. About simulation modeling and simulation systems .....	3
N. F. Sirina, S. S. Yushkova. Integrative management of infrastructure in railway transportation activities .....	7
Kh. T. Turanov, A. A. Gordienko, Kh. Kh. Dzhaliyov. On movement of car at speed sections of hump .....	18
N. A. Tushin, O. V. Osokin, A. V. Chumakov. Operating cycles of freight forwarding companies .....	24
A. L. Kazakov, M. M. Pavidis. On one approach to model operation of marshalling stations .....	29

**AUTOMATION, TELEMCHANICS AND COMMUNICATION**

A. V. Gorelik, V. I. Linkov, V. S. Dorokhov, P. A. Nevarov. Problems of efficient planning of railway automatics and telemchanics objects major overhaul and modernization .....	36
---	----

**RAILWAY CARS AND CARRIAGE EQUIPMENT**

A. V. Smolyaninov. Method for engineering assessment of truck-center spacing influence on dynamic parameters of a car .....	41
A. V. Dodonov, A. E. Afanasyev, A. A. Khomenko, A. A. Ivanov. Development and approbation of method for life tests of body post bearing joint of flat-car for lumber .....	45
Yu. V. Savushkina, K. V. Kyakk. Optimal parameters selection method for self-unloading hopper cars development .....	52

**CARGO AND PASSENGER TRANSPORTATION**

V. S. Kolokolnikov, T. S. Tuneva. Efficiency justification of freight trains running speed increase .....	61
K. I. Kornienko. Influence of sorting track opposite elevation length and incline change on it's occupancy quality during the process of breaking-up .....	66

**RAILWAY CONSTRUCTION AND RAILWAY TRACK**

A. V. Petryaev. Carrying capacity of railway formation armoured by geosynthetic materials .....	71
--	----

**TRANSPORT MACHINERY**

L. V. Plotnikov, N. I. Grigoryev, N. S. Kochev. Improvement of technical and economic indicators of piston engines due to application of ejection effect in exhaust system .....	76
--	----

**MOTOR TRANSPORT**

S. N. Krivtsov, T. I. Krivtsova. Influence of ethanol additives on fuel efficiency of gasoline vehicle .....	81
---	----

**ELECTRIC TRACTION**

A. P. Buynosov, S. N. Antropov. Study of rail corrugations considering «wheel — rail» friction theory .....	86
--	----

**ELECTRIC SUPPLY**

A. B. Batrashov, A. V. Pararin, K. G. Shumakov. Improvement of mathematical model for calculation of electrothermal processes in a DC catenary suspension .....	90
E. Yu. Salita, T. V. Kovaleva, A. V. Nikonov. Diagnostics results of converter power rectifiers at traction substations .....	97
B. A. Arzhannikov, T. S. Tarasovskiy. Method of calculating voltages and currents of converter transformer with thyristor-reactor switching device (TRSD) for phase-by-phase voltage control .....	101

**ROLLING STOCK AND TRACTION**

A. V. Galitskiy, L. A. Kashtanov. Prospects for the use of private locomotives on the JSC Russian Railways network .....	108
---	-----

**RESEARCH OF YOUNG SCIENTISTS**

A. V. Nikonov. Assessment of STATCOM voltage convertors influence on operation of alternating current catenary phase-sensitive protection .....	113
---	-----

УДК 656.078

**Петр Алексеевич Козлов, доктор технических наук, профессор, президент научно-производственного холдинга СТРАТЕГ, Москва, Россия,**

**Виталий Сергеевич Колокольников, кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление эксплуатационной работой» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,**

**Екатерина Витальевна Копылова, кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление транспортным бизнесом и интеллектуальные системы» Российского университета транспорта (МИИТ), Москва, Россия**

## ОБ ИМИТАЦИОННОМ МОДЕЛИРОВАНИИ И ИМИТАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

**Petr Alexeyevich Kozlov, DSc in Engineering, Professor, President of Research & Production Holding STRATEG, Moscow, Russia,**

**Vitaliy Sergeyevich Kolokolnikov, PhD in Engineering, Associate Professor, Operations Management Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,**

**Ekaterina Vitalyevna Kopylova, PhD in Engineering, Associate Professor, Transport Business Department, Russian University of Transport (RUT-MIIT), Moscow, Russia**

### About simulation modeling and simulation systems

#### Аннотация

Имитационное моделирование получает все большее признание в качестве основного метода расчета железнодорожных станций, полигонов и транспортных узлов. Для формирования методической базы по созданию имитационных систем, позволяющих моделировать работу железнодорожного транспорта, для оценки эффективности вариантов и разработки требований к имитационной экспертизе инвестиционных проектов совершенствования инфраструктуры железнодорожного транспорта введена в действие методика проведения исследований проектов развития железнодорожных станций и линий с использованием аппарата математического моделирования.

В статье обсуждается проблема корректности применения метода имитационного моделирования на железнодорожном транспорте. Комментируется ряд положений утвержденной ОАО «РЖД» методики имитационного моделирования станций и полигонов. Дается критическая оценка известных систем моделирования. Описываются возможные ошибки при использовании этого подхода.

**Ключевые слова:** моделирование, имитация, станция, полигон, адаптация, технология.

#### Summary

Simulation modeling is increasingly recognized as the main method of calculating railway stations, ranges and transport nodes. To create a methodological basis for the development of simulation systems that allow modeling the railway transport operation, to assess the effectiveness of railway infrastructure development options and to develop requirements for the simulation appraisal of investment projects aimed at development of railway infrastructure the method for conducting research of the railway stations and lines development projects using the apparatus of mathematical modeling is put into operation.

The paper discusses the problem of correctness of the simulation method application on the railway transport. A number of positions of the method of stations and ranges simulation approved by the JSC Russian Railways are commented. The authors give a critical evaluation of the known simulation systems and describe possible errors in using the simulation approach.

**Keywords:** modeling, simulation, station, range, adaptation, technology.

DOI: 10.20291/1815-9400-2019-1-3-6

**Р**ешить амбициозные задачи, поставленные перед экономикой страны, невозможно без интенсивного развития транспорта. Именно поэтому 30 сентября 2018 г. правительство Российской Федерации утвердило шестилетний план модернизации и расширения транспортной инфраструктуры с выделенными средствами и заданными конечными параметрами, такими как скорость пропуска определенных потоков и пропускная способность по направлениям. План весьма затратный, что остро ставит проблему корректности методов расчета на транспорте. В ряде публикаций [1–3] было показано, что в основной инструкции по расчету транспортных объектов [4] важные исходные положения не вполне верны, хотя логически и правдоподобны. Значит, и расчетные формулы имеют существенные ошибки. Это долгое время не замечалось, поскольку не было адекватного аппарата проверки.

Сегодня имитационное моделирование все более признается основным методом расчета железнодорожных станций, полигонов и транспортных узлов, в том числе и руководителями ОАО «РЖД» (рис. 1), чему посвящен целый ряд публикаций [5–7].

В прошлом году коллектив авторов, куда входили ученые УрГУПС и научной фирмы «Транспортный алгоритм», разработал типовую технологию (методику) расчета транспортных объектов методом имитационного моделирования, в которой сформулированы требования к имитационным моделям и имитационным системам [8]. Методика основана на большом опыте использования имитационных систем ИСТРА и ИМЕТРА, которые прошли государственную регистрацию (рис. 2), и утверждена ОАО «РЖД».

3

Январь – Март

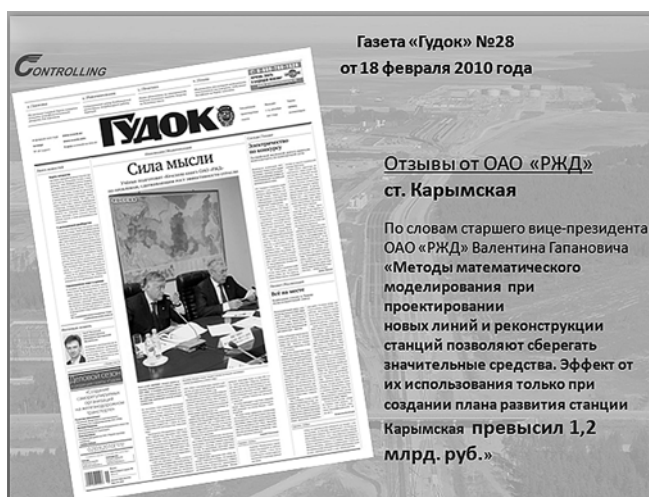


Рис. 1. Оценка результатов моделирования с системой ИСТРА



Рис. 2. Регистрация систем моделирования

Название операции	Приоритет
Прием поезда	6
Прием поезда на сдвоенный путь	6
Уборка поездного локомотива	4
Техническое обслуживание локомотива	4
Осмотр по приему	4
Закрепление состава	4
Смена бригады	4
Формирование подачи	3
Формирование подачи (с маршрутами)	3
Подача на грузовой фронт	3
Подача на минимальную/максимальную группу	3
Расстановка по фронтам	2
Расстановка по фронтам (с назначением специализации)	2
Расстановка по фронтам (последовательная с назначением специализации)	2
Следование локомотива резервом	3
Выгрузка вагонов с перестановкой	1
Выгрузка вагонов	1
Уборка с грузового фронта	3
Уборка с грузовых фронтов	3
Приемо-сдаточные операции	2
Погрузка вагонов	1
Погрузка вагонов с перестановкой	1
Оформление документов	1
Очистка вагонов	1
Размораживание вагонов	1
Перестановка	2
Перестановка на минимальную/максимальную группу	2
Полурейс локомотива резервом	3
Расформирование	3
Расформирование (с манипуляторами)	3

Рис. 3. Перечень типов операций в системе ИСТРА (вырезка)

Однако документ этот малодоступен, а путаница в использовании терминов «имитационная модель» и «имитационная система» настолько велика, что представляется нелишним еще раз поговорить о них. Это может быть полезным и проектным организациям, и потенциальным разработчикам новых имитационных систем. В статье приводятся выдержки из методики с необходимыми пояснениями.

«Настоящая методика определяет единые требования к разработке имитационных моделей, применяемых для проведения детальной технологической оценки проектов развития станций и линий; устанавливает критерии детализации этих моделей при исследовании железнодорожных объектов, перечень и требования к используемой исходной информации, порядок проведения имитационной экспертизы, а также требования к результатам расчетов» [8, с. 4]. Следовательно, заказчики, т.е. подразделения ОАО «РЖД», должны опираться на нее при заключении договоров на имитационное моделирование.

Уточним понятия.

*Имитационная модель* — это когда все процессы протекают во времени и во взаимодействии.

*Имитационная система* — это аппарат для построения имитационных моделей.

Уточнения важные. Совсем недавно на одном из совещаний в присутствии руководителей ОАО «РЖД» директор ВНИИЖТ утверждал, что разработанная в институте система «Эльбрус» есть имитационная модель для расчета пропускной способности на железнодорожном транспорте.

Вот что говорится об этом в методике: «Основой АПК «Эльбрус» является математическая модель, которая позволяет автоматически строить график движения поездов. Система «Эльбрус» не относится к имитационным системам, позволяющим моделировать работу станций. В системе «Эльбрус» процессы расформирования, накопления, формирования и др. не отображаются» [8, с. 64].

Но как строится график? Сначала на всем полигоне прокладываются нитки для пропуска пассажирских поездов, потом — для тяжеловесных и в конце — для обычных грузовых. Где же тут все процессы одновременно и во взаимодействии? Станции не отображаются вообще. А опыт показывает, что примерно на половине промежуточных станций поезда стоят по неприятию техническими станциями.

Имитационная модель должна максимально полно отображать все стороны моделируемого объекта — структуру, технологию, случайные процессы и управление. Для станций — максимально подробно, для больших полигонов — укрупненно, но полно.

В подробной имитационной модели технологический процесс должен отображаться как последовательность технологических операций со всеми возможными вариантами выполнения, с перечнем участвующих устройств и с параметрами их использования в каждом варианте [8, с. 32].

В системе ИСТРА, например, отображается несколько десятков типов технологических операций (рис. 3).

Сейчас наиболее активно продвигаются две универсальные системы моделирования — Arena и Anylogic. Вот что говорится о них в методике: «система Arena обладает развитым аппа-

ратом для моделирования систем массового обслуживания» [8, с. 61], «российская система моделирования Anylogic имеет много общего с системой Arena, но более развита, особенно в области динамической демонстрации процесса» [8, с. 62], «общим недостатком всех систем массового обслуживания является то, что движущаяся единица абстрактного потока не может отобразить сложную технологию работы железных дорог, где каждая операция имеет свой алгоритм выполнения» [8, с. 61].

То есть движется абстрактная единица потока по абстрактной схеме, натывается на препятствие — образуется очередь. И эта единица претендует на отображение сложного технологического процесса?..

Еще одно важное положение моделирования, далеко не всегда принимаемое во внимание, — **адаптивность**. «Имитационная система должна быть ориентирована на использование **технологом**, а не программистом. Железнодорожная станция, узел или полигон работают не по некоторой «стандартной» технологии, предусмотренной технологическим процессом, а по управляемой диспетчерами — гибкой и **адаптивной**» [8, с. 12].

Это весьма существенное требование. По нашему многолетнему опыту, если в модели не отображена адаптивность, то потеря пропускной способности составит на классической сортировочной станции 8–10 %, грузовой — 25–30 %, портовой и промышленной — 35–40 %.

Поэтому **технолог моделирования** — особая профессия. Он должен знать, как диспетчер оценивает ситуацию, как организует гибкую, адаптивную работу и как это можно реализовать в модели с использованием возможностей имитационной системы. По нашему опыту, на построение модели крупной станции с помощью системы ИСТРА идет 10–15 % времени (подсистема автоматизированного построения формирует сама 99 % массива исходной информации из 600–700 тыс. строк), а остальное — на воспроизведение адаптивности.

Есть еще достаточно активно продвигаемое направление — мультиагентные системы. По одной из них в последние годы заключаются многомиллионные контракты. Из методики: «Мультиагент-

ные системы (NetLogo, VisualBots, REPAST) состоят из нескольких взаимодействующих агентов. Для них характерны автономность (агенты действуют независимо), ограниченность представления (ни у одного из агентов нет представления о всей системе), децентрализация (нет агентов, управляющих всей системой). При указанных характеристиках сложно представить применение мультиагентных систем для моделирования работы объектов железнодорожного транспорта (станций, узлов, полигонов) из-за несоответствия их принципам организации работы железных дорог» [8, с. 62].

Появление этого подхода связано с попыткой объяснить возникновение разумной организации у муравьев и пчел при отсутствии управляющего центра. При чем здесь железнодорожный транспорт со сквозным диспетчерским управлением?!

Необходимо затронуть и такой важный аспект: модель должна быть максимально прозрачной, а следовательно, убедительной для заказчика. В рыночной экономике заказчиком может быть не

транспортник. Стандартная фраза: «Откуда я знаю, что вы заложили в модель?» А ведь принимаются решения, связанные с миллиардными затратами.

Приведем один пример. Несколько лет назад к нам обратился замдиректора по транспорту Енакиевского металлургического завода с такой проблемой: объем работы увеличивается, а транспорт развит плохо — короткие пути, кривые, большие уклоны. Необходимо развитие, а для этого нужна территория. Но владелец завода — один олигарх, а собственник территории — другой. И последний резко поднял цену. Владелец завода сказал — и так справитесь. Замдиректора (как убедительно доказать?), обехав все институты, обратился к нам, и результатами нашей работы остался очень доволен.

Но, подчеркнем, имитационная система должна иметь соответствующие возможности.

Конечно, должна быть нарисована активная схема путевого развития с указанием длины и назначения путей, терминалов и пр. (рис. 4).

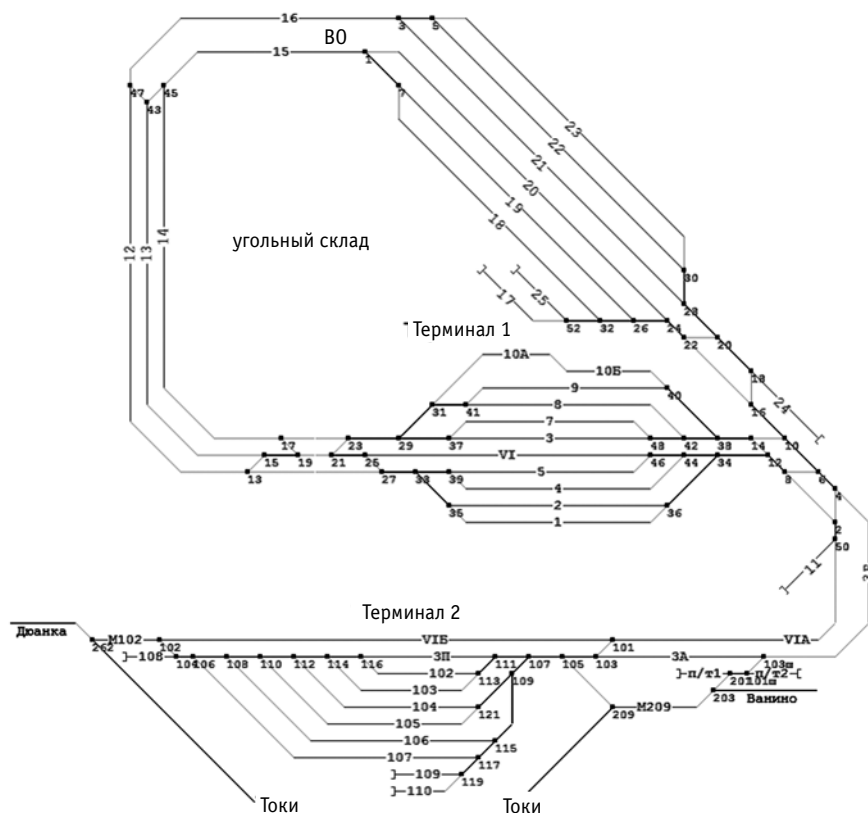


Рис. 4. Схема транспортного комплекса АО «Дальтрансуголь»

Схему технологического процесса лучше представлять в виде последовательности операций с вариантами их выполнения (рис. 5).

Вместе с тем важно показать весь процесс в динамике, чтобы было видно выполнение каждой операции (рис. 6 и 7).

В целом утвержденная ОАО «РЖД» методика дает возможность более корректно использовать разработки в области имитационного моделирования при оценке расширения и модернизации транспортной инфраструктуры, определять оптимальный вариант для ее перспективного развития и тем самым экономить инвестиционные ресурсы.

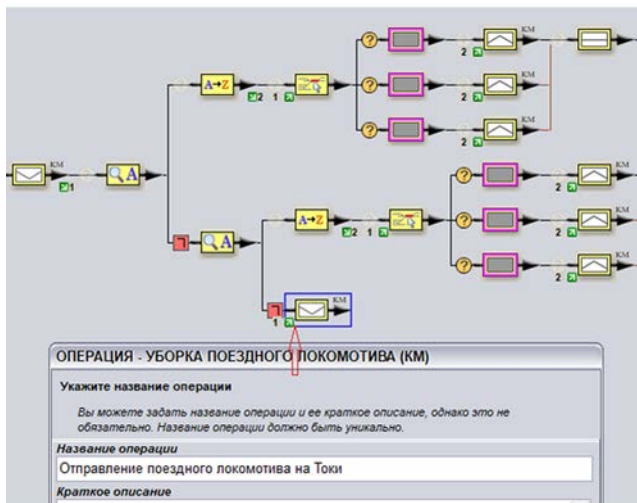


Рис. 5. Схема технологического процесса

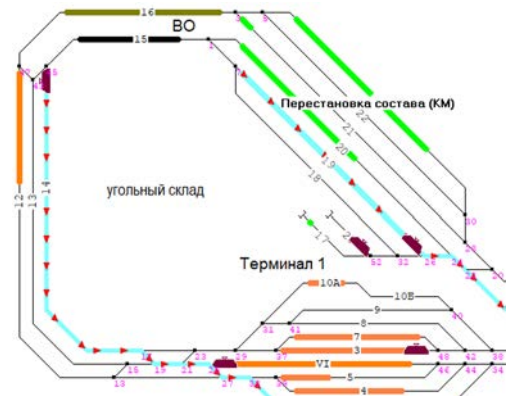


Рис. 6. Работа модели в динамике (вырезка)

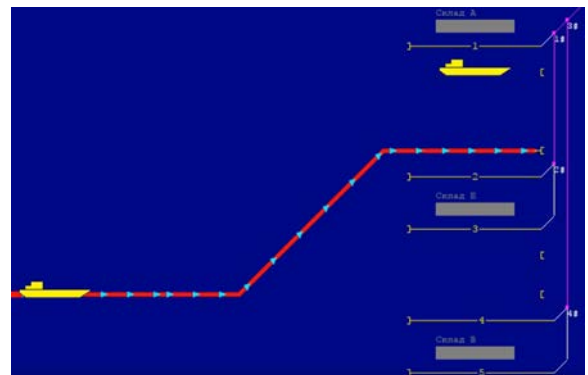


Рис. 7. Динамическое воспроизведение работы модели припортового транспортного узла (вырезка)

## Литература

1. Козлов П. А. О методах расчета систем железнодорожного транспорта // Железнодорожный транспорт. 2014. № 12. С. 28–32. ISSN 0044–4448.
2. Козлов П. А., Владимирская И. П., Осокин О. В. Закономерности структурного взаимодействия в транспортных системах // Транспорт Урала. 2010. № 3 (26). С. 25–28. ISSN 1815–9400.
3. Козлов П. А., Колокольников В. С., Тушин Н. А. О технологии расчета железнодорожных станций // Железнодорожный транспорт. 2017. № 6. С. 42–46. ISSN 0044–4448.
4. Инструкция по расчету наличной пропускной способности железных дорог / ОАО «РЖД». М.: Техинформ, 2011. 289 с.
5. Технология макромоделирования транспортных узлов / П. А. Козлов, Н. А. Тушин, В. Ю. Пермикин, И. Г. Слободянюк // Транспорт Урала. 2014. № 3 (42). С. 3–6. ISSN 1815–9400.
6. Мишарин А. С., Козлов П. А. Имитационная экспертиза проектов развития транспортной инфраструктуры // Железнодорожный транспорт. 2014. № 4. С. 52–54. ISSN 0044–4448.
7. Козлов П. А., Набойченко И. О., Пермикин В. Ю. От Кузбасса до Усть-Луги — единая модель // Железнодорожный транспорт. 2016. № 3. С. 26–29. ISSN 0044–4448.
8. Методика проведения исследований проектов развития железнодорожных станций и линий с определением «узких мест», влияния на пропускные и перерабатывающие способности, рациональной технологии и прогнозируемых эксплуатационных показателей с использованием аппарата математического моделирования: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 09.01.2018 г.

## References

1. Kozlov P. A. On the methods of railway transport systems calculation [O metodakh rascheta sistem zheleznodorozhnogo transporta] // Railway Transport. 2014. No. 12. Pp. 28–32. ISSN 0044–4448.
2. Kozlov P. A., Vladimirskaia I. P., Osokin O. V. Principles of structural interaction in transport systems [Zakonornosti strukturnogo vzaimodeystviya v transportnykh sistemakh] // Transport of the Urals. 2010. No. 3 (26). Pp. 25–28. ISSN 1815–9400.
3. Kozlov P. A., Kolokolnikov V. S., Tushin N. A. On the technology of calculating of railway stations [O tekhnologii rascheta zheleznodorozhnykh stantsiy] // Railway Transport. 2017. No. 6. Pp. 42–46. ISSN 0044–4448.
4. Instruction on calculation railways capacity [Instruktsiya po raschetu nalichnoy propusknoy sposobnosti zheleznnykh dorog] / JSC Russian Railways. Moscow: Tekhinform, 2011. 289 p.
5. Transport hub macromodelling technology [Tekhnologiya makromodelirovaniya transportnykh uzlov] / P. A. Kozlov, N. A. Tushin, V. Yu. Permikin, I. G. Slobodanyuk // Transport of the Urals. 2014. No. 3 (42). Pp. 3–6. ISSN 1815–9400.
6. Misharin A. S., Kozlov P. A. Simulation examination of transport infrastructure development projects [Imitatsionnaya ekspertiza projektov razvitiya transportnoy infrastruktury] // Railway Transport. 2014. No. 4. Pp. 52–54. ISSN 0044–4448.
7. Kozlov P. A., Naboychenko I. O., Permikin V. Yu. From Kuzbass to Ust-Luga — a unique model [Ot Kuzbassa do Ust-Lugi — edinaya model'] // Railway Transport. 2016. No. 3. Pp. 26–29. ISSN 0044–4448.
8. Method for conducting research of railway stations and lines development projects with determination of «bottlenecks», influence on capacity, rational technology and forecasted operating standards using apparatus of mathematical modeling [Metodika provedeniya issledovaniy projektov razvitiya zheleznodorozhnykh stantsiy i liniy s opredeleniem «kuzkikh mest», vliyaniya na propusknye i pererabatyvayushhie sposobnosti, ratsional'noy tekhnologii i prognoziруemykh ekspluatatsionnykh pokazateley s ispol'zovaniem apparata matematicheskogo modelirovaniya]: approved by JSC Russian Railways dated 09.01.2018.

УДК 656.078.14

**Нина Фридриховна Сирина, доктор технических наук, профессор кафедры «Вагоны» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,**  
**Светлана Сергеевна Юшкова, аспирант кафедры «Вагоны» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия**

## ИНТЕГРАТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ИНФРАСТРУКТУРОЙ В ПЕРЕВОЗОЧНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

**Nina Fridrikhovna Sirina, DSc in Engineering, Professor, Railway Cars Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,**  
**Svetlana Sergeevna Yushkova, postgraduate student, Railway Cars Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia**

### Integrative management of infrastructure in railway transportation activities

#### Аннотация

Рассмотрены современный уровень состояния инфраструктуры, динамичность и структурные преобразования железнодорожного транспорта. Исследовано понятие «инфраструктура» применительно к условиям нестабильности объемов эксплуатационной работы железных дорог, предложен термин «адаптивная инфраструктура». Приведен механизм адаптации инфраструктуры, настроенный на трансформацию и эффективное использование потенциала предприятий ОАО «РЖД», обслуживающих железнодорожные линии. Рассмотрена методика корпоративной координации адаптивной инфраструктуры на полигоне железных дорог, позволяющая определять необходимые вложения в развитие инфраструктуры, организацию и выполнение ключевых показателей процесса транспортной перевозки на железнодорожной сети.

**Ключевые слова:** инфраструктура, железнодорожный транспорт, интегративное управление, механизм адаптации, методика корпоративной координации, интегральная оценка производственной деятельности.

#### Summary

The paper discusses the current level of infrastructure state, dynamism and structural transformations of railway transport. In the conditions of instability in the volume of operational work of railways, the term «infrastructure» has been investigated. As a result of the investigation, the authors suggested the term «adaptive infrastructure». The authors also proposed the infrastructure adaptation mechanism that is adjusted for transformation and effective use of potential of the JSC Russian Railways enterprises serving railway lines. In conclusion, the paper considers a method of corporate coordination of adaptive infrastructure at the level of a railway range, which enables to determine required investments in infrastructure development, organization and implementation of transportation process key indicators on the railway network.

**Keywords:** infrastructure, railway transport, integrative management, adaptation mechanism, corporate coordination method, integrated assessment of production activities.

DOI: 10.20291/1815-9400-2019-1-7-17

**Р**еструктуризация транспортного комплекса Российской Федерации находится в завершающей стадии, задача разгосударствления его производственных мощностей с акционированием и приватизацией выполнена практически в полном соответствии с рекомендациями Всемирного банка, Международного валютного фонда и других организаций. Этот процесс значительно повлиял на условия, технологию и эффективность работы всей транспортной отрасли страны. Вместе с тем повышение издержек, рост травматизма и аварийности в сочетании с недопустимо высоким износом технических средств инфраструктуры и подвижного состава указывают, что транспорт до сих пор не вступил в стадию устойчивого развития.

Деятельность транспортного комплекса России формируется на основе железных дорог, доля которых составляет по среднегодовой численности работников 2,2 % (не менее 1,56 млн чел.), ВВП — 4,9 %, стоимости основных производственных фондов — 14 %, международной эксплуатационной длине — 7 % (более 85 тыс. км), мировому пассажиро- и грузообороту железнодорожной сети — 15 и 24 % соответственно [1].

Сегодня, как и с момента возникновения российских железных дорог, главной проблемой остается хронический недостаток или полное отсутствие технологических инфраструктурных резервов, что обусловлено предельно высокой загрузкой сети и ее отрицательным влиянием на качество обслуживания клиентуры. Существующий мотивационный механизм развития и модернизации транспортной инфраструктуры формирует необходимые инвестиции государственным бюджетом и частным сектором, будучи важнейшим фактором в обеспечении конкурентоспособности и долгосрочного роста национальной экономики.

Инфраструктура железнодорожного транспорта общего пользования (далее — инфраструктура) как один из основных элементов транспортной инфраструктуры представляет собой «технологический комплекс, включающий в себя



железнодорожные пути общего пользования и другие сооружения, железнодорожные станции, устройства электроснабжения, сети связи, системы сигнализации, централизации и блокировки, информационные комплексы и систему управления движением и иные обеспечивающие функционирование этого комплекса здания, строения, сооружения, устройства и оборудование» [2]. Ее владельцем является «юридическое лицо или индивидуальный предприниматель, имеющие инфраструктуру на праве собственности или на ином праве и оказывающие услуги по ее использованию на основании соответствующего договора» [2]. Общие принципы предоставления недискриминационного доступа перевозчиков к инфраструктуре определены в [3] на условиях публичного договора использования, заключаемого между владельцем инфраструктуры и перевозчиком [4].

Что касается понятия «железнодорожные пути общего пользования», определенного в [2] как «железнодорожные пути на территориях железнодорожных станций, открытых для выполнения операций по приему и отправлению поездов, приему и выдаче грузов, багажа, грузобагажа, порожних грузовых вагонов, по обслуживанию пассажиров и выполнению сортировочных и маневровых работ, а также железнодорожные пути, соединяющие такие станции», то в законодательстве сопредельных государств оно трактуется по-иному. Например, в ст. 1 законов республик Узбекистан и Беларусь «О железнодорожном транспорте» [5, 6] железнодорожными путями общего пользования считаются такие, которые расположены «в полосе отвода железной дороги и на территории железнодорожных станций», при этом понятие «инфраструктура» не приводится вообще, а в законодательстве Казахстана под инфраструктурой понимаются магистральные железнодорожные линии [7].

В результате разделения функций хозяйственного управления и государственного регулирования основным владельцем железнодорожной инфраструктуры Российской Федерации является ОАО «РЖД» (85513 км), осуществляющее централизованное диспетчерское управление перевозочным процессом в целом [8]. Перевозки железнодорожным транспортом общего пользования организуют перевозчики, которые в наибольшей степени используют инфраструктуру для достижения главной цели — «доставить пассажира, вверенный... груз, багаж, грузобагаж или не принадлежащий им порожний грузовой вагон... из пункта отправления в пункт назначения» [2]. Поэтому перевозчикам предоставляется право использования систем управления, информационных комплексов и других объектов железнодорожных станций, в том числе систем сигнализации, централизации и блокировки, сетей связи, железнодорожного пути и устройств электроснабжения. Вместе с тем в предлагаемом [2] понятии «инфраструктура» не приводятся сведения о работе вагонных, локомотивных депо и других сервисно-ремонтных организаций, обеспечивающих безопасность и бесперебойность перевозочного процесса. Анализ законодательных документов [2, 9, 10] позволяет сделать вывод, что понятие «инфраструктура» не включает в себя железнодорожный подвижной состав, использование которого есть оказание услуги перевозчику владельцем подвижного

состава или инфраструктуры. Таким образом, эксплуатационная работа железной дороги разграничивается наличием договоров об оказании услуг по использованию: железнодорожной инфраструктуры (между перевозчиком и владельцем инфраструктуры) и железнодорожного подвижного состава (между оператором железнодорожного подвижного состава и перевозчиком), направленных на осуществление долгосрочных перевозок.

В [11] отмечается, что инфраструктура используется естественными монополиями как технологические комплексы производственных систем, непосредственно связанные с земельным участком. Она, будучи неотъемлемой частью транспортного комплекса страны, состоит из «железнодорожных станций и вокзалов, транспортных терминалов, развязок и т.д.» [12], владельцем которых является ОАО «РЖД», и представляет собой самостоятельный объект гражданских прав в виде имущественного комплекса для осуществления предпринимательской деятельности [13].

В работе [14] понятие «инфраструктура» разделяется на инфраструктурные сети, деятельность по их эксплуатации и зависящие от пропускных способностей инфраструктурные рынки, а в [15] — на магистральные линии и участки путей необщего пользования для формирования дифференцированных тарифов. Поэтому сеть железных дорог общего пользования можно считать принадлежащую российским владельцам совокупность сопряженных инфраструктур, расположенных на территории нашей страны и иностранных государств. Ее пропускная способность формируется по утвержденному в графике максимальному количеству пар поездов в сутки и определяется по методике [16] для каждого расчетного железнодорожного участка, к инфраструктуре которого предъявляются единые требования при строительстве, реконструкции, примыкании и эксплуатации. Эти требования составляют основу для разработки нормативов содержания и устройства инфраструктурных объектов в зависимости от:

применяемых типов конструкций железнодорожных линий (верхнего строения пути, искусственных сооружений, устройств электроснабжения и т.д.) и условий их эксплуатации;

оснащения современными системами управления и контроля железнодорожных линий;

расходов на проведение технического обслуживания и ремонтных работ.

В работе [17] определено, что «железнодорожная линия — комплекс путей, сооружений и устройств на одном или нескольких железнодорожных участках, предназначенный для железнодорожных сообщений, включающий подсистемы: железнодорожного пути, станционную, железнодорожного электроснабжения, железнодорожной автоматики и телемеханики, железнодорожной электросвязи, по которым формируются данные статистической отчетности». При этом есть и объекты железнодорожного транспорта, которые ограничены в обороте [18, 19], — объекты локомотивного и вагонного хозяйства, малоинтенсивные, магистральные, железнодорожные линии, станции, участки, имеющие оборонное значение, а также имущество и объекты мобилизационного назначения, предназначенные непосредственно для выполнения аварийно-восстано-

вительных работ. Они обслуживаются владельцем, который передает их перевозчику в пользование и использует в собственных целях. Поэтому современное формирование требований к конструкциям инфраструктуры строится с учетом приоритетного вида перевозок на основе нормирования расходов по основным видам деятельности при содержании и эксплуатации железнодорожных линий с использованием дифференцированной технологии [17].

Объем предоставляемых инфраструктурных услуг рассматривается как стоимость использования инфраструктуры, оплаченная перевозчиком [20], а ограничение пропускной способности инфраструктуры — как неспособность владельца предоставить инфраструктуру или оказать транспортную услугу перевозчику из-за занятости железнодорожных путей либо их использования для иных целей. Таким образом, в зависимости от приоритетности перевозки (восстановление движения поездов, воинские, пассажирские перевозки и т.д.) владелец оказывает услуги по использованию инфраструктуры [21].

В работе [22], наоборот, разделяется не транспортная перевозка, а перевозимые грузы на внеочередные и отправляемые на общих основаниях. В случаях, когда одновременно поступают идентичные запросы по использованию инфраструктуры, относящиеся к перевозкам одной очередности, владелец инфраструктуры рассматривает их по мере поступления с учетом пропускной способности железнодорожных путей.

Подводя итог, отметим, что в основном под железнодорожной линией понимается транспортная инфраструктура, применительно к которой необходимо привязывать не только земельный участок с недвижимым имуществом, но и деятельность железнодорожных предприятий, социальных и государственных учреждений. В соответствии с объемами перевозок, состоянием железных дорог и требованиями, предъявляемыми к их содержанию и использованию, целесообразно понятие инфраструктуры [2] дополнить следующим определением: «Адаптивная инфраструктура железнодорожного транспорта — инфраструктура железнодорожного транспорта общего пользования, способная вне зависимости от геомодалного направления перевозочной деятельности оперативно подстраиваться под изменения объемов эксплуатационной работы железных дорог на дифференцированных принципах технологии содержания и использования железнодорожных линий». Это определение учитывает лишь некоторые моменты инфраструктурной услуги, оказываемой перевозчику в современных условиях работы железнодорожного транспорта.

С 2003 г. реформирование отрасли повлияло на децентрализацию в управлении железнодорожным процессом и привело к появлению множества транспортных организаций. Существующая в ОАО «РЖД» система управления не в полной мере позволяет наладить выполнение предусмотренных Транспортной стратегией [12] инвестиционных проектов на железнодорожной инфраструктуре, а выделение путевой инфраструктуры в качестве самостоятельного монопольного сектора требует пересмотра технологических процессов. Одновременная реализация структурной реформы, государственной программы развития финансовой стабильности и конкурентоспособ-

ности транспортных перевозок в сочетании с новой моделью рынка и переходом к региональным дирекциям инфраструктуры необходима для своевременной адаптации железных дорог к рыночной экономике.

Проводимая в ОАО «РЖД» целенаправленная деятельность по организации и планированию движения поездов на полигонах сети (вместо региональных принципов управления) направлена на рост грузо-, пассажирооборота и качественных показателей эксплуатационной работы. В 2017 г. пилотным проектом сформирован Восточный полигон, состоящий из подразделений производственного блока ОАО «РЖД» — Забайкальской, Красноярской, Восточно-Сибирской и Дальневосточной железных дорог. Единое управление поездопотоками на полигоне осуществляется единым диспетчерским центром управления перевозками (ЕДЦУП). Это позволяет ускорить пассажирское сообщение, выстроить оптимальную логистическую технологию управления грузовыми операциями и продвижением грузопотоков к межгосударственным стыковым пунктам, морским портам, стабилизировать сроки доставки грузов, повысить эффективность перевозочного процесса, увеличить участковую скорость, сократить число «отставленных» от движения поездов, снизить одиночный пробег локомотивов, время нахождения поездов и локомотивов на технических станциях.

Однако основа полигонной технологии (единые принципы управления вагонным, локомотивным парком и инфраструктурой) требует модернизации всего транспортного комплекса страны. Под его нужды необходимо формировать программы развития отдельных подразделений ОАО «РЖД», совершенствовать систему управления производственной деятельностью, пересматривать нормативно-правовое регулирование технологических процессов, регламентов и механизмов взаимодействия, а также устранять «барьерные места» на железнодорожных линиях (рис. 1).

Инфраструктура железнодорожных линий (ИЖДЛ), являясь капиталоемкой составляющей железнодорожного транспорта, несет наибольшие финансовые и технические риски, рамочно ограничиваясь безопасностью движения поездов в сочетании со сложностью внедрения изменений в технологический процесс.

Неравномерная экономическая эффективность использования (себестоимость содержания) инфраструктуры обуславливает пути сокращения эксплуатационных расходов ОАО «РЖД» в объемах, предъявляемых потребителями. При этом поиск оптимальных решений должен полностью учитывать перспективную значимость инфраструктуры железных дорог (по специализации перевозок) для региональных социально-экономических структур.

В полигонной системе сохраняется трехуровневое управление перевозочным процессом, предусматривающее принятие наиболее ответственных решений в связке центрального и регионального уровней для распределения погрузочных ресурсов, регулирования локомотивного парка, предоставления окон на инфраструктуре и т.д. При этом возможная несогласованность сказывается на всех уровнях, и ее устранение требует разработки механизмов, обеспечивающих бесперебойную производственно-хозяйственную деятельность железных дорог.

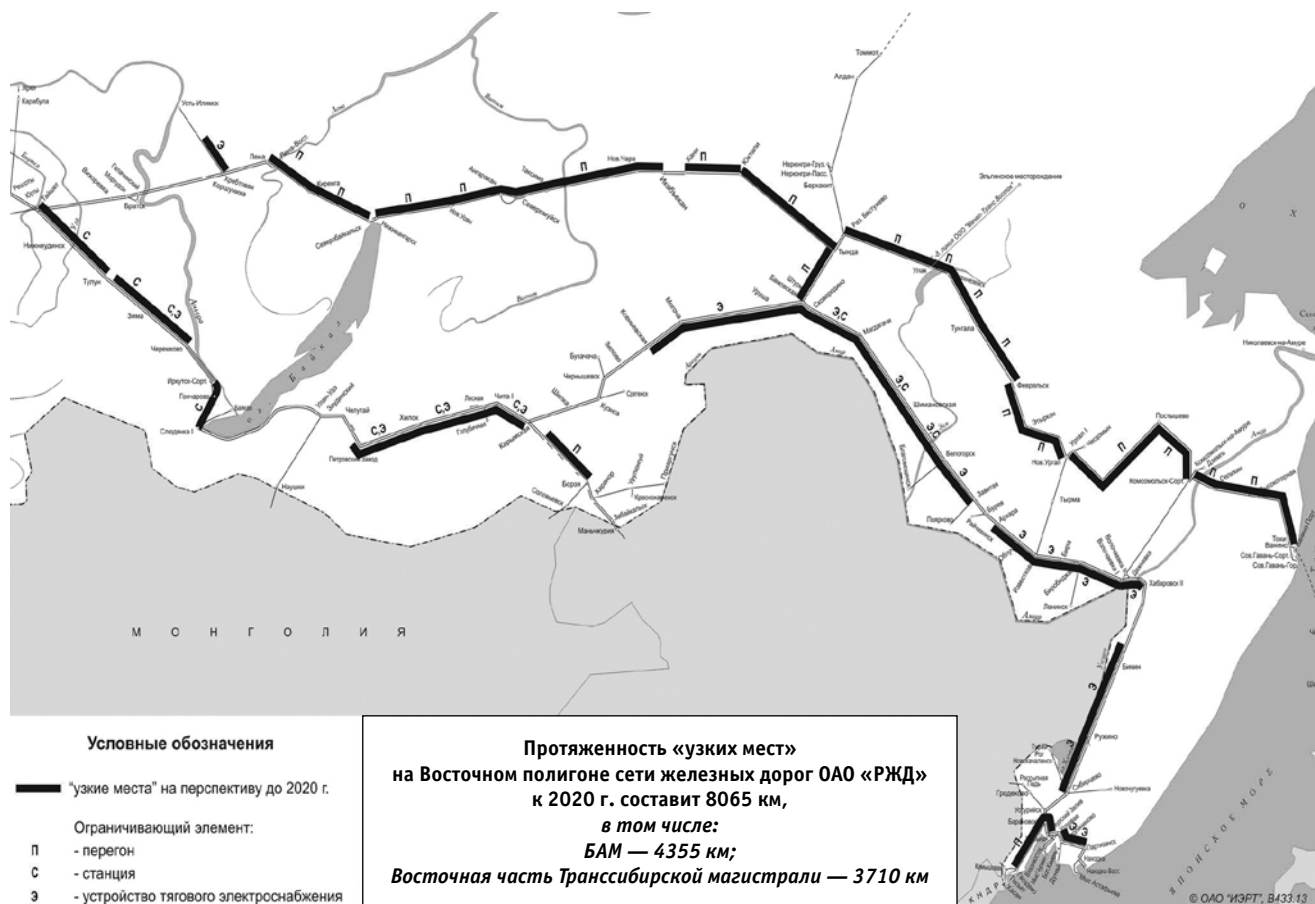


Рис. 1. «Барьерные места» Восточного полигона по оценке ОАО «ИЭРТ»

Механизм адаптации инфраструктуры (МАИ) — это структура, построенная на единой нормативно-методической основе и состоящая из процедур прогнозирования, регулирования, планирования и стимулирования эффективной эксплуатации ИЖДЛ. Прогнозирование (оценка  $a_i$ ) организует проведение процедур оценки состояния, учета, анализа, перспектив развития и технико-экономического потенциала ИЖДЛ с установлением основных показателей производства. Планирование (план  $x_i$ ) обеспечивает формирование плановых заданий использования ИЖДЛ. Регулирование распределяет ресурсы ( $u_i, u \in U \subset R^e$ ) на содержание ИЖДЛ. Используя функции контроля за деятельностью ИЖДЛ, процедура стимулирования (стимул  $\varphi_i$ ) отвечает за выявление отклонений от утвержденных норм и нормативов для упорядочивания работы сотрудников подразделений, обслуживающих ИЖДЛ.

Формирование МАИ ИЖДЛ строится как система трехуровневого управления, состоящая из оперативного уровня (исполнителя), корпоративного уровня (центра) и стратегического уровня (управляющего). Для ее наполнения экспертными решениями и совершенствования управления инфраструктурой, тяговыми ресурсами и вагонным парком создается Единый центр управления инфраструктурой (ЕЦУИ). Он осуществляет мониторинг и принятие решений по эксплуа-

тации и содержанию инфраструктуры структурными подразделениями каждого уровня управления в установленных финансовых лимитах.

ЕЦУИ постоянно взаимодействует с Дирекцией управления движением (Д), Территориальным центром фирменного транспортного обслуживания (ТЦФТО), Центром управления тяговыми ресурсами (ЦУТР), железной дорогой (в границах полигона) по результатам мониторинга использования (загрузки) инфраструктуры для планирования перевозок в текущем времени. Эти взаимоотношения строятся на теории активных систем и позволяют с помощью интегральной оценки функционирования ЕЦУИ проанализировать использование инфраструктуры.

Как показали исследования [23], эффективное использование инфраструктуры основано на дисциплинированности действий по организации перевозочного процесса (рациональное использование тяговых ресурсов и железнодорожного пути, решение проблем несбалансированной загруженности сети на уровне субъекта Федерации).

Управляющий — полигон или железная дорога — организует использование инфраструктуры на основе процедур выделения ресурсов  $Q_s$  и стратегического прогнозирования  $I_s$  с учетом влияния внешней среды (стохастической помехи

$\xi \in \Theta \subset R^k$ ). ЕЦУИ является центром управления исполнителем через адаптивное прогнозирование, распределение ресурсов, планирование и стимулирование выполнения нормативов. Исполнитель — это подразделение, обслуживающее инфраструктуру по хозяйствам: локомотивному (ТЧЭ), вагонному (ВЧДЭ), пути (ПЧ, ПЧИССО), энергообеспечения (электрификации и электроснабжению) (ЭЧ), автоматики и телемеханики (ШЧ), эксплуатации и ремонта путевых машин (ПМС) (рис. 2).

Итоговые показатели деятельности ИЖДЛ, имеющей определенный потенциал  $p_t = (u_t, \xi)$ , являются выходом  $y$ . Сравнивая запланированный  $x_t$  и фактический  $y_t$  выходы, ЕЦУИ устанавливает стимул (допускаемые скорости движения поездов, периодичность ремонта, затраты на контингент) для ИЖДЛ:

$$\varphi_t = f(x_t, y_t), \varphi_t \in R^1, \quad (1)$$

где  $f$  — непрерывная функция стимулирования.

В свою очередь, ИЖДЛ в периоде  $\tau$  стремится увеличивать стимул, поэтому ее целевая функция определяется по формуле

$$V_t = \sum_{\tau=t}^{t+T} \rho^{\tau-t} \varphi_\tau, \quad (2)$$

где  $\rho$  — коэффициент дисконтирования,  $0 < \rho < 1$ ;

$T$  — дальновидность ЕЦУИ, исчисляемая в периодах времени.

Множество выходов  $y_t^*$  для достижения максимального результата ИЖДЛ определяется решением задачи оптимизации в векторном пространстве  $R(\Sigma, p_t) = \arg \max_{y_t \in Y(p_t)} V(x_t, y_t)$ .

Задачей оптимального синтеза МАИ является максимизация целевой функции всей системы  $\psi(x_t, u_t, y_t)$  с учетом неопределенности потенциала и выхода  $R(\Sigma) = \min_{\xi \in \Theta} \min_{y \in R(\Sigma(p))} \psi(x_t, u_t, y_t)$  [24].

Вследствие этого не исключен сценарий, при котором ЕЦУИ в условиях осведомленности об установленном результате ИЖДЛ не гарантирует прогрессивность МАИ, т.е. потенциал ИЖДЛ будет использоваться не в полной мере, что отразится на ее конкурентоспособности. Чтобы исключить подобный сценарий, применяется интегративное управление технологическим процессом использования адаптивной инфраструктуры, основанное на результатах интегральной оценки эксплуатации (ИОЭ) ИЖДЛ. То есть МАИ ЕЦУИ регулирует и установленным порядком планирует, стимулирует и финансирует эксплуатационную работу железнодорожных линий (рис. 3).

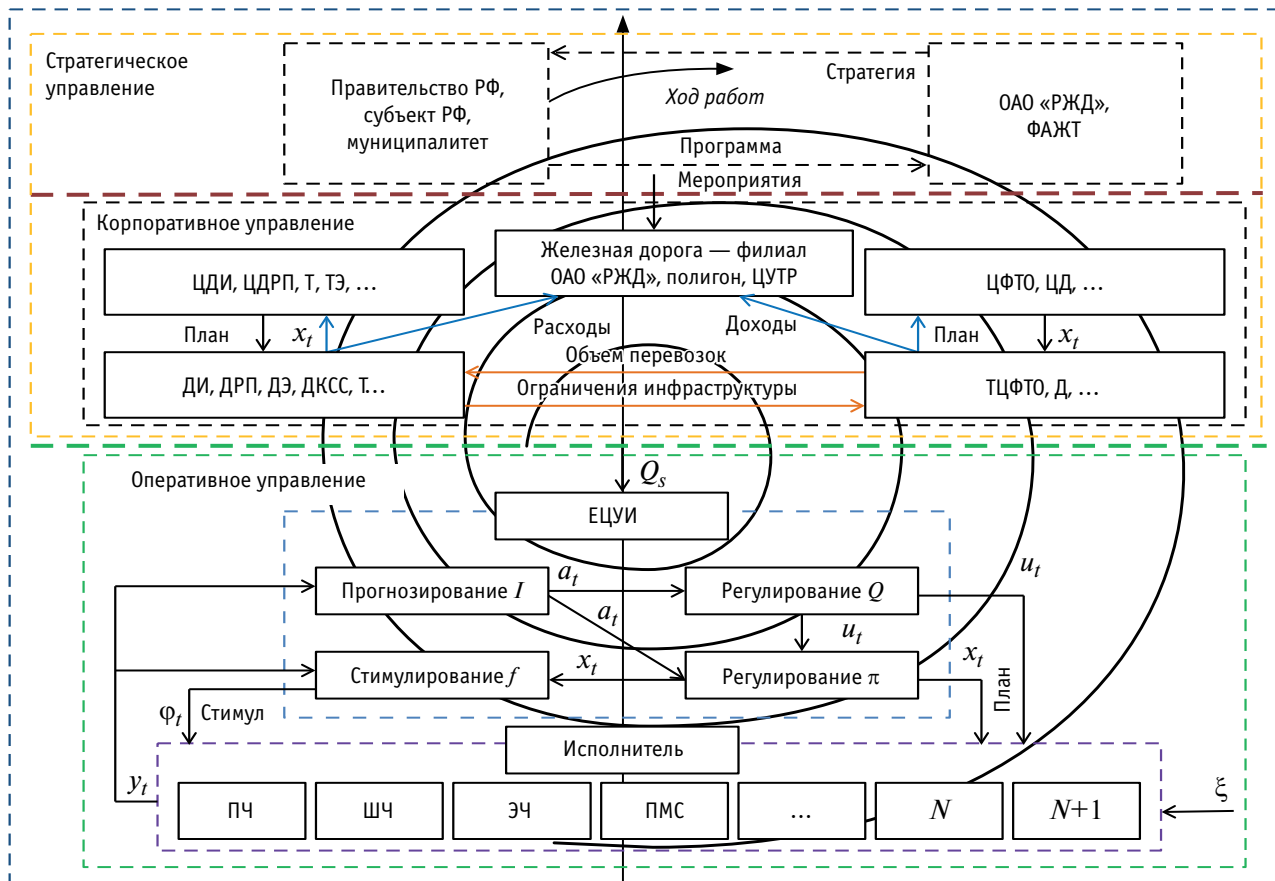


Рис. 2. Структура механизма адаптации инфраструктуры



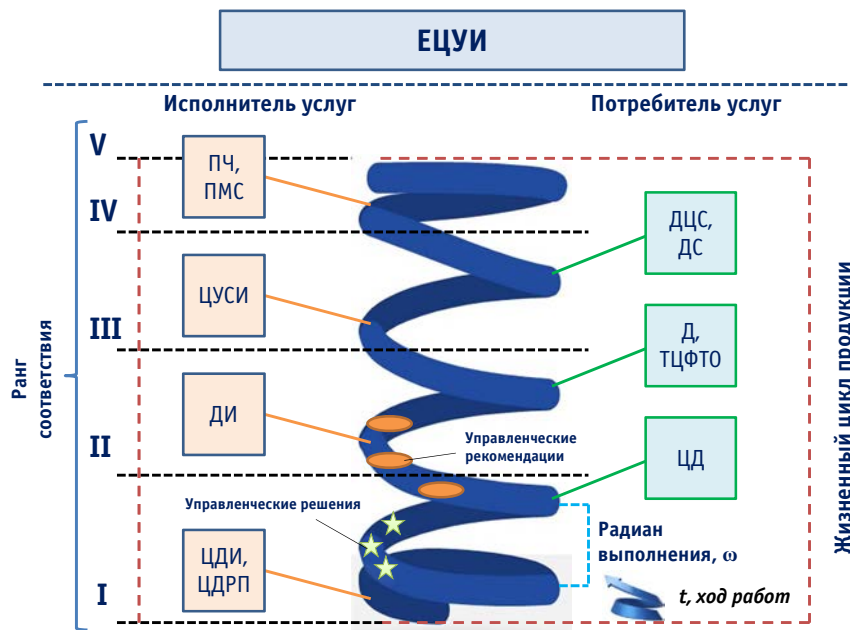


Рис. 3. Интегративное управление использованием инфраструктуры

Для определения результатов использования ИЖДЛ применяется матрица свертки (МС), в которой одновременно по нескольким производственно-экономическим показателям объединяются оценки с установленными функциями и формируется ранг свертки на пересечении строки и столбца показателей. Этот механизм предусматривает достоверность оценки или ранга (см. рис. 3) показателя: сначала допустимые интервалы оценок ранжируют эксперты — специалисты производственно-хозяйственного блока, а затем эксперты — компетентные специалисты железнодорожного транспорта. Эксперт каждого уровня пересматривает собственные ответы, только когда они выпадают из доверительного интервала (3), в котором находится 90 % всех оценок и который позволяет установить истинное (генеральное) значение статистической характеристики.

В системе оценки результатов использования ИЖДЛ различают ведущие и вспомогательные показатели. Первые (в приведенном интервале от 1 до 4) квалифицируют выполнение плановых заданий по увеличению эффективности и качества работы (табл. 1). За невыполнение ведущего показателя выставляется оценка, которая незначительно ухудшает общую оценку невыполнения

плана по вспомогательным показателям (от А до D), определяющим эффективность производства и исполнительскую дисциплину.

Таблица 1

Формирование ранга показателя

Ранг	Интегральная оценка показателя					
I	3A	2A	1B	1A		
II	4A	3B	2C	2B	1D	1C
III	4B	3C	2D			
IV	4C	4C	3D	3D		
V	4D					

Аналогично для формирования ранга основного и дополнительного показателя используется следующая процедура: первому рангу соответствует невыполнение установленного плана по первому уровню; второму рангу — выполнение плана предыдущего уровня; третьему — реализация показателей первого и второго уровней; достижение значений показателей всех уровней — четвертому рангу; перевыполнение заданных условий или сроков — пятому рангу, т.е. реализации поставленной цели (см. рис. 2). Выполнение установленного ранга характеризуется доверительным интервалом

$$\frac{X_{cp} - tS}{\sqrt{n}} \leq \alpha \leq \frac{X_{cp} + tS}{\sqrt{n}}, \quad (3)$$

где  $\alpha$  — показатель;  
 $t$  — параметр из таблицы распределения Стюдента;  
 $X_{cp}$  — среднее выборочное значение;  
 $S$  — квадратный корень дисперсии;  
 $\sqrt{n}$  — квадратный корень общего объема выборки.

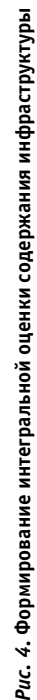
Первичные показатели блоков оценки и ранжирования (БОР) разбиваются по областям деятельности (производственно-финансовая, кадровая, подразделениям, интенсивности эксплуатации, состоянию и т.д. Таблицы МС (рис. 4) отражают утвержденные полигоном систему содержания и уровень использования ИЖДЛ через интегральную оценку содержания инфраструктуры (ИОС).

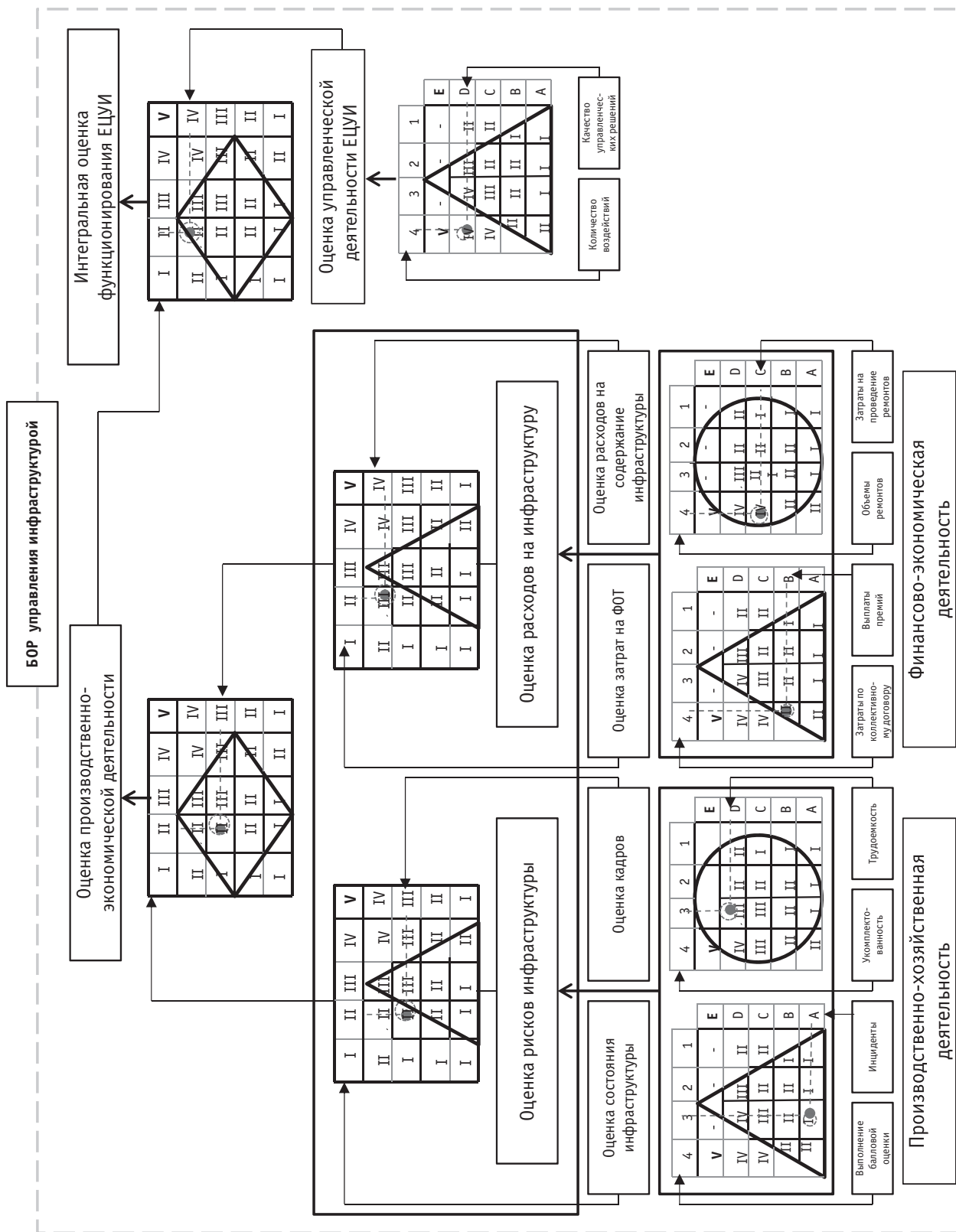
Интегральная оценка функционирования (ИОФ) ЕЦУИ определяется МС рангов производственно-экономической и управленческой деятельности ЕЦУИ (рис. 5).

С помощью МС формируется ИОЭ ИЖДЛ (рис. 6), которая позволяет сводить ИОС ИЖДЛ и ИОФ ЕЦУИ (см. рис. 5).

Итак, реформирование и нарастающая конкуренция в транспортных перевозках определили невозможность дальнейшего развития и улучшения качества оказываемых потребителям услуг без совершенствования системы использования, содержания, ремонта и управления ИЖДЛ. Современные требования к бизнес-процессам в условиях колебания объемов перевозок нацелены на то, чтобы максимально использовать потенциал ИЖДЛ (в рамках соразмерного уровня расходов на ее содержание) для решения общегосударственных задач экономического, социального и оборонного значения при обеспечении безопасности движения поездов.

Интегральная оценка эксплуатации ИЖДЛ позволяет выработать проектные решения эффективного использования инфраструктуры на полигонах железнодорожных линий в зависимости от выбранной стратегии перевозочного процесса, адаптивно меняя ее при возникновении «барьерных мест».





**Рис. 5. Формирование интегральной оценки функционирования ЕЦУИ**

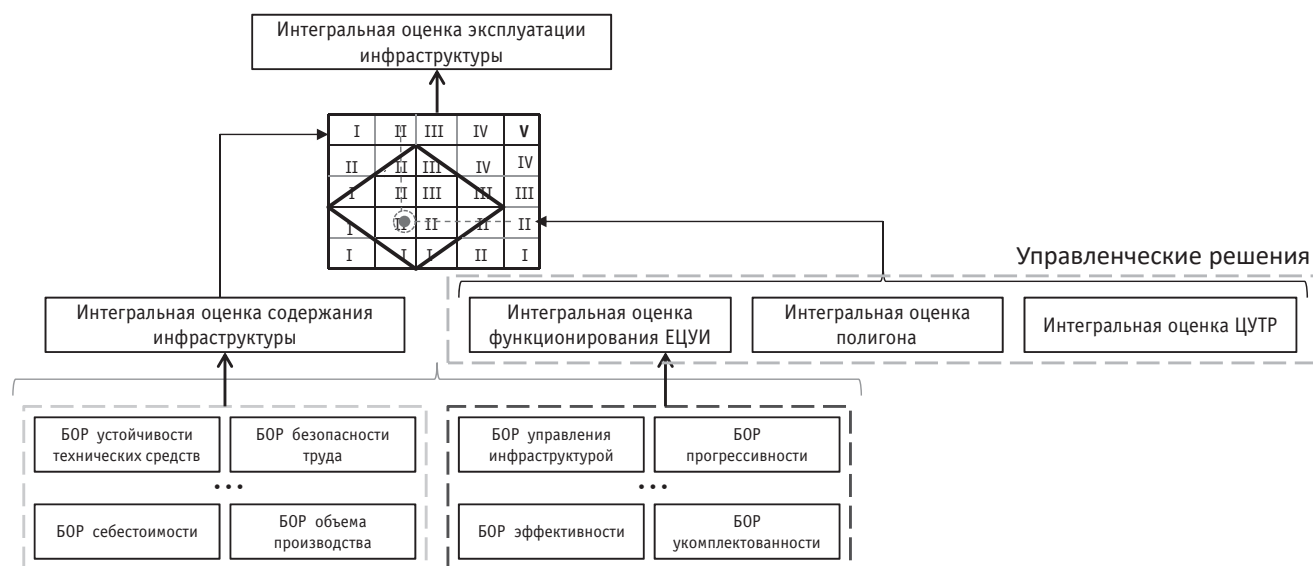


Рис. 6. Интегральная оценка эксплуатации ИЖДЛ

## Литература

1. Мясников А. С. Рациональное распределение между видами транспорта на рынке транспортных услуг // Вестник университета (Государственный университет управления). 2012. № 16. С. 17–19. ISSN 1816–4277.
2. Устав железнодорожного транспорта Российской Федерации : федер. закон Рос. Федерации от 10.01.2003 г. № 18-ФЗ // Собр. законодательства Рос. Федерации. 2003. № 2. С. 307–358.
3. Об утверждении Правил недискриминационного доступа перевозчиков к инфраструктуре железнодорожного транспорта общего пользования : постановление Правительства Рос. Федерации от 25.11.2003 г. № 710 // Собр. законодательства Рос. Федерации. 2003. № 48.
4. Об утверждении правил оказания услуг по использованию инфраструктуры железнодорожного транспорта общего пользования : постановление Правительства Рос. Федерации от 20.11.2003 г. № 703 : в ред. постановления Правительства Рос. Федерации от 14.12.2006 г. № 767 [Электронный ресурс]. URL: <http://base.garant.ru/186503/> (дата обращения: 30.11.2018).
5. О железнодорожном транспорте : закон Республики Узбекистан от 15.04.1999 г. № 766-I // Ведомости Олий Мажлиса Республики Узбекистан. 1999. № 5.
6. О железнодорожном транспорте : закон Республики Беларусь от 06.01.1999 г. № 2373 // Ведомости Национального собрания Республики Беларусь. 1999. № 5–6.
7. О железнодорожном транспорте : закон Республики Казахстан от 08.12.2001 г. № 266-II [Электронный ресурс]. URL: [http://continent-online.com/Document/?doc\\_id=1026596](http://continent-online.com/Document/?doc_id=1026596) (дата обращения: 30.11.2018).
8. О программе структурной реформы на железнодорожном транспорте : постановление Правительства Рос. Федерации от 18.05.2001 г. № 384 : в ред. постановления Правительства

## References

1. Myasnikov A. S. Rational distribution between modes of transport on market of freight services [Ratsional'noe raspredelenie mezhdru vidami transporta na rynke transportnykh uslug] // Vestnik of University (State University of Management). 2012. No 16. Pp. 17–19. ISSN 1816–4277.
2. Railway statute of the Russian Federation [Ustav zheleznodorozhnogo transporta Rossiyskoy Federatsii] : Federal law of the Russian Federation dated 10.01.2003 No. 18-FZ // Collection of Legislative Acts of the Russian Federation. 2003. No. 2. Pp. 307–358.
3. On approval of rules of non-discrimination access of carriers to a railway infrastructure of public traffic [Ob utverzhdenii Pravil nediskriminatsionnogo dostupa perevozchikov k infrastrukture zheleznodorozhnogo transporta obshhego pol'zovaniya] : Order of the Government of the Russian Federation dated 25.11.2003 No. 710 // Collection of Legislative Acts of the Russian Federation. 2003. No. 48.
4. On approval of rules of rendering services on the use of railway infrastructure of public traffic [Ob utverzhdenii pravil okazaniya uslug po ispol'zovaniyu infrastruktury zheleznodorozhnogo transporta obshhego pol'zovaniya] : Order of the Government of the Russian Federation dated 20.11.2003 No. 703 : in edition of Order of the Government of the Russian Federation dated 14.12.2006 No. 767 [Electronic resource]. URL: <http://base.garant.ru/186503/> (access date: 30.11.2018).
5. On railway transport [O zheleznodorozhnom transporte] : Law of the Republic of Uzbekistan dated 15.04. 1999 No. 766-I // Bulletin of the Supreme Assembly of the Republic of Uzbekistan. 1999. No. 5.
6. On railway transport [O zheleznodorozhnom transporte] : Law of the Republic of Belarus dated 06.01.1999 No. 2373 // Bulletin of the National Assembly of the Republic of Belarus. 1999. No. 5–6.
7. On railway transport [O zheleznodorozhnom transporte] : Law of the Republic of Kazakhstan dated 08.12.2001 No. 266-II [Electronic resource]. URL: [http://continent-online.com/Document/?doc\\_id=1026596](http://continent-online.com/Document/?doc_id=1026596) (access date: 30.11.2018).
8. On the program of structural reform on railway transport [O programme strukturnoy reformy na zheleznodorozhnom transporte] : Order of the Government of the Russian Federation dated 18.05.2001 No 384 : in edition of Order of the Government of the Russian Federation dated 22.07.2009 No. 600 [Electronic resource]. URL: <http://www.zakon-prost.ru/content/base/67419> (access date: 30.11.2018).



Рос. Федерации от 22.07.2009 г. № 600 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.zakonprost.ru/content/base/67419> (дата обращения: 30.11.2018).

9. О железнодорожном транспорте в Российской Федерации : федер. закон Рос. Федерации от 10.01.2003 г. № 17-ФЗ // Собр. законодательства Рос. Федерации. 2003. № 2.
10. Об основных положениях структурной реформы в сферах естественных монополий : указ президента Рос. Федерации от 28.04.1997 г. № 426 : с изм., внесенными указом президента Рос. Федерации от 23.07.2001 г. № 902 [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/9050191> (дата обращения: 30.11.2018).
11. Григорьева О. А. Правовое регулирование естественных монополий : автореф. ... канд. юрид. наук. Екатеринбург, 2003. 26 с.
12. Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2020 года : приказ Минтранса России от 12.05.2005 г. № 45 [Электронный ресурс]. URL: <http://base.garant.ru/188328/53f89421bbdaf741eb2d1ecc4ddb4c33> (дата обращения: 30.11.2018).
13. Белых В. С. Правовое регулирование предпринимательской деятельности в России : моногр. М. : Проспект, 2005. 430 с.
14. Айдарова Н. А. Государственное регулирование естественных монополий в условиях трансформации российской экономики : автореф. ... канд. юрид. наук. Челябинск, 2000. 28 с.
15. Вторушина Н. Проблем, право, не счесть // РЖД-Партнер. 2009. № 23 (171). С. 35.
16. Об утверждении Методики определения пропускной и провозной способностей инфраструктуры железнодорожного транспорта общего пользования : приказ Минтранса России от 18.07.2018 г. № 266 [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/542629643> (дата обращения: 30.11.2018).
17. Об утверждении Методики классификации и специализации железнодорожных линий ОАО «РЖД» : распоряжение ОАО «РЖД» от 23.12.2015 г. № 3048р [Электронный ресурс]. URL: <http://www.tdesant.ru/info/item/113> (дата обращения: 30.11.2018).
18. Об особенностях управления и распоряжения имуществом железнодорожного транспорта : федер. закон Рос. Федерации от 27.02.2003 г. № 29-ФЗ : в ред. федер. закона Рос. Федерации от 25.11.2013 г. № 323-ФЗ [Электронный ресурс]. URL: <http://base.garant.ru/185585/#> (дата обращения: 30.11.2018).
19. Об ограниченных в обороте объектах имущества открытого акционерного общества «Российские железные дороги» : постановление Правительства Рос. Федерации от 06.02.2004 г. № 57 : в ред. постановлений Правительства Рос. Федерации от 27.06.2006 г. № 394; от 17.12.2007 г. № 889; от 15.06.2009 г. № 488; от 28.02.2011 г. № 114 [Электронный ресурс]. URL: <http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&prevDoc=102118805&backlink=1&nd=102085240> (дата обращения: 30.11.2018).
20. Прейскурант № 10–01 «Тарифы на перевозки грузов и услуги инфраструктуры, выполняемые российскими железными дорогами» (Тарифное руководство № 1, части 1 и 2) : утв. постановлением ФЭК России от 17.06.2003 г. № 47-т/5 [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/901868848> (дата обращения: 30.11.2018).

9. On railway transport in the Russian Federation [O zheleznodorozhnom transporte v Rossiyskoy Federatsii] : Federal law of the Russian Federation dated 10.01.2003 No. 17-FZ // Collection of Legislative Acts of the Russian Federation. 2003. No. 2.
10. On the main statements of structural reform in spheres of natural monopolies [Ob osnovnykh polozheniyakh strukturnoy reformy v sferakh estestvennykh monopolii] : Edict of the President of the Russian Federation dated 28.04.1997 No. 426 : with amendments introduced by Edict of the President of the Russian Federation dated 23.07.2001 No. 902 [Electronic resource]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/9050191> (access date: 30.11.2018).
11. Grigoryeva O. A. Legal regulation of natural monopolies [Pravovoe regulirovanie estestvennykh monopolii] : Synopsis of PhD in Law Thesis. Ekaterinburg, 2003. 26 p.
12. Transport strategy of the Russian Federation for the period up to 2020 [Transportnaya strategiya Rossiyskoy Federatsii na period do 2020 goda] : Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation dated 12.05.2005 No. 45 [Electronic resource]. URL: <http://base.garant.ru/188328/53f89421bbdaf741eb2d1ecc4ddb4c33> (access date: 30.11.2018).
13. Belykh V. S. Legal regulation of business activities in Russia [Pravovoe regulirovanie predprinimatel'skoy deyatel'nosti v Rossii] : monograph. Moscow : Prospect, 2005. 430 p.
14. Aydarova N. A. State regulation of natural monopolies in conditions of Russian economy transformations [Gosudarstvennoe regulirovanie estestvennykh monopolii v usloviyakh transformatsii rossiyskoy ekonomiki] : Synopsis of PhD in Law Thesis. Chelyabinsk, 2000. 28 p.
15. Vtorushina N. It is impossible to account the problems [Problem, pravo, ne schest'] // RZD-Partner. 2009. No. 23 (171). P. 35.
16. On approval of method to determine capacity of railway transport infrastructure of public traffic [Ob utverzhdenii Metodiki opredeleniya propusknoy i provoznoy sposobnostey infrastruktury zheleznodorozhnogo transporta obshhego pol'zovaniya] : Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation dated 18.07.2018 No. 266 [Electronic resource]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/542629643> (access date: 30.11.2018).
17. On approval of method of the JSC «RZD» railway lines classification and specialization [Ob utverzhdenii Metodiki klassifikatsii i spetsializatsii zheleznodorozhnykh liniy ОАО «RZhD»] : Order of JSC Russian Railways dated 23.12.2015 No. 3048r [Electronic resource]. URL: <http://www.tdesant.ru/info/item/113> (access date: 30.11.2018).
18. On peculiarities of railway transport assets control and regulation [Ob osobennostyakh upravleniya i rasporyazheniya imushchestvom zheleznodorozhnogo transporta] : Federal law of the Russian Federation dated 27.02.2003 No. 29-FZ : in edition of Federal law of the Russian Federation dated 25.11.2013 No. 323-FZ [Electronic resource]. URL: <http://base.garant.ru/185585/#> (access date: 30.11.2018).
19. On the JSC Russian Railways objects of assets limited in turnover [Ob ogranichennykh v oborote ob'ektakh imushchestva otkrytogo aktsionernogo obshchestva «Rossiyskie zheleznnye dorogi»] : Order of the Government of the Russian Federation dated 06.02.2004 No. 57 : in edition of orders of the Government of the Russian Federation dated 17.12.2007 No. 889; 15.06.2009 No. 488; 28.02.2011 No. 114 [Electronic resource]. URL: <http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&prevDoc=102118805&backlink=1&nd=102085240> (access date: 30.11.2018).
20. Price list No. 10–01 «Tariffs for transportation of goods and infrastructure services performed by the Russian Railways» (Tariff guide No. 1, parts 1 and 2) [Preyskurant № 10–01 «Tarify na perevozki gruzov i uslugi infrastruktury, vypolnyaemye rossiyskimi zheleznymi dorogami» (Tarifnoe rukovodstvo № 1, chasti 1 i 2)] : approved by the Russian Federation Federal Energy Commission dated 17.06.2003 No. 47-t/5 [Electronic resource]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/901868848> (access date: 30.11.2018).
21. Rules of rendering service on the use of railway infrastructure of public traffic [Pravila okazaniya uslug po ispol'zovaniyu infrastruktury

21. Правила оказания услуг по использованию инфраструктуры железнодорожного транспорта общего пользования : утв. постановлением Правительства Рос. Федерации от 20.11.2003 г. № 703 [Электронный ресурс]. URL: [http://www.rzd.ru/doc/public/ru?STRUCTURE\\_ID=704&layer\\_id=5104&id=6542](http://www.rzd.ru/doc/public/ru?STRUCTURE_ID=704&layer_id=5104&id=6542) (дата обращения: 30.11.2018).
22. Ильин Ю. Перевозчик и клиент: дореволюционный опыт // РЖД-Партнер. 2009. № 5 (153). С. 19–20.
23. Юшкова С. С. Проблемы инфраструктуры и пути решения в период организационных трансформаций системы управления производственной деятельностью ОАО «РЖД» // Техника и технологии наземного транспорта : сб. статей Всерос. науч. конф. аспирантов. Екатеринбург, 2018. С. 154–158.
24. Сирина Н. Ф. Методологические основы формирования адаптивных механизмов организации вагоноремонтного комплекса : дис. ... д-ра техн. наук. Екатеринбург, 2009. 295 с.
- zheleznodorozhnogo transporta obshhego pol'zovaniya] : approved by Order of the Government of the Russian Federation dated 20.11.2003 No. 703 [Electronic resource]. URL: [http://www.rzd.ru/doc/public/ru?STRUCTURE\\_ID=704&layer\\_id=5104&id=6542](http://www.rzd.ru/doc/public/ru?STRUCTURE_ID=704&layer_id=5104&id=6542) (access date: 30.11.2018).
22. Ilyin Yu. Carrier and client: pre-revolutionary experience [Perevozchik i klient: dorevolutsionnyy opyt] // RZD-Partner. 2009 No. 5 (153). Pp. 19–20.
23. Yushkova S. S. Problems of infrastructure and solutions in the period of organizational transformations of the production management system of JSC Russian Railways [Problemy infrastruktury i puti resheniya v period organizatsionnykh transformatsiy sistemy upravleniya proizvodstvennoy deyatel'nost'yu OAO «RZhD»] // Technics and technology of land transport : collection of papers of All-Russian scientific conference of postgraduate students. Ekaterinburg, 2018. Pp. 154–158.
24. 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.

Объем статьи 1,23 авторских листа

УДК 656.21.001.2

**Хабидулла Туранович Туранов**, доктор технических наук, профессор кафедры «Станции, узлы и грузовая работа» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,

**Андрей Александрович Гордиенко**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Станции, узлы и грузовая работа» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,

**Хасан Хотамович Джалилов**, ассистент кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство» Ташкентского института инженеров железнодорожного транспорта (ТашиИИТ), Ташкент, Республика Узбекистан

## О ДВИЖЕНИИ ВАГОНА НА СКОРОСТНЫХ УЧАСТКАХ СОРТИРОВОЧНОЙ ГОРКИ

**Khabibulla Turanovich Turanov**, DSc in Engineering, Professor, Stations, Junctions and Freight Work Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,

**Andrey Alexandrovich Gordienko**, PhD in Engineering, Associate Professor, Stations, Junctions and Freight Work Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,

**Khasan Khotamovich Dzhaliylov**, Assistant Lecturer, Wagons and Wagon Equipment Department, Tashkent Railway Engineering Institute (TashREI), Tashkent, Republic of Uzbekistan

### On movement of car at speed sections of hump

#### Аннотация

Содержание статьи опирается на классические положения механики (принцип Д'Аламбера) для неидеальной связи. Приведено аналитическое доказательство того, что линейное ускорение вагона при его равноускоренном движении по спускной части сортировочной горки зависит от силы, под воздействием которой вагон скатывается по уклону горки, силы сопротивлений всякого рода, от приведенной массы вагона с грузом с учетом момента инерции вращающихся частей. При этом результатами расчетов доказано, что масса вращающихся частей практически не оказывает влияния на величину ускорения движения вагона по уклону скоростных участков сортировочной горки. Формулы ускорения и результирующие силы, действующие на вагон, представлены в общепринятых обозначениях и в привычном понимании согласно существующей методике расчета сортировочных горок, а также обоснованы расчетными данными.

**Ключевые слова:** железная дорога, станция, сортировочная горка, вагон, ускорение движения вагона, приведенная масса, инерция вращающихся частей.

#### Summary

The paper content is based on classic provisions of mechanics (D'Alembert principle) for non-ideal communication. The authors provide with the analytical proof of that the linear acceleration of the car when it is uniformly accelerated along the descending part of the hump depends on the force that affects the car to roll down the slope of the hump, on the force of resistance of all kinds, on the adjusted weight of the car with load taking into account the moment of flywheel action. At the same time, the results of calculations prove that the rotating parts weight practically does not affect the acceleration value of the car rolling down the slope of hump speed sections. The acceleration formulas and the resulting forces acting on the car are presented in generally accepted designations and in usual understanding according to the existing method for calculation of humps, as well as justified by the calculated data.

**Keywords:** railway, station, hump, car, car acceleration, adjusted weight, flywheel action.

DOI: 10.20291/1815-9400-2019-1-18-23

Как известно [1–10], в последнее время активно ведутся дискуссии о корректности существующей методики расчета сортировочных горок [11–16]. Нами было отмечено [6], что авторы статьи [4], предлагая использовать формулу  $v_k^2 = v_H^2 + 2g'l(i - w)10^{-3} - 2g'h_t$  в качестве универсальной для определения скорости движения вагона на всех участках сортировочных горок [15], допускают ошибку. При этом ускорение свободного падения  $g'$  с учетом инерции вращающихся масс рассматривается ими и для участков тормозных позиций (см. вычитаемое  $2g'h_t$ ). Тем не менее до сих пор не дана оценка влияния учета и/или неучета инерции вращающихся масс на ускорение движения вагона по профилю сортировочной горки.

На основе классических положений механики (принцип Д'Аламбера) для неидеальной связи [17, 18] нами будет приведено аналитическое доказательство того, что линейное ускорение вагона при его равноускоренном движении по спускной части сортировочной горки  $a_i = a_{ci}$  зависит от силы  $F_{xi}$ , под воздействием которой вагон скатывается по уклону горки, силы сопротивлений всякого рода  $|F_{ci}|$ , а также от приведенной массы вагона с грузом  $M_{пр}$  с учетом момента инерции вращающихся частей  $J_c$ . При этом будет доказано, что учет массы вращающихся частей практически не оказывает влияния на величину ускорения движения вагона по уклону горки.

#### ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Доказать, что при расчетах проектируемых участков сортировочной горки важнейшим кинематическим параметром движения вагона является ускорение, которое определяет другие параметры (время, скорость движения).

## ФОРМУЛИРОВКА ЗАДАЧИ

Привести результаты расчетов ускорения при равноускоренном движении вагона на одном из скоростных участков сортировочной горки (например, на втором скоростном участке СК2) с учетом и без учета массы вращающихся частей и доказать их незначительное расхождение.

## МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ

Как и в [6], решение инженерной задачи по определению кинематических параметров движения вагона по уклону сортировочной горки приведено с использованием основного закона динамики для неидеальных связей (принцип Д'Аламбера) [17, 18].

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Математическое движение вагона на скоростных участках сортировочной горки опишем с использованием принципа Д'Аламбера [17, 18] в проекциях на спускную часть сортировочной горки.

Аналогично [6] аналитическая формула для ускорения движения вагона  $a_{Ci} = a_i$  по спускной части сортировочной горки имеет вид

$$a_{Ci} = \frac{|\Delta F_{xi}|}{M_{\text{пр}}} 10^3, \quad (1)$$

где  $i$  — номера участков на всей протяженности профиля пути сортировочной горки ( $i = 1, \dots, 9$ );

$|a_{Ci}| = |a_i|$  — ускорение центра масс  $C_v$  вагона [19], которое следует найти,  $\text{м/с}^2$ ;

$M_{\text{пр}}$  — приведенная и/или воображаемая масса вагона с грузом с учетом момента инерции вращающихся частей (колесных пар)  $J_C$  на всех участках спускной части горки (см. формулу (5.396) [20]), кг:

$$M_{\text{пр}} = M_1 + 6m_{\text{кп}}, \quad (2)$$

где  $M_1 = 80,94 \cdot 10^3$  — масса вагона с грузом с учетом невращающихся частей, т.е. тележки, кузова вагона, кг;

$m_{\text{кп}} = 1,937 \cdot 10^3$  — масса колесной пары, кг;

$|\Delta F_{xi}|$  — результирующая сила, под воздействием которой происходит скатывание вагона по спускной части сортировочной горки, кН,

$$|\Delta F_{xi}| = F_{xi} - |F_{ci}|, \quad (3)$$

где  $F_{xi}$  — проекция силы тяжести груженого вагона  $G$  на направление движения вагона с учетом и/или без учета проекции силы попутного ветра  $F_{\text{вх}}$  под воздействием которой вагон движется по уклону спускной части горки, кН,

$$F_{xi} = G \sin \psi_i + F_{\text{вх}} \cos \psi_i, \quad (4)$$

где  $\psi_i$  — угол уклона спускной части горки, рад;

$|F_{ci}|$  — в общем случае сила сопротивления всякого рода.

Отметим, что величиной  $F_{\text{вх}}$  можно пренебречь ввиду ее малой величины:  $F_{\text{вх}} \ll G$  (например,  $3,2 \ll 908$  кН).

Сила сопротивления всякого рода  $|F_{ci}|$  с учетом и/или без учета проекции силы встречного ветра малой величины  $F_{\text{вх}}$ , которая может быть принята как доля от силы тяжести вагона с грузом  $G$ , т.е.  $|F_{ci}| = f(G)$ , что не противоречит методике горочных расчетов (см. с. 180 [11] и с. 141 [12]), включает в себя:

силу трения скольжения с учетом силы трения качения в подшипниках буксовых узлов как силы от основного (ходового) сопротивления  $F_{\text{тпи}} = F_{oi}$ ;

силу сопротивления, возникающую в кривых (и/или сопротивление от кривых), которая зависит от суммы углов поворота в кривых, включая стрелочные углы на рассматриваемом участке, и от скорости движения вагона,  $F_{\text{кпи}}$ ;

силу сопротивления, возникающую при прохождении стрелочных переводов (от ударов колес об острия, крестовины и контррельсы),  $F_{\text{стр}}$ ;

силу сопротивления от воздушной среды и ветра  $F_{\text{св}}$ ;

силу на преодоление дополнительного сопротивления от снега и инея в пределах стрелочной зоны пучков и на сортировочных путях  $F_{\text{сн}}$ .

Исходя из этого силу сопротивления всякого рода  $|F_{ci}|$  с учетом проекции силы попутного ветра  $F_{\text{вх}}$  следует определять по формуле

$$|F_{ci}| = F_{oi} + F_{\text{кпи}} + F_{\text{стр}} + F_{\text{св}} + F_{\text{сн}}. \quad (5)$$

Для спускной части горки, кроме участков тормозных позиций, в формуле (1) всегда должно быть соблюдено условие

$$F_{xi} > |F_{ci}|. \quad (6)$$

Из формулы (1) следует, что при соблюдении условий  $|\Delta F_{xi}| > 0$  и/или, согласно (6),  $F_{xi} > |F_{ci}|$ , соответствующих воздействию проекции силы попутного ветра малой величины  $F_{\text{вх}}$  движение вагона по спускной части горки при скорости входа на нее  $v_{\text{нв}} > 0$  будет равноускоренным, а при несоблюдении этих условий — равнозамедленным.

В формуле (6) силу  $F_{xi}$  под воздействием которой вагон скатывается по уклонам скоростных участков горки, находят по формуле (4), а силу сопротивления всякого рода  $|F_{ci}|$ , согласно формуле (5), можно представить в виде

$$|F_{ci}| = (k_{oi} + k_{\text{кпи}} + k_{\text{стр}} + k_{\text{св}} + k_{\text{сн}} + k_{\text{вх}})G, \quad (7)$$

где  $k_{oi} = 0,001$  — коэффициент трения качения закаленной стали по закаленной стали (см. с. 42 [21]) и/или коэффициент, учитывающий силу сопротивления от качения колес со скольжением  $F_{oi}$ ;

$k_{\text{кпи}}$  — коэффициент, учитывающий силу сопротивления при прохождении кривых  $F_{\text{кпи}}$ ;

$k_{\text{стр}} \approx 0,00025$  — коэффициент, учитывающий силу сопротивления от стрелок  $F_{\text{стр}}$ ;

$k_{\text{св}} \approx 0,0005$  — коэффициент, учитывающий силу сопротивления от воздушной среды и ветра  $F_{\text{св}}$ ;

$k_{\text{сн}} \approx 0,00025$  — коэффициент, учитывающий силу  $F_{\text{сн}}$ ;



$k_{\text{BX}} \approx 0,004$  — коэффициент, учитывающий силу  $F_{\text{BX}}$  в долях от  $G$ .

Таким образом, линейное ускорение вагона при равноускоренном движении по спускной части сортировочной горки  $a_i = a_{C_i}$  определенное согласно принципу Д'Аламбера, зависит от силы  $F_{x_i}$  под воздействием которой вагон скатывается по уклону горки, силы сопротивления всякого рода  $|F_{c_i}|$ , а также от приведенной массы груженого вагона  $M_{\text{пр}}$  с учетом момента инерции вращающихся частей  $J_C$ , т.е.

$$a_i = f(F_{x_i}, F_{c_i}, M_{\text{пр}}). \quad (8)$$

Отметим, что скорость ( $v_{cki} = v_i$ ) и путь ( $l_{cki} = l_i = x_i$ ) движения вагона на скоростных участках сортировочной горки, при которых конечная скорость на скоростных участках  $v_{киск} \neq 0$ , определяют по известным из элементарной физики формулам:

$$v_i = v_{hi} + |a_i|t_i; \quad (9)$$

$$l_i = x_i = v_{hi}t_i + \frac{1}{2}|a_i|t_i^2, \quad (10)$$

где  $v_{hi}$  — начальная скорость и/или скорость входа вагона на исследуемый участок профиля горки, равная скорости выхода с предшествующего участка, т.е. величина, полученная по результатам расчетов предыдущих участков горки.

При помощи формул (9) и (10) можно найти скорость  $v_i$  и время  $t_i$  движения вагона на скоростных участках сортировочной горки:

$$v_i = \sqrt{v_{hi}^2 + 2|a_i|l_i}; \quad (11)$$

$$t_i = \frac{1}{|a_i|} \left( -v_{hi} + \sqrt{v_{hi}^2 + 2|a_i|l_i} \right). \quad (12)$$

Отметим, что использование формул элементарной физики для определения скорости  $v_{cki}$  и пути  $l_{cki}$  движения вагона на скоростных участках сортировочных горок обосновано выводами из дифференциального уравнения ускорения движения вагона, выведенного на основе принципа Д'Аламбера (см. формулы (16) и (19) [19]).

Обобщение результатов исследования динамики вагона при равноускоренном движении по спускной части сортировочной горки позволяет сделать вывод о корректности формулы (1), теоретической базой которой является классический принцип Д'Аламбера [17, 18]. Особо подчеркнем, что принцип Д'Аламбера, будучи важным инструментом в изучении динамики движения твердых тел и упругих систем, обладает следующими достоинствами:

во-первых, дает возможность пользоваться привычными уравнениями равновесия статики (см. формулу (4.45) [20]); во-вторых, позволяет получить уравнения, разрешенные относительно старших производных (см. формулу (4.46) [20]); в-третьих, допускает возможность непосредственно найти ускорение точки в абсолютном движении  $a_{\text{абс}}$  при извест-

ных активных и реактивных силах либо реакции связи (силы трения или силы торможения), если известно ускорение  $a_{\text{абс}}$  и вызывающие его активные силы [см. условие (6)].

## РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ ВАГОНА НА СКОРОСТНОМ УЧАСТКЕ СОРТИРОВОЧНОЙ ГОРКИ

Для примера исследуем второй скоростной участок (СК2), расположенный после разделительной стрелки сортировочной горки.

### Исходные данные

$G = 908$  кН — сила тяжести вагона с грузом;  $v_{\text{н2ст}} = 7,285$  м/с — начальная скорость и/или скорость входа вагона на участок СК2 после стрелки;  $\psi_{2\text{ст}} = 0,018$  рад — уклон спускной части горки;  $l_{2\text{ст}} = 18,633$  м — длина рассматриваемого участка горки;  $F_{x2\text{ст}} = 19,535$  кН — проекция силы тяжести вагона  $G$  на ось  $Cx$  с учетом проекции силы попутного ветра малой величины  $F_{\text{BX}}$  ( $F_{\text{BX}} \approx 3,2$  кН) на участке СК2;  $F_{o2\text{ст}} = k_{o2\text{ст}}G = 0,0001 \cdot 908 \approx 0,0908$  кН — сила от основного сопротивления движению вагона;  $F_{cb} = k_{cb}G = 0,0005 \cdot 908 = 0,454$  кН — сила сопротивления от воздушной среды и ветра;  $F_{ch} = k_{ch}G = 2,5 \cdot 10^{-4} \cdot 908 = 0,227$  кН — сила сопротивления от снега и инея;  $F_{стр} = k_{стр}G = 2,5 \cdot 10^{-4} \cdot 908 = 0,227$  кН — сила сопротивления при проходе разделительной стрелки;  $F_{кр2\text{ст}} = k_{кр2\text{ст}}G = 5,317 \cdot 10^{-5} \cdot 908 = 0,048$  кН — сила сопротивления при переходе кривых (и/или сопротивление от кривых).

### Результаты расчетов [22]

Силу сопротивления всякого рода рассчитываем по формуле (7), кН:

$$F_{c2\text{ст}} = F_{o2\text{ст}} + F_{cb} + F_{ch} + F_{стр} + F_{кр2\text{ст}} = 0,908 + 0,454 + 0,227 + 0,227 + 0,048 = 1,864.$$

Приведенную массу груженого вагона  $M_{\text{пр}}$  с учетом момента инерции вращающихся частей  $J_C$  вычисляем по формуле (2), кг:

$$M_{\text{пр}} = M_1 + 6 \cdot m_{\text{кп}} = 80,94 \cdot 10^3 + 6 \cdot 1,937 \cdot 10^3 = 9,2562 \cdot 10^4.$$

Результирующую силу, под воздействием которой происходит скатывание вагона по спускной части сортировочной горки, вычисляем по формуле (3), кН:

$$|\Delta F_{2\text{ст}}| = F_{x2\text{ст}} - F_{c2\text{ст}} = 19,535 - 1,864 = 17,67.$$

Ускорение центра масс вагона  $C_B$  вычисляем по формуле (1), м/с<sup>2</sup>:

$$a_{2\text{ст}} = |\Delta F_{2\text{ст}}| \cdot 10^3 / M_{\text{пр}} = |17,67| \cdot 10^3 / (9,256 \cdot 10^4) = 0,191.$$

Рассчитаем ускорение при равноускоренном движении вагона на участке СК2 по формуле (1), подставив вместо  $M_{\text{пр}}$  значение  $M_{\text{пр0}}$  (где  $M_{\text{пр0}} = 8,869 \cdot 10^4$  кг — масса вагона без учета вращающихся частей), м/с<sup>2</sup>:

$$a_{2\text{ст}} = |\Delta F_{2\text{ст}}| \cdot 10^3 / M_{\text{пр0}} = |17,67| \cdot 10^3 / (8,869 \cdot 10^4) \approx 0,199.$$

Относительная ошибка составляет  $\delta a_{2\text{ст}} = 4,18 \approx 4,2 \%$ , что меньше точности инженерных расчетов ( $\approx 5 \%$ ) [23, 24].

Таким образом, расчеты кинематических параметров движения вагона по профилю сортировочной горки можно выполнять без учета момента инерции вращающихся частей (колесных пар)  $J_C$  вагона.

Сделаем расчеты по формулам (9)–(12), возможность использования которых доказана в [19] [см. формулы (16), (18)–(20)].

Время движения вагона, вычисленное по формуле (12) при  $v_{\text{н2ст}} = 7,285$  м/с и  $a_{2\text{ст}} = 0,191$  м/с<sup>2</sup>, составит  $t_{2\text{ст}} = 2,477$  с; скорость движения вагона, рассчитанная по формуле (9) при  $v_{\text{н2ст}} = 7,285$  м/с,  $a_{2\text{ст}} = 0,191$  м/с<sup>2</sup> и  $t_{2\text{ст}} = 2,477$  с, составит  $v_{2\text{ст}} = 7,758$  м/с ( $\approx 27,9$  км/ч);

путь движения вагона, вычисленный по формуле (10) при  $v_{\text{н2ст}} = 7,285$  м/с,  $a_{2\text{ст}} = 0,191$  м/с<sup>2</sup> и  $t_{2\text{ст}} = 2,477$  с, составит  $l_{2\text{ст}} = 18,633$  м.

### ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ФОРМУЛ (1) И (3) С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОНЯТИЙ СУЩЕСТВУЮЩЕЙ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА СОРТИРОВОЧНОЙ ГОРКИ

Представим формулы (1) и (3), согласно [4, 11–16], в общепринятых обозначениях и с использованием понятий действующей методики расчета сортировочных горок [13].

В соответствии с исходными данными нашего первого примера заметим, что силу  $F_{xi}$  под воздействием которой вагон движется по спускной части горки с учетом проекции силы попутного ветра малой величины  $F_{\text{вх}}$  можно представить в долях от силы тяжести вагона с грузом  $G$ :

$$F_{xi} = i_{x0i} G, \quad (13)$$

где  $i_{x0i} = i_{xi} + k_{\text{вх}}$  — безразмерная величина, условно характеризующая обозначение уклона спускной части горки в долях от  $G$  с учетом воздействия проекции силы попутного ветра малой величины  $F_{\text{вх}}$ . Если воздействие попутного ветра не учитывается, то  $k_{\text{вх}} = 0$ , т.е.  $k_{\text{вх}} = f(G)$ .

Аналогично силе  $F_{ci}$  сила сопротивления всякого рода  $|F_{ci}|$  может быть принята как доля от силы тяжести вагона с грузом  $G$ , т.е.  $|F_{ci}| = f(G)$ , кН.

Например, применительно к первому участку сортировочного пути (СП1):

$F_{x7} = k_{x07} G$ , где  $k_{x07} = 0,0051$  — коэффициент, учитывающий долю движущей силы  $F_{x7}$  с учетом проекции силы попутного ветра малой величины ( $F_{\text{вх}} \approx 3,2$  кН) от  $G$  на ось  $Cx$ , т.е.  $F_{x7} = 0,0051 \cdot 908 = 4,645$  кН;

$F_{o7} = k_{o7} G$ , где  $k_{o7} \approx 0,0001$  — коэффициент, учитывающий долю силы основного сопротивления  $F_{o7}$  от  $G$ ;

$F_{kp} = k_{kp} G$ , где  $k_{kp} \approx 0,00087$  — коэффициент, учитывающий долю силы сопротивления при прохождении кривых (и/или сопротивление от кривых)  $F_{kp}$  от  $G$ ;

$F_{cb} = k_{cb} G$ , где  $k_{cb} \approx 0,0005$  — коэффициент, учитывающий долю силы сопротивления от воздушной среды и ветра  $F_{cb}$  от  $G$ .

В итоге силу сопротивления  $|F_{ci}|$  с учетом воздействия попутного ветра определяют по формуле (7), где  $k_{\text{вх}} = 0$  соответствует случаю, при котором не учитывается проекция силы ветра  $F_{\text{вх}}$  поскольку  $F_{\text{вх}} \ll G$  (и/или  $3,2 \ll 908$  кН).

Окончательно формулу (1), согласно [4, 11–16], представим в следующем виде (для сравнения см. второе слагаемое

формулы  $v_k^2 = v_{\text{н}}^2 + 2g'l(i - w)10^{-3} - 2g'h_{\text{т}}$  в [4]):

$$a_i = g(i_{x0i} - |w_i|), \quad (14)$$

где  $a_i$  — ускорение центра масс вагона  $C_{\text{в}}$ , которое следует найти, м/с<sup>2</sup>;

$g$  — ускорение свободного падения тела, м/с<sup>2</sup>,

$$g = \frac{G}{M_{\text{пр}}} 10^3; \quad (15)$$

$i_{x0i} = i_{xi} + k_{\text{вх}}$  — отвлеченное число и/или безразмерная величина, представленная в (13);

$|w_i|$  — отвлеченное число и/или безразмерная величина, условно характеризующая обозначение удельного сопротивления движению вагона по спускной части горки в долях от  $G$ , т.е.  $w_i = f(G)$ , в отличие от [11, с. 180, 12, 14–16], где  $|w_i|$  имеет размерность кгс/т,

$$|w_i| = k_{oi} + k_{kpi} + k_{\text{стр}} + k_{\text{св}} + k_{\text{сн}}. \quad (16)$$

Из формулы (14) следует, что при соблюдении условия  $i_{x0i} > |w_i|$  движение вагона по спускной части горки будет равноускоренным (что соответствует учету воздействия попутного ветра), а при  $i_{x0i} < |w_i|$  — равнозамедленным, что может соответствовать учету воздействия встречного ветра малой величины.

Таким образом, ускорение движения вагона по спускной части горки  $a_i$  определенное согласно принципу Д'Аламбера в общепринятых обозначениях и в привычном понимании, зависит от ускорения свободного падения тела, уклона и удельного сопротивления движению вагона по спускной части горки, т.е.

$$a_i = f(g, i_{xi}, w_i), \quad (17)$$

что, видимо, равносильно зависимости (8).

Однако для выполнения расчета результирующую силу  $|\Delta F_i|$  [см. формулу (7)], под воздействием которой происходит скатывание вагона по спускной части горки, удобнее представить в виде

$$|\Delta F_i| = (k_{x0i} + |k_{oi} + k_{kpi} + k_{\text{стр}} + k_{\text{св}} + k_{\text{сн}}|) G, \quad (18)$$

где  $k_{x0i} = i_{xi} + k_{\text{вх}}$  — условный коэффициент, учитывающий воздействие силы, способствующей движению вагона по профилю горки.

### РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ ВАГОНА НА ПРОМЕЖУТОЧНОМ УЧАСТКЕ СОРТИРОВОЧНОЙ ГОРКИ

Для примера исследуем промежуточный участок (ПР), расположенный после разделительной стрелки сортировочной горки.

### Исходные данные

$G = 908$  кН — сила тяжести вагона с грузом;  $v_{H4c} = 2,723$  м/с — начальная скорость и/или скорость входа вагона на участок ПР после стрелки;  $\psi_{4c} = 0,0011$  рад — уклон спускной части горки;  $l_{4c} = 21,271$  м — длина рассматриваемого участка горки;  $F_{x4c} = 13,18$  кН — проекция силы тяжести вагона  $G$  на ось  $Cx$  с учетом проекции силы попутного ветра малой величины  $F_{bx}$  ( $F_{bx} \approx 3,2$  кН) на участке ПР горки;  $F_{o4c} = k_{o4c}G = 0,0001 \cdot 908 \approx 0,0908$  кН — сила от основного сопротивления движению вагона;  $F_{cb} = k_{cb}G = 0,0005 \cdot 908 = 0,454$  кН — сила сопротивления от воздушной среды и ветра;  $F_{ch} = k_{ch}G = 2,5 \cdot 10^{-4} \cdot 908 = 0,227$  кН — сила сопротивления от снега и инея;  $F_{ctr} = k_{ctr}G = 2,5 \cdot 10^{-4} \cdot 908 = 0,227$  кН — сила сопротивления при проходе разделительной стрелки;  $F_{kr4c} = k_{kr4c}G = 6,052 \cdot 10^{-4} \cdot 908 \approx 0,095$  кН — сила сопротивления при проходе кривых (и/или сопротивление от кривых);  $|F_{c4c}| = 1,911$  кН — в общем случае сила сопротивления всякого рода на участке ПР горки.

### Результаты расчета [22]

Безразмерная величина  $i_{x04c}$ , условно характеризующая обозначение уклона спускной части горки с учетом воздействия проекции силы попутного ветра  $F_{bx}$ , рассчитанная по формуле (13):

$$i_{x04c} = 0,015.$$

Безразмерная величина  $|w_4|$ , условно характеризующая обозначение удельного сопротивления движению вагона по спускной части горки, вычисленная по формуле (16):

$$\begin{aligned} |w_7| &= k_{o4c} + k_{cb} + k_{ch} + k_{ctr} + k_{kr4c} = \\ &= 0,001 + 0,0005 + 0,00025 + 0,00025 + 0,00061 = 0,0021. \end{aligned}$$

Результирующая сила, под воздействием которой происходит скатывание вагона по спускной части сортировочной горки  $|\Delta F_7|$ , вычисленная на основе формулы (3) и/или (13), кН:

$$|\Delta F_{4c}| = F_{x4c} - |F_{c4c}| = (13,18 - 1,911) = 11,268 \approx 11,3.$$

Ускорение центра масс вагона  $C_v$ , вычисленное по формуле (1), м/с<sup>2</sup>:

$$a_{4c} = |\Delta F_{4c}| \cdot 10^3 / M_{np} = |11,3| \cdot 10^3 / (9,256 \cdot 10^4) = 0,122.$$

Ускорение центра масс вагона  $C_v$ , вычисленное по формуле (14), м/с<sup>2</sup>:

$$a_{4c} = g(i_{x7} - |w_7|) = 9,81 \cdot (0,015 - 0,002105) \approx 0,122.$$

Таким образом, результаты расчетов ускорения вагона на участке сортировочной горки по формуле (1) полностью соответствуют значениям, полученным из выражения (14) с использованием понятий существующей методики.

### ВЫВОДЫ

1. С использованием принципов теоретической механики доказано, что ускорение вагона на сортировочной горке является важнейшим кинематическим параметром, определяющим фактическую скорость прохождения каждого участка.

2. Приведенные результаты расчетов ускорений на одном из скоростных участков сортировочной горки с учетом и без учета массы вращающихся частей вагона показали их незначительное расхождение, что позволяет сделать вывод о возможности пренебрежения моментами вращающихся частей вагонов при проектировании скоростных участков сортировочных горок.

3. Результаты расчетов ускорений движения вагона на скоростных участках сортировочной горки по формуле, полученной с применением основных принципов теоретической механики, и из выражения, представленного с использованием понятий существующей методики расчета сортировочной горки, показали их полное соответствие.

### Литература

1. Туранов Х. Т., Гордиенко А. А. Некоторые проблемы теоретических предпосылок динамики скатывания вагона по уклону сортировочной горки // Бюллетень транспортной информации. 2015. № 3 (237). С. 29–36. ISSN 2072–8115.
2. Рудановский В. М., Старшов И. П., Кобзев В. А. О попытке критики теоретических положений динамики скатывания вагона по уклону сортировочной горки // Бюллетень транспортной информации. 2016. № 6 (252). С. 19–28. ISSN 2072–8115.
3. Туранов Х. Т., Гордиенко А. А. О попытке доказательства корректности существующего метода исследования движения вагона по спускной части сортировочной горки // Бюллетень транспортной информации. 2016. № 10 (256). С. 19–24. ISSN 2072–8115.
4. К вопросу движения вагона по уклону железнодорожного пути / Ю. О. Пазойский, В. А. Кобзев, И. П. Старшов, В. М. Рудановский // Бюллетень транспортной информации. 2018. № 2 (272). С. 35–38. ISSN 2072–8115.

### References

1. Turanov Kh. T., Gordienko A. A. Some problems of theoretical precondition of dynamics of car rolling on inclination of a marshalling hump [Nekotorye problemy teoreticheskikh predposylok dinamiki skatyvaniya vagona po uklonu sortirovochnoy gorki] // Bulletin of Transport Information. 2015. No. 3 (237). Pp. 29–36. ISSN 2072–8115.
2. Rudanovsky V. M., Starshov I. P., Kobzev V. A. About the attempt of criticism of theoretical positions on dynamics of the car rolling on the marshalling hump slope [O popytke kritiki teoreticheskikh polozheniy dinamiki skatyvaniya vagona po uklonu sortirovochnoy gorki] // Bulletin of Transport Information. 2016. No. 6 (252). Pp. 19–28. ISSN 2072–8115.
3. Turanov Kh. T., Gordienko A. A. About the attempt to prove the correctness of a new method relating to the research of a car movement on the slope of a marshalling hump [O popytke dokazatel'stva korrektnosti sushhestvuyushhego metoda issledovaniya dvizheniya vagona po spusknoy chasti sortirovochnoy gorki] // Bulletin of Transport Information. 2016. No. 10 (256). Pp. 19–24. ISSN 2072–8115.
4. On the question of car movement on the railway track incline [K voprosu dvizheniya vagona po uklonu zheleznodorozhnogo puti] / Yu. O. Pazoyskiy, V. A. Kobzev, I. P. Starshov, V. M. Rudanovsky // Bulletin of Transport Information. 2018. No. 2 (272). Pp. 35–38. ISSN 2072–8115.

5. Туранов Х. Т., Гордиенко А. А., Молчанова О. В. Выбор рационального режима роспуска «очень плохого бегуна» с сортировочной горки // Транспорт: наука, техника, управление. 2018. № 7. С. 9–13. ISSN 0236–1914.
6. Туранов Х. Т., Гордиенко А. А. Математическое описание движения вагона на участках тормозных позиций сортировочной горки // Транспорт Урала. 2018. № 2 (57). С. 3–8. DOI: 10.20291/1815-9400-2018-2-3-8. ISSN 1815–9400.
7. Туранов Х. Т., Гордиенко А. А. Критический анализ теоретических положений движения вагона с сортировочной горки (часть I) // Бюллетень транспортной информации. 2018. № 9 (279). С. 23–28. ISSN 2072–8115.
8. Туранов Х. Т., Гордиенко А. А., Джаббаров Ш. Б. К критическому анализу теоретических положений движения вагона с сортировочной горки // Транспорт: наука, техника, управление. 2018. № 11. С. 26–31. ISSN 0236–1914.
9. Туранов Х. Т., Гордиенко А. А. Критический анализ теоретических положений движения вагона с сортировочной горки (часть II) // Бюллетень транспортной информации. 2018. № 12 (282). С. 12–18. ISSN 2072–8115.
10. Turanov Kh., Gordienko A. Movement of a railway car rolling down a classification hump with a tailwind // MATEC Web Conf. 2018. Vol. 216. Pp. 1–7.
11. Образцов В. Н. Станции и узлы. Ч. II. М. : Трансжелдориздат, 1938. 492 с.
12. Земблинов С. В., Страковский И. И. Станции и узлы. М. : Трансжелдориздат, 1963. 348 с.
13. Правила и нормы проектирования сортировочных устройств на железных дорогах колеи 1520 мм. М. : Техинформ, 2003. 168 с.
14. Железнодорожные станции и узлы (задачи, примеры, расчеты) : учеб. пособие / Н. В. Правдин, В. Г. Шубко, Е. В. Архангельский и др. ; под ред. Н. В. Правдина, В. Г. Шубко. М. : Маршрут, 2005. 502 с.
15. Проектирование инфраструктуры железнодорожного транспорта (станции, железнодорожные и транспортные узлы) : учеб. / Под ред. Н. В. Правдина и С. П. Вакуленко. М. : УМЦ ЖДТ, 2012. 1086 с.
16. Железнодорожные станции и узлы : учеб. / Под ред. В. И. Апатцева и Ю. И. Ефименко. М. : УМЦ ЖДТ, 2014. 855 с.
17. Яблонский А. А., Никифорова В. М. Курс теоретической механики : учеб. СПб. : Изд-во «Лань», 1998. 768 с.
18. Тарг С. М. Краткий курс теоретической механики : учеб. М. : Высшая школа, 1998. 416 с.
19. Туранов Х. Т., Гордиенко А. А. Движение вагона на сортировочной горке при попутном ветре // Мир транспорта. 2015. Т. 13. № 6 (61). С. 36–43. ISSN 1992–3252.
20. Туранов Х. Т. Теоретическая механика в специальных задачах грузовых перевозок. Новосибирск : Наука ; Екатеринбург : Изд-во УрГУПС, 2012. 447 с.
21. Иванов П. С. Кинетика усталостного разрушения рельсовых плетей железнодорожного пути по дефектам в подошве рельса. Нижний Новгород, 2009. 74 с.
22. Кирьянов Д. В. Mathcad 15 / Mathcad Prime 1.0. СПб. : БХВ-Петербург, 2012. 432 с.
23. Комаров К. Л., Яшин А. Ф. Теоретическая механика в задачах железнодорожного транспорта. Новосибирск : Наука, 2004. 296 с.
24. Водопьянов В. И., Савкин А. Н., Кондратьев О. В. Курс сопротивления материалов с примерами и задачами : учеб. пособие. Волгоград : ВолгГТУ, 2012. 136 с.
5. Turanov Kh. T., Gordienko A. A., Molchanova O. V. Determination of the rational driving mode of «very bad runner» from marshalling hump [Vybor ratsional'nogo rezhima rospuska «ochen' plokhogo beguna» s sortirovochnoy gorke] // Transport: science, equipment, management. 2018. No. 7. Pp. 9–13. ISSN 0236–1914.
6. Turanov Kh. T., Gordienko A. A. Mathematical description of car movement on sections of hump retarder positions [Matematicheskoe opisanie dvizheniya vagona na uchastkakh tormoznykh pozitsiy sortirovochnoy gorke] // Transport of the Urals. 2018. No. 2 (57). Pp. 3–8. DOI: 10.20291/1815-9400-2018-2-3-8. ISSN 1815–9400.
7. Turanov Kh. T., Gordienko A. A. A critical analysis of theoretical positions of movement of the car from marshalling hump (part 1) [Kriticheskiy analiz teoreticheskikh polozheniy dvizheniya vagona s sortirovochnoy gorke (chast' I)] // Bulletin of Transport Information. 2018. No. 9 (279). Pp. 23–28. ISSN 2072–8115.
8. Turanov Kh. T., Gordienko A. A., Dzhabbarov Sh. B. For critical analysis of theoretical positions of car's movement from marshalling hump [K kriticheskomu analizu teoreticheskikh polozheniy dvizheniya vagona s sortirovochnoy gorke] // Transport: science, equipment, management. 2018. No. 11. Pp. 26–31. ISSN 0236–1914.
9. Turanov Kh. T., Gordienko A. A. A critical analysis of theoretical positions of the car's movement from the marshalling hump (part II) [Kriticheskiy analiz teoreticheskikh polozheniy dvizheniya vagona s sortirovochnoy gorke (chast' II)] // Bulletin of Transport Information. 2018. No. 12 (282). Pp. 12–18. ISSN 2072–8115.
10. Turanov Kh., Gordienko A. Movement of a railway car rolling down a classification hump with a tailwind // MATEC Web Conf. 2018. Vol. 216. Pp. 1–7.
11. Obraztsov V. N. Stations and junctions. Part II [Stantsii i uzly]. Moscow : Transzheldorizdat, 1938. 492 p.
12. Zemblinov S. V., Strakovskiy I. I. Stations and junctions [Stantsii i uzly]. Moscow : Transzheldorizdat, 1963. 348 p.
13. Rules and regulations for design of sorting devices on 1520 mm railways tracks [Pravila i normy proektirovaniya sortirovochnykh ustroystv na zheleznykh dorogakh kolei 1520 mm]. Moscow : Tekhinform, 2003. 168 p.
14. Railway stations and junctions (tasks, examples, calculations) [Zheleznodorozhnye stantsii i uzly (zadachi, primery, raschety)] : textbook / N. V. Pravdin, V. G. Shubko, E. V. Arkhangel'skiy, et al. ; ed. by N. V. Pravdin, V. G. Shubko. Moscow: Route, 2005. 502 p.
15. Design of railway transport infrastructure (stations, railway and transport junctions) [Proektirovanie infrastruktury zheleznodorozhnogo transporta (stantsii, zheleznodorozhnye i transportnye uzly) : textbook / Ed. by N. V. Pravdin and S. P. Vakulenko. Moscow : UMTs ZhDT, 2012. 1086 p.
16. Railway stations and junctions [Zheleznodorozhnye stantsii i uzly] : textbook / Ed. by V. I. Apattsev and Yu. I. Efimenko. Moscow : UMTs ZhDT, 2014. 855 p.
17. Yablonskiy A. A., Nikiforova V. M. A course for theoretical mechanics [Kurs teoreticheskoy mekhaniki] : textbook. St. Petersburg : Publishing House Lan, 1998. 768 p.
18. Targ S. M. A short course for theoretical mechanics [Kratkiy kurs teoreticheskoy mekhaniki] : textbook. Moscow : High School, 1998. 416 p.
19. Turanov Kh. T., Gordienko A. A. Car movement at hump yard under tail wind [Dvizhenie vagona na sortirovochnoy gorke pri poputnom vetre] // World of Transport and Transportation. 2015. Vol. 13. No. 6 (61). Pp. 36–43. ISSN 1992–3252.
20. Turanov Kh. T. Theoretical mechanics in special tasks on cargo transportation [Teoreticheskaya mekhanika v spetsial'nykh zadachakh gruzovykh perevozk]. Novosibirsk : Science ; Ekaterinburg : Publishing House of USURT, 2012. 447 p.
21. Ivanov P. S. Kinetics of fatigue failure of railway track rail strings on defects in rail base [Kinetika ustalostnogo razrusheniya rel'sovykh pletey zheleznodorozhnogo puti po defektam v podoshve rel'sa]. Nizhny Novgorod, 2009. 74 p.
22. Kiryanov D. V. Mathcad 15 / Mathcad Prime 1.0. St. Petersburg : BHV-Petersburg, 2012. 432 p.
23. Komarov K. L., Yashin A. F. Theoretical mechanics in railway transport tasks [Teoreticheskaya mekhanika v zadachakh zheleznodorozhnogo transporta]. Novosibirsk : Science, 2004. 296 p.
24. Vodopyanov V. I., Savkin A. N., Kondratyev O. V. Course of materials strength with examples and tasks [Kurs soprotivleniya materialov s primerami i zadachami] : textbook. Volgograd : Volgograd State Technical University, 2012. 136 p.

УДК 656.078

**Николай Андреевич Тушин, доктор технических наук, профессор кафедры «Управление эксплуатационной работой» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,**

**Олег Викторович Осокин, доктор технических наук, вице-президент научно-производственного холдинга СТРАТЕГ, Москва, Россия,**

**Андрей Валерьевич Чумаков, аспирант кафедры «Управление эксплуатационной работой» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия**

## ОПЕРАЦИОННЫЕ ЦИКЛЫ ТРАНСПОРТНО-ЭКСПЕДИТОРСКИХ ПРЕДПРИЯТИЙ

**Nikolay Andreyevich Tushin, DSc in Engineering, Professor, Operations Management Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,**

**Oleg Viktorovich Osokin, DSc in Engineering, Vice-President of Research & Production Holding STRATEG, Moscow, Russia,**

**Andrey Valeryevich Chumakov, postgraduate student, Operations Management Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia**

### Operating cycles of freight forwarding companies

#### Аннотация

Развитие рынка транспортно-экспедиторских услуг приводит к усложнению бизнес-моделей. Оценивать эффективность принимаемых решений ручным способом становится все более затруднительно, однако дальнейшая автоматизация экспедиторских предприятий сдерживается из-за недостаточной формализации производственных процессов.

В статье исходя из анализа технологических процессов ряда компаний обозначены подходы к содержательной трактовке операционных циклов экспедиторских предприятий. Предложена организация учета на основе лимитирующего компонента цепи поставок. Показано, что продажи и производство при планировании целесообразно измерять в вагонах или контейнерах, а не в рублях. Операционный цикл следует формировать от потребностей заказчика и с учетом интересов подрядчиков. В целом предложенная авторами формализация создает предпосылки для дальнейшей автоматизации процессов принятия решений в транспортно-экспедиторских компаниях.

**Ключевые слова:** бизнес-процесс транспортно-экспедиторского предприятия, автоматизация бизнес-процессов в логистике, операционный цикл на транспорте, планирование цепей поставок, экспедиторская фирма.

#### Summary

Development of freight forwarding services market leads to complication of business models. To assess the effectiveness of decisions made using manual mode is becoming more and more complicated but the further automation of freight forwarding companies is being retarded because of the insufficient formalization of servicing business processes.

The paper defines approaches to substantive interpretation of freight forwarding companies business processes based on analysis of companies technological processes. The authors propose to organize the accounting on the basis of limiting components of supply chain and show that sales and production in planning is rational to measure in cars and containers, not in rubles. Operating cycle is necessary to form according to demands of customers and taking into account interests of contractors. As a result the proposed formalization creates the premises for further automation of decision making processes in freight forwarding companies.

**Keywords:** business process of a freight forwarding company, automation of business processes in logistics, operating cycle on transport, planning of supply chains, freight forwarding company.

DOI: 10.20291/1815-9400-2019-1-24-28

**Р**ынок транспортно-экспедиторских услуг в России развивается довольно динамично — сюда не только приходят все новые и новые игроки, но и традиционные перевозчики считают его перспективным и создают собственные экспедиторские и логистические подразделения. Например, холдинг «РЖД» выделил в своей структуре отдельный транспортно-логистический бизнес-блок. Однако основная масса предприятий относится к сегменту малого бизнеса с численностью персонала 20–30 человек. Ограниченные ресурсы не позволяют таким организациям создавать собственные отделы информационных технологий.

Тем не менее, начальный этап автоматизации транспортно-экспедиторских компаний пройден. Везде автоматизирован учет. Как правило, применяется система «1С: Предприятие» с различными расширениями. Основной рыночной концепцией в отрасли признана близость к клиенту, клиентоориентированность. Поэтому следующим шагом в автоматизации стало внедрение элементов управления взаимоотношениями с клиентами (CRM) [1]. Вместе с тем дальнейшее усложнение бизнеса и в количественном (рост объемов, географический охват), и в качественном плане (аренда вагонов, складов, подъездных путей) делает актуальной задачу оценки эффективности принимаемых решений. Возникает необходимость в анализе себестоимости и доходности услуг с раскладкой по периодам, подразделениям и т.п. Обостряются проблемы оперативного контроля и регулирования процессов исполнения заказов. Все это приводит к необходимости авто-



матизации производства. Однако формализация технологических процессов выполнения транспортно-экспедиторских операций практически отсутствует, что делает актуальными исследования в этой области.

Эффективность автоматизации управления транспортно-экспедиторским предприятием во многом зависит от постановки регулярного менеджмента [2]. Разработка информационных систем базируется на формализации бизнеса компании, необходимо описание функций, процессов и структур. Основной стратегический ориентир предприятия — устойчивый рост стоимости бизнеса. На практике наиболее простой и распространенной для анализа эффективности управления является модель приращения стоимости капитала. Показатель «капитал» стандартно включается в отчетность и не вызывает особых трудностей в контроле. Как следует из анализа балансов транспортно-экспедиторских предприятий, значительную долю стоимости компаний занимает оборотный капитал. Правда, в последнее время под влиянием конкуренции наметилась тенденция инвестирования и в основной капитал. Предприятия покупают собственные транспортные средства, устройства механизации и складские площади [3]. Вместе с тем задача управления оборотным капиталом по-прежнему актуальна.

Под оборотным капиталом понимают средства, инвестируемые компанией в свою операционную деятельность в течение каждого производственного цикла. Часто это трактуется как оборотные средства или как текущие активы. Оборотный капитал участвует только в одном производственном цикле и полностью переносит свою стоимость на продукцию, в то время как основной капитал неоднократно участвует в процессе производства и переносит свою стоимость на продукцию по частям.

Контур управления оборотным капиталом (рис. 1) включает в себя денежные средства, сырье и материалы, незавершенное производство, готовую продукцию на складе и дебиторскую задолженность (в том числе предоплату поставщикам).

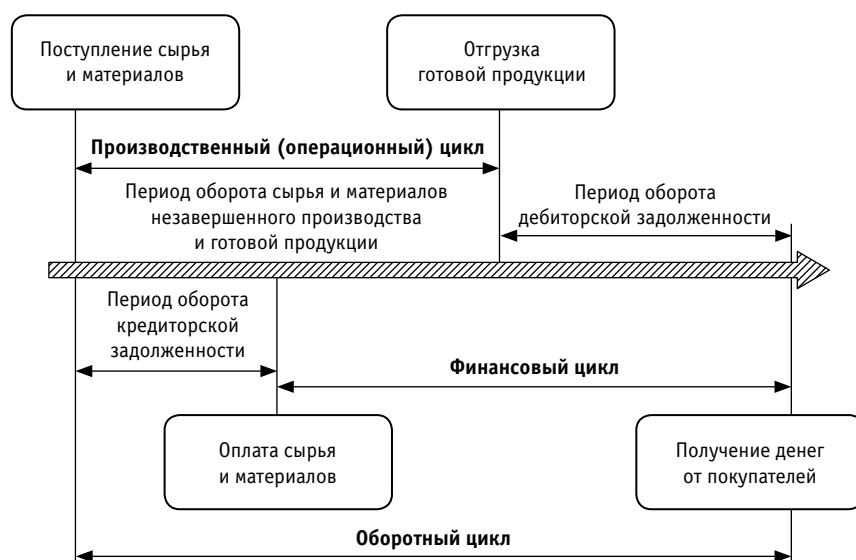


Рис. 1. Взаимосвязь производственного, финансового и оборотного цикла

Производственный цикл начинается с момента поступления сырья и материалов от поставщиков и завершается отгрузкой готовой продукции. Понятно, что данный термин не совсем подходит для транспортно-экспедиторских и логистических компаний, однако он уже считается общепринятым. Следовательно, для предприятий транспортно-логистического рынка необходима содержательная трактовка операционного цикла. С этой целью были проанализированы производственные процессы ряда транспортно-экспедиторских компаний в Московской области и Уральском регионе.

Для изучения были выбраны разнотипные предприятия, работающие как на железнодорожном, так и автомобильном транспорте. В выборку также включены компании, оказывающие операторские услуги по предоставлению вагонов. В ходе обследования выявлено, что на всех предприятиях внедрены блоки CRM. Основной учетной единицей является заявка клиента в рамках договора транспортно-экспедиционного обслуживания. Объем, технологическая цепочка и сроки выполнения заявки даже в одной компании могут быть совершенно различными. Это может быть и разовая доставка, скажем, комплект шин из Москвы в Екатеринбург, и контрактная поставка, например комплект оборудования для строящегося производства

или буровой установки, — такая перевозка растягивается на несколько месяцев и выполняется комбинированно в вагонах и автомобилях. Встречаются заявки и на обеспечение месячного объема отгрузки предприятия по предоставленному плану продаж. Наиболее сложными технологическими цепочками являются контейнерные интермодальные перевозки. Учетной единицей измерения выступает рубль. Перевозки по территории иностранных государств или с привлечением транспортных компаний нерезидентов учитываются также в рублях с использованием специальных алгоритмов приведения. Производственные операции предоставления услуг формализованы слабо. Практически нет документирования технологического процесса, в лучшем случае наблюдается техническое нормирование некоторых операций. Отсутствие пооперационного учета затрудняет оценку себестоимости — затраты разносятся укрупненно или котловым способом. Такая практика осложняет принятие решений по формированию цепей поставок. Как правило, решения принимаются отдельно по каждой заявке в момент ее появления или при возникновении конкретной критической ситуации. Понятно, что большинство руководителей испытывают потребность в автоматизации выработки и принятия решений.

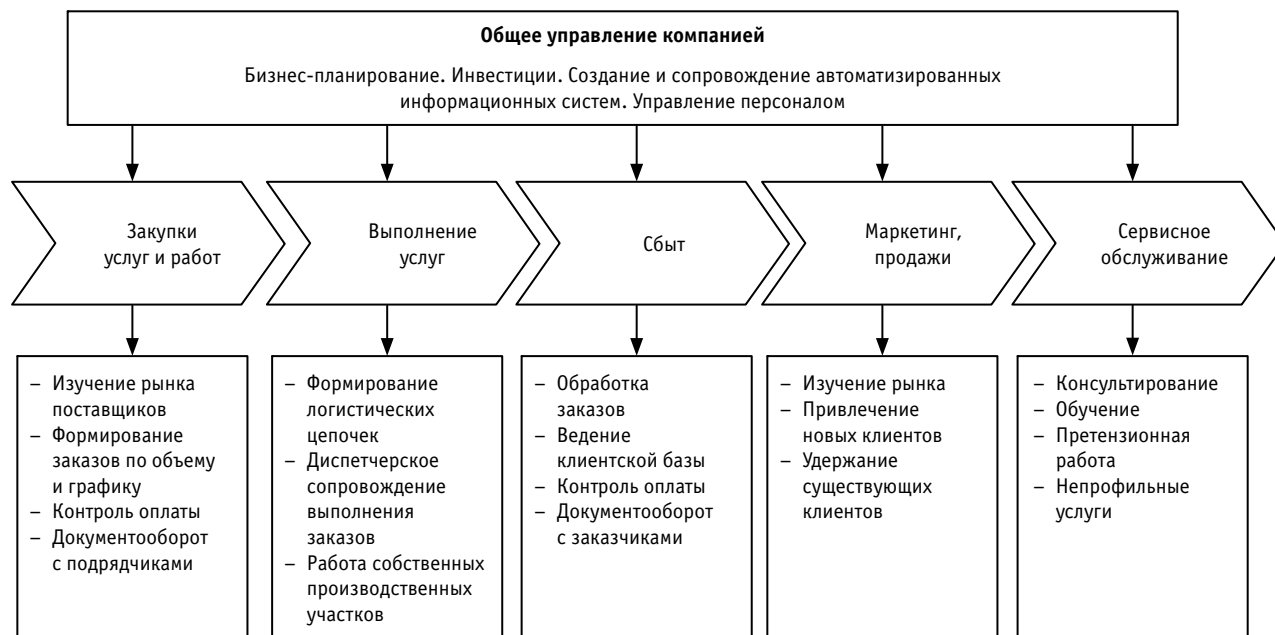


Рис. 2. Основные бизнес-процессы экспедиторской компании

В рыночной экономике экономическое взаимодействие, возможность заключения контракта в значительной мере определяются совокупной стоимостью и временем доставки груза. Основную ценность представляет целостная функция — доставка товара от двери до двери. Для этого необходимо формирование цепочки поставок. Процесс доставки груза включает в себя две важные составляющие — перемещение потока и преобразование потока [4]. С точки зрения системного анализа для реализации функции необходимы соответствующие структуры. И такие структуры — экспедиторские и транспортно-логистические фирмы. Экспедиторская компания является, по сути, системным интегратором на транспорте. Для доставки груза формируется временная система (цепь поставок) из разных перевозчиков и сервисных предприятий. Все участники должны работать согласованно, как подсистемы. Для этого необходимо планировать режимы работы участников цепочки и соответствующий набор контрольных показателей. Кроме того, требуется оперативное управление фактическим перемещением груза по цепочке. На практике экспедиторские компании сами могут включаться в цепочки поставок и выполнять только часть сервисных функций. Тем не менее, основная продукция экспедиторов — сформированная и реализованная в пространстве и времени цепь поставок. Этими задачами и определяется содержание основных бизнес-процессов в отрасли (рис. 2).

Под операционным производственным циклом принято понимать время с момента поступления материалов на склад предприятия до момента отгрузки покупателю продукции, которая была изготовлена из данных материалов. Операционный цикл включает в себя реализацию основных бизнес-процессов предприятия. Процесс снабжения обеспечивает поставку и входное хранение на складе сырья и материалов. Сбыт обеспечивает хранение и оборот готовой продукции, товаров.

С точки зрения управления капиталом в производстве происходит некоторый оборот сырья и материалов (незавершенное производство).

В экспедиторском предприятии под процессом выполнения услуг следует понимать формирование цепи поставок, диспетчерское сопровождение физического перемещения грузов по заданной цепочке, необходимые регулировочные меры и работу собственных производственных участков. К таким участкам можно отнести автотранспорт, грузовые площадки и терминалы, склады. Снабжение следует трактовать как поддержание договорных отношений с потенциальными участниками логистических цепей. Для реализации услуги покупателю такая цепь должна быть скомплектована из подрядчиков. При этом осуществляется согласование как по количеству транспортных средств, производственных мощностей, пропускных способностей, так и по времени, графикам выполнения работ. Оказание услуги начинается после поступления заявки. На первый взгляд такой подход соответствует принципу «производство на заказ». Принято считать основной особенностью предоставления услуг отсутствие возможности «производства на склад», т.е. услуга выполняется в процессе производства. Однако в отношении транспортно-экспедиторских услуг это не совсем так. К аналогам хранения сырья на складе можно отнести такие технологические операции, как отстой порожних вагонов на подъездном пути, заадресовка вагонов без получения конкретных заявок на перевозку, получение блока транзитных кодов на перевозки через иностранные территории. Окончание производства услуги после получения заказа скорее соответствует принципу «завершение на заказ».

Таким образом, момент поступления сырья можно трактовать как момент получения права распоряжаться определенным ресурсом подрядчика. Под отгрузкой готовой продукции сле-

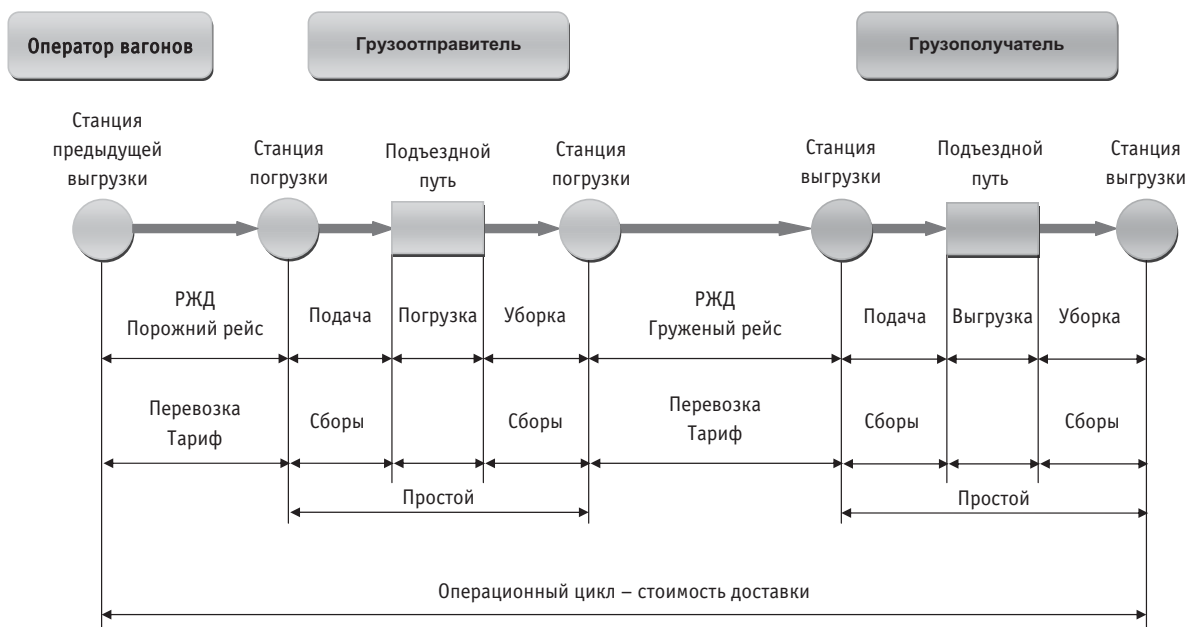


Рис. 3. Цепь поставок

дует понимать поставку товаров в пункт назначения. На практике многие экспедиторские фирмы, чтобы сократить оборотные циклы, ускорить расчеты и уменьшить размеры привлечения оборотных средств, в учетной политике фиксируют дату старта прохождения по цепи поставок как момент отгрузки готовой продукции. Но с теоретической и законодательной точки зрения это неверно.

На оборотный капитал оказывает влияние и финансовый цикл — время с момента оплаты поставщиком материалов, услуг (погашение кредиторской задолженности) до момента получения денег от покупателей за отгруженную продукцию (погашение дебиторской задолженности). От продолжительности финансового цикла напрямую зависит эффективность. В некоторых случаях предоставление отсрочек платежей приводит к снижению капитала компании. В производственном процессе транспортно-экспедиторского предприятия, как правило, находятся несколько цепей поставок одновременно. Сами цепочки могут различаться и набором подрядчиков, и продолжительностью операционных циклов, и финансовыми условиями. Начало и окончание цепочек распределено во времени. Для принятия эффективных управленческих решений при ограниченных ресурсах актуальной становится задача согласования поступивших заказов или отказа от них. Возникает необходимость совокупного планирования продаж и производства.

Другая важная проблема, требующая решения при автоматизации, — выбор единицы измерения продаж, производства и запасов. Ключом успеха стратегии «завершение на заказ» является способность быстро производить продукт из имеющихся компонентов. Быстрое производство возможно только при наличии всех компонентов [5]. В качестве задачи планирования должен выступать объем услуг и транспортных средств, предоставляемых подрядчиками и используемых

в цепи поставок. Несмотря на большое разнообразие номенклатуры услуг поставщиков, срок выполнения заказа на практике зависит, как правило, от одного основного компонента. На железнодорожном транспорте это вагоны. Для контейнерных перевозок важен момент получения контейнера. Поэтому планирование продаж и производства целесообразно измерять в вагонах либо контейнерах.

Формирование контрактной цены поставок происходит на основе себестоимости производства, рентабельности и транспортных расходов. В самом простом случае (поставки во внутригосударственном сообщении) перевозка осуществляется со станции отправления до станции получения (рис. 3). Грузоотправитель рассчитывает транспортные расходы как сумму тарифа за пользование инфраструктурой РЖД в груженом рейсе, стоимости предоставления вагона на рейс и сборов станции примыкания. Оператор вагонов рассчитывает плату за рейс, исходя из желаемой ставки пользования вагоном. В экономическом плане суточная ставка аренды отражает желание инвестора окупить вложения в вагонный парк в разумные сроки. В настоящее время такая ставка может колебаться в пределах 2500–3000 руб./сут. Плановый операционный цикл включает в себя нормативный срок доставки порожнего вагона, нормативный срок доставки груженого вагона, простой вагонов под погрузкой, под выгрузкой (например, 2 сут). Операционный цикл умножается на доходную суточную ставку, прибавляется тариф за подсылку порожнего вагона, и в результате формируется ставка предоставления вагона за рейс.

Фактическая эффективность предоставления вагонов будет зависеть от реального графика перевозки. Распределение ответственности между участниками перевозки за реализацию сроков поставок на практике сложилось следующим образом: сроки доставки в порожнем и груженом рейсе регулируются

между оператором и РЖД, ответственность за нахождение вагонов на станции погрузки и выгрузки несет грузоотправитель. Реального воздействия на время нахождения вагона на станции прибытия ни грузоотправитель, ни даже грузополучатель оказать не могут. То есть произошел определенный технологический разрыв между РЖД, грузоотправителем и оператором вагонов. Этот разрыв многие грузоотправители перекладывают на плечи экспедиторов. Следует обратить внимание на то, что операционный цикл железнодорожного транспорта и реальная потребность грузоотправителя не совпадают.

С целью решения проблем заказчиков и формируется операционный цикл транспортно-логистических компаний. Для заказчиков услуг цепь поставок должна быть реализована в определенный срок и за определенную стоимость. Для подрядчика необходимо обеспечить желаемую суточную доходную ставку.

Проектирование цепей поставок с учетом различных критериев плюс собственные коммерческие интересы вынуждают экспедиторские фирмы тщательно подходить к анализу себестоимости. Реальные производственные циклы могут быть гораздо более сложными и разветвленными, чем в приведенном примере. Тем не менее, планирование операций следует начинать с ключевого, лимитирующего, ресурса. Услуги и работы других участников цепи поставок при планировании необходимо приводить к вагону или контейнеру. Дополнение сложившихся информационных систем позаявочного учета взаимоотношений с клиентами производственным учетом по операционным циклам позволит качественно улучшить процесс планирования продаж и выполнения услуг. Формализация управления производством создаст предпосылки для автоматизации принятия решений в транспортно-экспедиторских компаниях.

## Литература

1. Щербаков В. В., Мерзляк А. В., Коскур-Оглы Е. О. Автоматизация бизнес-процессов в логистике : учеб. СПб. : Питер, 2016. 464 с.
2. Тушин Н. А., Чумаков А. В., Тимухин К. М. Стратегические ориентиры и автоматизация транспортно-экспедиторских предприятий // Транспорт Урала. 2017. № 2 (53). С. 8–12. DOI: 10.20291/1815-9400-2017-2-8-12. ISSN 1815–9400.
3. Тушин Н. А., Тимухин К. М. Влияние конкуренции на рынок транспортно-экспедиционных услуг // Транспорт Урала. 2016. № 2 (49). С. 69–74. DOI: 10.20291/1815-9400-2016-2-69-74. ISSN 1815–9400.
4. Тушин Н. А., Улижева Н. Н. Роль экспедиционных предприятий в транспортных процессах // Транспорт Урала. 2014. № 4 (43). С. 56–58. ISSN 1815–9400.
5. Уоллас Т., Сталь Р. Планирование продаж и операций : практ. рук. / Пер. с англ. СПб. : Питер, 2010. 272 с.

## References

1. Shherbakov V. V., Merzlyak A. V., Koskur-Ogly E. O. Automation of business processes in logistics [Avtomatizatsiya biznes-protsessov v logistike] : textbook. St. Petersburg : Piter, 2016. 464 p.
2. Tushin N. A., Chumakov A. V., Timukhin K. M. Strategic identities and automation of forwarding agency [Strategicheskie orientiry i avtomatizatsiya transportno-ekspeditorskikh predpriyatiy] // Transport of the Urals. 2017. No. 2 (53). Pp. 8–12. DOI: 10.20291/1815-9400-2017-2-8-12. ISSN 1815–9400.
3. Tushin N. A., Timukhin K. M. Effects of competition on the market of freight forwarding services [Vliyanie konkurentsii na rynek transportno-ekspeditsonnykh uslug] // Transport of the Urals. 2016. No. 2 (49). Pp. 69–74. DOI: 10.20291/1815-9400-2016-2-69-74. ISSN 1815–9400.
4. Tushin N. A., Ulizheva N. N. The role of forwarding companies in transport processes [Rol' ekspeditsonnykh predpriyatiy v transportnykh protsessakh] // Transport of the Urals. 2014. No. 4 (43). Pp. 56–58. ISSN 1815–9400.
5. Wallace T., Stahl R. Sales and operations planning [Planirovanie prodazh i operatsiy] : practical guidance / Translation from English. St. Petersburg : Piter, 2010. 272 p.

Объем статьи 0,64 авторских листа

УДК 656.212.5:519.872.8

**Александр Леонидович Казаков, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник Института динамики систем и теории управления им. В. М. Матросова Сибирского отделения Российской академии наук (СО РАН), Иркутск, Россия,**

**Михаил Максимович Пavidис, аспирант Иркутского государственного университета путей сообщения (ИрГУПС), Иркутск, Россия**

## ОБ ОДНОМ ПОДХОДЕ К МОДЕЛИРОВАНИЮ РАБОТЫ СОРТИРОВОЧНЫХ СТАНЦИЙ

**Alexander Leonidovich Kazakov, DSc in Physics and Mathematics, Chief Research Scientist, Matrosov Institute for System Dynamics and Control Theory, the Siberian branch of Russian Academy of Sciences (SB RAS), Irkutsk, Russia, Mikhail Maximovich Pavidis, postgraduate student, Irkutsk State Transport University (ISTU), Irkutsk, Russia**

### On one approach to model operation of marshalling stations

#### Аннотация

Сортировочные станции обеспечивают реализацию наиболее сложных операций по организации вагонопотоков. При этом невозможно произвольным образом изменять характеристики вагонопотока и показатели работы станции. В связи с этим большую актуальность приобретает задача построения математических моделей существующих и проектируемых сортировочных станций для прогнозирования и оптимизации их работы путем проведения специально организованного компьютерного эксперимента. В статье представлен комплекс моделей, описывающих работу различных сортировочных станций. В качестве математической основы использован аппарат теории массового обслуживания. При этом сложность изучаемого объекта предъявляет к моделям повышенные требования: они имеют вид многофазных систем массового обслуживания с групповым поступлением заявок. Выполнен вычислительный эксперимент, который показал работоспособность предложенного подхода.

**Ключевые слова:** железнодорожная сортировочная станция, математическое моделирование, многофазная система массового обслуживания, ВМАР-поток.

#### Summary

Marshalling stations provide with the implementation of the most complex operations on the organization of car traffic. At the same time, it is impossible to change the characteristics of the car traffic and the station operating standards in arbitrary manner. In this regard, the task of creating mathematical models of existing and projected marshalling stations for forecasting and optimization of their operation by means of a specially organized computer experiment becomes more urgent. The paper presents a set of models that describes the operation of various marshalling stations. The apparatus of queuing theory is used as a mathematical basis for creating the models. Meanwhile, the complexity of the studied object imposes increased requirements on the models: they have the form of multistage queueing systems with a group receipt of requests. The authors performed a computational experiment that showed the efficiency of the proposed approach.

**Keywords:** railway marshalling station, mathematical modeling, multistage queueing system, Batch Markovian Arrival Process.

DOI: 10.20291/1815-9400-2019-1-29-35

#### ВВЕДЕНИЕ

Сортировочные станции (СС) занимают в перевозочном процессе особое место, обеспечивая реализацию наиболее сложных операций по организации вагонопотоков: их переработку и формирование технических маршрутов. От успешной работы сортировочных станций в огромной степени зависит устойчивость всего перевозочного процесса. В ходе изучения критических параметров работы, прогнозирования и проектирования сложных систем, к которым относятся СС, возможности проведения натурного обследования (по понятным причинам) крайне ограничены. Основными инструментами исследования здесь обычно выступают математическое моделирование и компьютерная имитация [1, 2]. Одна из важнейших задач, которая должна решаться с использованием указанного подхода, — обоснование типов схем СС, поскольку их необходимо рассматривать с учетом динамики изменения объемов работы станции, в первую очередь — переработки вагонов. Основная подзадача, которая при этом возникает и для решения которой необходимо применять методы имитационного моделирования, — определение граничного объема переработки.

Ранее авторами был предложен и реализован на примере одной конкретной станции новый подход к моделированию работы СС [3], основанный на использовании аппарата многофазных систем массового обслуживания (СМО) [4]. Такого рода математические модели широко применяются в области информационно-телекоммуникационных систем [5], однако на транспорте до недавнего времени не встречались. Цель настоящей статьи — развитие идей, рассмотренных в [3, 4] и применение указанного подхода для построения комплекса моделей работы СС. Математическое описание имеет вид трехфазной системы массового обслуживания, что позволяет учитывать существенное влияние случайных факторов и отразить структурные особенности станции. При этом для описания поездопотока

задействована модель ВМАР-потоков (Batch Markovian Arrival Process), предложенная итальянским ученым Д. Лукантони [6], которая позволяет рассматривать каждый поезд как одну или несколько групп заявок (вагонов).

Вероятностные модели, к числу которых относятся и СМО, не самые популярные в транспортной отрасли, однако применяются достаточно давно. Так, еще в классической монографии немецкого ученого Г. Поттгоффа [7] указывается на целесообразность использования в эксплуатационной работе методов теории вероятностей, в частности теории случайных процессов, математической статистики, корреляционного анализа. Применение СМО для моделирования различных процессов на железнодорожном транспорте изложено в работе [8], в основном там рассматриваются однофазные системы, однако упоминается и о существовании двухфазных (с. 189). Разнообразные модели грузовой работы на железнодорожном транспорте, в том числе имеющие вид СМО, были предложены А. А. Смаховым [9]. При этом отмечена необходимость учитывать возможность группового поступления заявок на обслуживание и нестационарность транспортного потока. Обзором классических монографий мы стремимся подчеркнуть, что идеи, которые мы высказываем в этой статье, в предшествующих работах [3, 4], а также в некоторых более ранних публикациях (см., например, [10, 11]), не являются революционными, а развивают предложения, сформулированные еще советскими учеными-транспортниками.

Тем не менее, приходится констатировать, что основное направление в моделировании железнодорожных транспортных систем связано с применением и развитием оптимизационных методов. И это вполне естественно, поскольку, как известно [12], первой из двух основных целей моделирования является именно оптимизация. Особого упоминания здесь заслуживают исследования П. А. Козлова и его научной школы. Например, в работах [13, 14] имеются примеры использования метода частично целочисленного линейного программирования и имитационного моделирования, а в [15, 16] предложенный метод сглаживания случайных транспортных потоков за счет использования бункеров рассмотрен на примере решения задач, связанных с расчетом пропускной способности станций, железнодорожных участков и т. д.

В то же время существует и вторая цель моделирования — прогнозирование. Эту задачу успешно решают вероятностные модели, реализованные в виде компьютерной имитационной модели. Ранее одним из авторов статьи совместно с М. Л. Жарковым был разработан «Программный комплекс для моделирования и расчетов параметров СМО» [4], который в заключительной части данной статьи используется для сценарного моделирования работы сортировочной станции при различных параметрах входящего поездопотока.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Сортировочные станции предназначены для массовой переработки прибывающих вагонопотоков по назначениям и для формирования новых поездов в соответствии с общесетевыми и дорожными планами. Они служат опорными техническими пунктами в организации вагонопотоков на сети железных до-

рог [17, 18]. В связи с этим, как уже отмечалось, важность их бесперебойной работы для обеспечения эффективного перевозочного процесса трудно переоценить.

При эксплуатации СС нередко возникают проблемы с пропуском железнодорожного внутростанционного вагонопотока, которые связаны с отказами следующего рода: 1) неисправностями локомотива; 2) появлением на участке количества поездов, превышающего его наличную пропускную способность. Как результат, в первом случае не обеспечивается плановое отправление поездов из системы, что влечет за собой излишнюю занятость путей поездами в парках отправления. Во втором — отсутствуют условия для своевременного отправления поездов со станции из-за занятости линии участка.

При этом невозможно рассматривать указанные проблемы как плановые и заложить возможность отказа в технологию работы станции, поскольку они носят главным образом случайный характер. Для учета подобных факторов можно использовать стохастическую математическую модель [3].

Важная проблема, требующая решения при изучении систем, подверженных влиянию случайных факторов, — то, что последние могут воздействовать не только на входящие потоки и их обработку, но и на структуру системы, которая зачастую становится изменчивой (вариативной). Отсюда особое значение приобретает создание адаптивных моделей, допускающих быструю перестройку под актуальные условия функционирования рассматриваемого объекта. Для этой цели обычно применяется технология метамоделирования [19], которая позволяет автоматизировать процедуру модификации моделей. В рамках наших исследований по разработке интеллектуальной системы управления транспортно-логистической инфраструктурой региона [20] в дальнейшем предполагается создание соответствующей адаптивной информационной системы.

## ПРЕДМЕТНАЯ МОДЕЛЬ

Согласно канонам математического моделирования [12], в качестве начального шага моделирования построим предметную модель СС.

Организацию работы на СС определяет технологический процесс (ТП), который регламентирует типовую последовательность обработки вагонопотока и включает следующие этапы:

- 1 — вагонопоток, прибывающий на СС, принимается в парк прибытия (ПП), где подвижной состав (ПС) закрепляется и обрабатывается в техническом и коммерческом отношении;
- 2 — подача маневрового локомотива для надвига ПС, уборка закрепления;
- 3 — надвиг ПС на горку (Г) для расформирования;
- 4 — функция расформирования на Г;
- 5 — накопление вагонов в сортировочном парке (СП) до полносоставного поезда согласно плану формирования поездов;
- 6 — после накопления выполнение операций по окончанию формирования поездов;
- 7 — перестановка состава в парк отправления (ПО);
- 8 — закрепление поездов в ПО, обработка в техническом и коммерческом отношении;
- 9 — подача поездного локомотива, уборка закрепления;
- 10 — отправление поездов из системы.



Выполним системный анализ объекта исследования. В такой сложной транспортной системе, как СС, существует множество различных параметров — элементов, связей между ними и их атрибутов. Выделим наиболее существенные из них, которые будут учтены в модели: вместимость парков; перерабатывающая способность горки; входящий вагонопоток; последовательность обработки вагонопотока; количество путей для перестановки составов из парка в парк.

К параметрам системы, которые явно не учитываются в модели, относятся: а) план формирования поездов; б) специализация путей; в) расходы, связанные с простоем вагонов в парках станции. Параметр а) регламентирует порядок формирования всех категорий вагоно- и поездопотоков, включая порядок их направления, в модели рассматривается только входящий вагонопоток по направлениям (четный и нечетный). Параметр б) учитывается опосредованно — через вместимость парков, которая рассчитывается исходя из специализации путей для четного и нечетного потоков. Параметр в) не рассматривается, так как финансово-экономические показатели работы станции находятся в данном случае за рамками исследования. Отметим, что в работах [13, 14] эти параметры учитываются как существенные.

Также для СС характерно наличие обратных связей, при переполнении одной из подсистем происходит ее блокировка, вследствие чего вагонопоток останавливается в предыдущей подсистеме.

С учетом поставленной задачи на основе проведенного анализа выделим следующие функциональные подсистемы (рис. 1):

- 1) подсистема «прибытие», в которой поезда принимаются, обрабатываются и надвигаются на Г (пункты 1–3);
- 2) подсистема «накопление — расформирование», в которой составы поездов расформировываются и вагоны накапливаются до полносоставного поезда (пункты 4–7);
- 3) подсистема «отправление», в которой поезда обрабатываются и отправляются из системы (пункты 8–10).

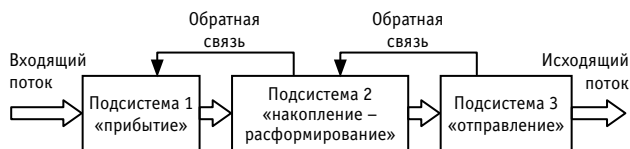


Рис. 1. Функциональные подсистемы сортировочной станции

Отметим отличительную особенность подсистемы 1 — это наличие сортировочной горки. На СС сортировочная горка — основное сортировочное устройство, предназначенное для расформирования поездов. Включение ее в первую подсистему обосновано тем, что она имеет собственную перерабатывающую способность.

Поезда из ПП в СП поступают по путям надвига, именно горка осуществляет барьерные функции в расформировании поездов, так как при их роспуске нужно учитывать особенности подвижного состава, которые затрудняют штатную работу горки. Также не на всех СС предусмотрен параллельный роспуск, который позволяет одновременно надвигать поезда из ПП в СП. Например, при двух путях надвига и горке средней

мощности поезда надвигаются последовательно друг за другом по одному пути, тем самым увеличивается время обслуживания на горке и, как следствие, на первом уровне в целом.

Проанализируем и выделим типы системы, которые определяются структурой составляющих подсистем:

А — в структуре такой системы расположение подсистем последовательное, работа с транспортными потоками сохраняет четкую поточность;

В — главными отличительными свойствами этой системы являются: а) параллельное расположение подсистем 1 и 2, где распределяется четный и нечетный прибывающий транспортный поток; б) параллельное расположение подсистем 2 и 3, что позволяет распределить отправляющиеся потоки по направлениям. Отметим, что подсистемы 1 и 3 могут иметь по два парка;

С — характерное отличие в такой системе — параллельное расположение всех подсистем. Подсистемы 1 и 3 выполняют функции по прибытию и отправлению, так как парки прибытия и отправления совмещены. Последовательность функционирования системы сохраняется полностью (см. рис. 1).

Для обеспечения поточности в работе СС целесообразно проектировать станции с последовательным расположением парков, которые соответствуют типу А, — такие станции имеют большую перерабатывающую способность.

Сортировочные станции с комбинированным расположением парков, соответствующие типу В, проектируются на ограниченной территории, на них вагонопоток меньше, чем на станциях с последовательным расположением парков, так как не обеспечивается полная поточность обработки поездов.

Схема СС с параллельным расположением всех парков (по типу С) применяется при небольших объемах работы, коротких путях с минимальным потоком поездов. Перерабатывающая способность этих станций невелика, так как нет последовательной поточности ни при расформировании, ни при формировании поездов.

Всего на сети железных дорог России существует 39 сортировочных станций, из них 20 (51 %) с последовательным расположением парков, 15 (39 %) с комбинированным расположением и 4 (10 %) с параллельным расположением всех парков.

Особого рассмотрения требует входящий поток, который обладает следующими свойствами: а) количество вагонов подчинено усеченному нормальному закону распределения; б) время прибытия поездов на СС является случайным и обычно подчинено экспоненциальному закону распределения, благодаря чему появляется возможность объединять разные транспортные потоки в один.

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ

Перейдем к математическому описанию предметной модели. Система имеет трехуровневую структуру, что позволяет использовать в качестве математического инструментария теорию массового обслуживания, при этом входной поток заявок, обладающий сложной структурой, моделируется при помощи ВМАР-потока, который позволяет гибко настроить входящий поток в систему. Математическое описание включает следующие этапы: установление структуры входящего потока заявок; выделение уровней движения заявок внутри системы; группировку

их в фазы; определение внутренних потоков и обратных связей между фазами, описание структуры исходящего потока.

Опираясь на предметную модель, рассмотрим базовую структуру и свойства СС. Выделены следующие уровни движения заявок: уровень входящего потока заявок, сортировочно-накопительная подсистема, подсистема обслуживания, подсистема отправления [18, 21]. Между подсистемами предусмотрены обратные связи, которые обеспечивают блокировку предыдущей, когда заняты все каналы на последующей.

В СС может поступать несколько различных входящих потоков заявок со своими параметрами, которые задаются на уровне входящего потока заявок, и, таким образом, формируется их общая модель в виде ВМАР-потока [11]. ВМАР-поток отличается от простейшего потока с групповым поступлением заявок тем, что имеет следующие особенности: 1) интенсивность поступления групп заявок зависит от номера состояния управляющей цепи Маркова (ЦМ)  $v_t$  с непрерывным временем и конечным пространством состояний  $\{0, 1, \dots, W\}$ ; 2) время пребывания ЦМ  $v_t$  в состоянии  $v$  имеет показательное распределение; 3) после истечения времени пребывания цепи в состоянии  $v$  ЦМ с заданной вероятностью переходит в другое состояние  $v'$ , и при этом генерируется группа размера  $k \geq 0$ ; 4) вероятности переходов удовлетворяют условию нормировки

$$\sum_{k=0}^{\infty} \sum_{v'=0}^W p_k(v, v') = 1, \quad v = \overline{0, W}.$$

Обобщенная модель СС состоит из трех последовательно расположенных фаз (рис. 2): фаза 1 выполняет функцию по приему поездов, в фазе 2 составы расформируются, накапливаются и переставляются в парк отправления, в фазе 3 поезда обрабатываются и отправляются из системы. Каждая фаза имеет очередь размера  $m_k$ , а также  $n_k$  обслуживающих каналов;  $m_k < \infty$ ,  $k = 1, \dots, g$ , где  $g$  зависит от местных характеристик станций. Фаза 2 состоит из параллельно расположенных одноканальных СМО с отдельными очередями. Каналы первой и второй фазы прекращают обслуживать заявки (блокируются), если очередь на следующей фазе запол-

нена. На всех фазах время обслуживания имеет нормальное распределение, допускается групповое обслуживание заявок.

С использованием данного подхода получаем следующие типовые математические модели СС.

#### А — сортировочная станция с последовательным расположением парков

Каждая фаза состоит из СМО, в которую поступают группы из двух типов заявок  $A = \{1, 2\}$ : 1 — нечетный, 2 — четный поток. Обработка поступающих заявок производится последовательно (рис. 3): из фазы 1 в фазу 2 и далее в фазу 3. Математическая модель в терминах теории массового обслуживания [5] (классификация Кендалла) для данного типа СС будет иметь вид

$$BMAP / G^{X_1} / n_1 / m_1 \rightarrow * / G^{X_2} / n_2 / m_2 \rightarrow * / G^{X_3} / n_3 / m_3,$$

где  $G$  — произвольное распределение времени обслуживания;  $X_i (i = 1, 2, 3)$  — размер обслуживаемой группы на соответствующей фазе;  $n$  — количество поступающих групп;  $m$  — количество обслуживаемых заявок.

#### В — сортировочная станция с комбинированным расположением парков

Для этой СС поступающие заявки обрабатываются последовательно с учетом прибытия поездов в разные парки прибытия. Фаза 1 будет состоять из двух параллельно расположенных СМО (рис. 4а), которые обрабатывают группы заявок по направлениям  $A_1 = \{1, 1, 1\}$ ,  $A_2 = \{2, 2, 2\}$  согласно местной технологии, а на фазе 3 группы, состоящие из разных заявок, будут иметь вид  $A_1 = \{1, 2, 1\}$ ,  $A_2 = \{2, 1, 1\}$ .

При комбинировании парков отправления из двух параллельных СМО формируется фаза 3 (рис. 4б) с обработкой групп одинаковых заявок, состоящих из направлений  $A_1 = \{1, 1, 1\}$ ,  $A_2 = \{2, 2, 2\}$

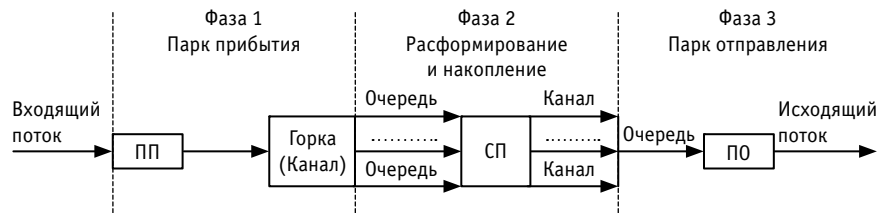


Рис. 2. Схема обобщенной математической модели

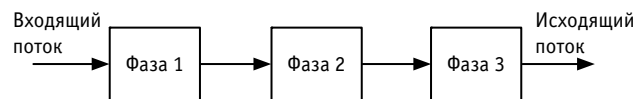


Рис. 3. Схема работы фаз при последовательном расположении парков

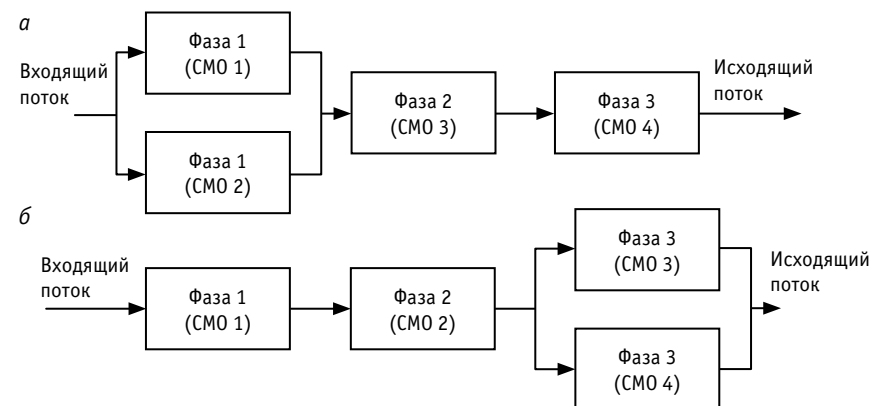


Рис. 4. Схема работы фаз при комбинированном расположении парков:

а — при параллельном парке прибытия; б — при параллельном парке отправления

согласно местной инструкции. Соответственно фаза 1 работает с заявками типа  $A_1 = \{1, 2, 1\}$ ,  $A_2 = \{1, 1, 2\}$ .

Математическая модель в терминах теории массового обслуживания имеет вид

$$BMAP / G^{X_1} / n_1 / m_1 \rightarrow * / G^{X_2} / n_2 / m_2 \rightarrow * / G^{X_3} / n_3 / m_3.$$

### С — сортировочная станция с параллельным расположением парков

Последовательность обработки заявок сохраняется при наличии параллельно расположенных парков. С учетом конфигурации схемы фаза 1 и фаза 3 состоят из параллельно расположенных СМО (рис. 5), обрабатывающих группы с одинаковыми заявками  $A_1 = \{1, 1, 1\}$  и  $A_2 = \{2, 2, 2\}$ . Особенность обработки заявок заключается в том, что фаза 2 принимает заявки из фазы 1 поочередно, поскольку не каждая местная технология позволяет одновременно обрабатывать заявки на фазе 2. Математическая модель в терминах теории массового обслуживания для СС такого типа имеет вид

$$BMAP / G^{X_1} / n_1 / m_1 \rightarrow * / G^{X_2} / n_2 / m_2 \rightarrow * / G^{X_3} / n_3 / m_3.$$

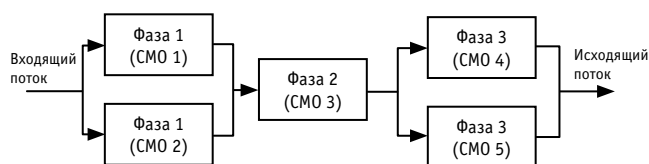


Рис. 5. Схема работы фаз при параллельном расположении парков

### МОДЕЛЬНЫЕ РАСЧЕТЫ

Рассмотрим задачу определения максимальной загрузки, при которой СС будет справляться с прибывающим транспортным потоком. Характеристики модельной станции И-С приведены в табл. 1.

Модель данной СС имеет вид системы с тремя фазами обслуживания. Фаза 1 — СМО с одним каналом и очередью на 700 мест. Фаза 2 — двухканальная СМО с очередью на 3500 мест. Фаза 3 — двухканальная СМО с очередью на 750 мест. Станция обрабатывает только грузовые поезда, пассажирские и пригородные не учитываются. Таким образом, модель относится к типу А.

В расчетах используем «Программный комплекс для моделирования и расчетов параметров СМО», который был модернизирован для проведения настоящего исследования. Так, плановое время работы станции теперь включает межоперационные простои и операции на каждой фазе (чего не было ранее [3]).

Результаты сценарного моделирования работы СС при различных параметрах входящего поездопотока приведены в табл. 2–4. Главным показателем того, что СС справляется с нагрузкой, является равенство нулю вероятности отказа, т.е. способность СМО обслужить все заявки.

Таблица 1

Характеристики модельной сортировочной станции И-С

Характеристика	Парк приема		Сортировочный парк		Парк отправления	
	План	Факт	План	Факт	План	Факт
Среднее время обслуживания, ч	1,95	2,04	5,90	5,86	2,79	2,83
Распределение времени обслуживания	$N(1,95, 0,50)$		$N(5,90, 0,50)$		$N(2,79, 0,50)$	
Распределение размера обслуживаемой группы	$B(75, 0,83)$		$B(75, 0,90)$		$B(75, 0,90)$	

Примечание.  $N(\mu, \sigma)$  — нормальное распределение, где  $\mu$  — математическое ожидание,  $\sigma$  — среднеквадратическое отклонение;  $B(n, p)$  — биномиальное распределение, где  $n$  — число «испытаний»,  $p$  — вероятность «успеха».

Таблица 2

Средние характеристики работы станции И-С за 1 неделю при  $\lambda = 1,90$

	Поступило	Принято	$T_{sist}$ мин	$P_{loss}$
Группы	315	315	618,6	0
Заявки	19640	19640		
	$\bar{k}$	$L$	$t_{ph}$ мин	$t_{lock}$ мин
Фаза 1	0,97	23,2	79	0
Фаза 2	1,97	258,02	493,34	0
Фаза 3	1,08	—	46,26	—

Примечание. В табл. 2–4 используются следующие обозначения:  $T_{sist}$  — среднее время в системе,  $P_{loss}$  — вероятность отказа,  $\bar{k}$  — среднее число занятых каналов,  $L$  — средняя длина очереди,  $t_{ph}$  — среднее время в фазе,  $t_{lock}$  — среднее время блокировки фазы.

Как видно из табл. 2, грузовые поезда прибывают с интенсивностью  $\lambda = 1,90$  поезда в час, что соответствует текущим показателям рассмотренной СС. Количество поступивших заявок равно количеству принятых, вероятность отказа равна нулю. По результатам моделирования можно сделать вывод, что СС эффективно справляется с текущей нагрузкой. Для одного поезда плановое время пребывания в системе составляет 10,64 ч. По результатам моделирования вагоны простаивают 10,31 ч. Поскольку плановое время — это норматив работы с вагонами в системе для станции И-С, то погрешность расчетов в данном случае составляет 3,1 %.

При повышении интенсивности потока заявок с 1,90 до 2,06 поезда в час (см. табл. 3) на фазах начинают увеличиваться очереди, причем на фазе 2 заявки обслуживаются длительное время, что обусловлено накоплением вагонов до полносоставного поезда.

Таблица 3

Средние характеристики работы И-С  
за 1 неделю при  $\lambda = 2,06$

	Поступило	Принято	$T_{sisp}$ мин	$P_{loss}$
Группы	331	331	672,69	0
Заявки	20599	20599		
	$\bar{k}$	$l$	$t_{phr}$ мин	$t_{lockr}$ мин
Фаза 1	0,95	39,62	78,70	0
Фаза 2	1,99	307,71	526,44	0
Фаза 3	1,95	–	70,55	–

Таблица 4

Средние характеристики работы СС  
за 1 неделю модельного времени при  $\lambda = 2,08$

	Поступило	Принято	$T_{sisp}$ мин	$P_{loss}$
Группы	351	344	684,74	0,02
Заявки	21843	21408		
	$\bar{k}$	$l$	$t_{phr}$ мин	$t_{lockr}$ мин
Фаза 1	0,98	407,16	79,95	0
Фаза 2	1,99	598,34	541,61	0
Фаза 3	1,97	176,88	63,18	–

При данной интенсивности поездопотока нагрузка на СС близка к критической, вследствие чего даже при незначительном увеличении входящего потока (до 2,08) система перестает справляться с работой, что приводит к появлению отказов ( $P_{loss} = 0,02$ , см. табл. 4).

## Литература

1. Кельтон В. Д., Лоу А. М. Имитационное моделирование / Пер. с англ. СПб. : Питер, 2004. 846 с.
2. Обухов А. Д. Инновационные подходы к автоматизации управления сортировочной станцией // Мир транспорта. 2016. Т. 14. № 4 (65). С. 176–187. ISSN 1992–3252.
3. Казаков А. Л., Павидис М. М., Жарков М. Л. Применение многофазных систем массового обслуживания для моделирования сортировочной станции // Вестник УрГУПС. 2018. № 2 (38). С. 4–14. DOI: 10.20291/2079-0392-2018-2-4-14. ISSN 2079–0392.
4. Казаков А. Л., Лемперт А. А., Жарков М. Л. Моделирование транспортно-пересадочных узлов на основе систем массового обслуживания — многофазных и с ВМАР-потоком // Вестник УрГУПС. 2016. № 4 (32). С. 4–14. DOI: 10.20291/2079-0392-2016-4-4-14. ISSN 2079–0392.

Данное обстоятельство весьма негативно скажется на работе транспортной системы, поскольку станция И-С должна будет остановиться по неприему, что, в свою очередь, вызовет остановку всех попутных поездов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итак, подводя итог, отметим следующее.

1. Построен комплекс математических моделей сортировочных станций, основанный на применении многофазных систем массового обслуживания с ВМАР-потоком. С использованием разработанного ранее при участии авторов программного продукта проведен вычислительный эксперимент по имитации работы модельной сортировочной станции, для которой определен максимальный допустимый уровень нагрузки.

2. Полученные результаты позволяют в приемлемом для практического применения виде выполнить анализ эффективности работы действующих и проектируемых сортировочных станций. На данном этапе результаты моделирования являются достаточно грубыми, однако модели обладают значительными адаптивными возможностями и могут быть модернизированы.

3. В соответствии со сказанным главным направлением дальнейших исследований должно стать совершенствование математических моделей и разработка эффективной методики их верификации. Кроме того, перспективной идеей выглядит распространение предложенного подхода на междугородные и пригородные пассажирские перевозки [22]. Существующая имитационная модель обладает ограниченными возможностями, поскольку создавалась для исследования объектов городского транспорта [4]. В связи с этим актуальной задачей является ее развитие в соответствии с потребностями железнодорожной отрасли как с точки зрения детализации, так и с точки зрения интеллектуализации, т.е. создания на ее основе информационной системы [20].

Авторы признательны М. Л. Жаркову за помощь в работе и участие в проведении вычислительного эксперимента.

Исследование частично поддержано РФФИ,  
проект № 18–07–00604.

## References

1. Kelton W. D., Law A. M. Simulation modelling and analysis [Imitatsionnoe modelirovanie] / Translated from English. St. Petersburg : Piter, 2004. 846 p.
2. Obukhov A. D. Innovative approach to marshalling yard control automation [Innovatsionnye podkhody k avtomatizatsii upravleniya sortirovochnoy stantsiei] // World of Transport and Transportation. 2016. Vol. 14. No. 4 (65). Pp. 176–187. ISSN 1992–3252.
3. Kazakov A. L., Pavidis M. M., Zharkov M. L. Multiphase systems of mass service in switchyard modelling [Primenenie mnogofaznykh sistem massovogo obsluzhivaniya dlya modelirovaniya sortirovochnoi stantsii] // Herald of USURT. 2018. No. 2 (38). Pp. 4–14. DOI: 10.20291/2079-0392-2018-2-4-14. ISSN 2079–0392.
4. Kazakov A. L., Lempert A. A., Zharkov M. L. Modeling transport transfer hubs on the basis of multiphase and BMAP-flow mass transit systems [Modelirovanie transportno-peresadochnykh uzlov na osnove sistem massovogo obsluzhivaniya — mnogofaznykh i s ВМАР-potokom] // Herald of USURT. 2016. No. 4 (32). Pp. 4–14. DOI: 10.20291/2079-0392-2016-4-4-14. ISSN 2079–0392.

5. Дудин А. Н., Клименок В. И. Системы массового обслуживания с коррелированными потоками. Минск : Изд-во БГУ, 2000. 176 с.
6. Lucantoni D. M. New results on single server queue with a batch Markovian arrival process // Commun. Statist. Stochastic Models. 1991. Vol. 7. Pp. 1–46.
7. Поттгофф Г. Учение о транспортных потоках / Пер. с нем. М. : Транспорт, 1975. 344 с.
8. Акулиничев В. М., Кудрявцев В. А., Корешков А. Н. Математические методы в эксплуатации железных дорог. М. : Транспорт, 1981. 223 с.
9. Смахов А. А. Математические модели процессов грузовой работы. М. : Транспорт, 1982. 256 с.
10. Казаков А. Л., Маслов А. М. Имитационное моделирование при проектировании грузовых терминалов железнодорожного транспорта // Вестник УрГУПС. 2010. № 1 (5). С. 33–39. ISSN 2079–0392.
11. Казаков А. Л., Маслов А. М. Построение модели неравномерного транспортного потока на примере железнодорожной грузовой станции // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2009. № 3. С. 27–32. ISSN 1813–9108.
12. Румянцев С. А. Основы математического моделирования и вычислительной математики. Екатеринбург : Изд-во УрГУПС, 2007. 116 с.
13. 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.
14. Александров А. Э., Сурин А. В. Методика использования имитационных моделей поездообразования и продвижения поездов в оперативном планировании // Транспорт Урала. 2016. № 4 (51). С. 66–70. DOI: 10.20291/1815-9400-2016-4-66-70. ISSN 1815–9400.
15. Козлов П. А., Колокольников В. С., Сорокин В. И. Совместное использование аналитических методов и имитационных моделей // Транспорт Урала. 2016. № 3 (50). С. 3–8. DOI: 10.20291/1815-9400-2016-3-3-8. ISSN 1815–9400.
16. Козлов П. А., Колокольников В. С. Макроструктурный подход в исследовании железнодорожных станций // Транспорт Урала. 2017. № 2 (53). С. 3–7. DOI: 10.20291/1815-9400-2017-2-3-7. ISSN 1815–9400.
17. Шубко В. Г. Железнодорожные станции и узлы. М., 2002. 368 с.
18. Правдин Н. В., Банек Т. С., Негрей В. Я. Железнодорожные станции и узлы (задачи, примеры, расчеты) / Под ред. Н. В. Правдина. М. : Транспорт, 1984. 296 с.
19. Model-driven engineering of Manufacturing Automation Software Projects — A SysML-based approach / B. Vogel-Heuser, D. Schitz, T. Frank, C. Legat // Mechatronics. 2014. Vol. 24. Issue 7. Pp. 883–897.
20. Интеллектуальная система управления развитием транспортно-логистической инфраструктурой региона / И. В. Бычков, А. Л. Казаков, А. А. Лемперт и др. // Проблемы управления. 2014. № 1. С. 27–35. ISSN 1819–3161.
21. Левин Д. Ю. Диспетчерские центры и технология управления перевозочным процессом : учеб. пособие. М. : Маршрут, 2005. 760 с.
22. Брусянин Д. А., Казаков А. Л., Маслов А. М. Оптимизация региональной маршрутной сети междугородных и пригородных пассажирских перевозок с использованием логистических принципов // Транспорт Урала. 2012. № 1 (32). С. 106–109. ISSN 1815–9400.
5. Dudin A. N., Klymenok V. I. Queuing systems with correlated flows [Sistemy massovogo obsluzhivaniya s korrelirovannymi potokami]. Minsk : Publishing House of BSU, 2000. 176 p.
6. Lucantoni D. M. New results on single server queue with a batch Markovian arrival process // Commun. Statist. Stochastic Models. 1991. Vol. 7. Pp. 1–46.
7. Potthoff G. Verkehrsstromungslehre [Uchenie o transportnykh potokakh] / Translated from German. Moscow : Transport, 1975. 344 p.
8. Akulinichev V. M., Kudryavtsev V. A., Koreschkov A. N. Mathematical methods in the operation of railways [Matematicheskie metody v ekspluatatsii zheleznykh dorog]. Moscow : Transport, 1981. 223 p.
9. Smekhov A. A. Mathematical models of cargo handling processes [Matematicheskie modeli protsessov gruzovoy raboty]. Moscow : Transport, 1982. 256 p.
10. Kazakov A. L., Maslov A. M. Simulation when designing railway transport freight terminals [Imitatsionnoe modelirovanie pri proektirovanii gruzovykh terminalov zheleznodorozhnogo transporta] // Herald of USURT. 2010. No. 1 (5). Pp. 33–39. ISSN 2079–0392.
11. Kazakov A. L., Maslov A. M. Building a model of uneven traffic flow on the example of a railway freight station [Postroenie modeli neravnomernogo transportnogo potoka na primere zheleznodorozhnoy gruzovoy stantsii] // Modern technologies. System analysis. Modeling. 2009. No. 3. Pp. 27–32. ISSN 1813–9108.
12. Rumyantsev S. A. Fundamentals of mathematical modeling and computational mathematics [Osnovy matematicheskogo modelirovaniya i vychislitel'noy matematiki]. Ekaterinburg : Publishing House of USURT, 2007. 116 p.
13. 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.
14. Alexandrov A. E., Surin A. V. Methods of using simulation models of train formation and train promotion in operational planning [Metodika ispol'zovaniya imitatsionnykh modeley poezdoobrazovaniya i prodvizheniya poezdov v operativnom planirovanii] // Transport of the Urals. 2016. No. 4 (51). Pp. 66–70. DOI: 10.20291/1815-9400-2016-4-66-70. ISSN 1815–9400.
15. Kozlov P. A., Kolokolnikov V. S., Sorokin V. I. Shared use of analytical methods and simulation models [Sovmestnoe ispol'zovanie analiticheskikh metodov i imitatsionnykh modeley] // Transport of the Urals. 2016. No. 3 (50). Pp. 3–8. DOI: 10.20291/1815-9400-2016-3-3-8. ISSN 1815–9400.
16. Kozlov P. A., Kolokolnikov V. S. Macrostructural approach in research of railway stations [Makrostrukturnyy podkhod v issledovanii zheleznodorozhnykh stantsiy] // Transport of the Urals. 2017. No. 2 (53). Pp. 3–7. DOI: 10.20291/1815-9400-2017-2-3-7. ISSN 1815–9400.
17. Shubko V. G. Railway stations and junctions [Zheleznodorozhnye stantsii i uzly]. Moscow, 2002. 368 p.
18. Pravdin N. V., Banek T. S., Negrey V. Ya. Railway stations and junctions (tasks, examples, calculations) [Zheleznodorozhnye stantsii i uzly (zadachi, primery, raschety)] / Ed. by N. V. Pravdin. Moscow : Transport, 1984. 296 p.
19. Model-driven engineering of Manufacturing Automation Software Projects — A SysML-based approach / B. Vogel-Heuser, D. Schitz, T. Frank, C. Legat // Mechatronics. 2014. Vol. 24. Issue 7. Pp. 883–897.
20. An intelligent management system for the development of a regional transport logistics infrastructure [Intellektnaya sistema upravleniya razvitiem transportno-logisticheskoy infrastruktury regiona] / I. V. Bychkov, A. L. Kazakov, A. A. Lempert, et al. // Control Sciences. 2014. No. 1. Pp. 27–35. ISSN 1819–3161.
21. Levin D. Yu. Dispatch centers and technology of traffic management [Dispetcherskie tsentri i tekhnologiya upravleniya perevozhnym protsessom] : textbook. Moscow : Route, 2005. 760 p.
22. Brusyanin D. A., Kazakov A. L., Maslov A. M. Optimization of regional route network of intercity and commuter traffic with the use of logistic principles [Optimizatsiya regional'noy marshrutnoy seti mezh-dugorodnykh i prigorodnykh passazhirskikh perevozok s ispol'zovaniem logisticheskikh printsiptov] // Transport of the Urals. 2012. No. 1 (32). Pp. 106–109. ISSN 1815–9400.

УДК 656.2

**Александр Владимирович Горелик**, доктор технических наук, заведующий кафедрой «Железнодорожная автоматика, телемеханика и связь» Российского университета транспорта (МИИТ), Москва, Россия,

**Владимир Иванович Линьков**, доктор технических наук, профессор кафедры «Железнодорожная автоматика, телемеханика и связь» Российского университета транспорта (МИИТ), Москва, Россия,

**Виталий Сергеевич Дорохов**, ассистент кафедры «Железнодорожная автоматика, телемеханика и связь» Российского университета транспорта (МИИТ), Москва, Россия,

**Павел Анатольевич Неваров**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Железнодорожная автоматика, телемеханика и связь» Российского университета транспорта (МИИТ), Москва, Россия

## ПРОБЛЕМЫ ЭФФЕКТИВНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ КАПИТАЛЬНОГО РЕМОНТА И МОДЕРНИЗАЦИИ ОБЪЕКТОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ АВТОМАТИКИ И ТЕЛЕМЕХАНИКИ

**Alexander Vladimirovich Gorelik**, DSc in Engineering, Head of Railway Automatics, Telemechanics and Telecommunications Department, Russian University of Transport (RUT-MIIT), Moscow, Russia,

**Vladimir Ivanovich Linkov**, DSc in Engineering, Professor, Railway Automatics, Telemechanics and Telecommunications Department, Russian University of Transport (RUT-MIIT), Moscow, Russia,

**Vitaliy Sergeyevich Dorokhov**, Assistant Lecturer, Railway Automatics, Telemechanics and Telecommunications Department, Russian University of Transport (RUT-MIIT), Moscow, Russia,

**Pavel Anatolyevich Nevarov**, PhD in Engineering, Associate Professor, Railway Automatics, Telemechanics and Telecommunications Department, Russian University of Transport (RUT-MIIT), Moscow, Russia

## Problems of efficient planning of railway automatics and telemechanics objects major overhaul and modernization

### Аннотация

Выполнен анализ нормативных документов, которые регламентируют планирование капитального ремонта и модернизацию объектов железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ). Отмечены недостатки в определении термина «капитальный ремонт объекта ЖАТ» и отсутствие определения у термина «модернизация объекта ЖАТ».

Установлено, что при разработке рассмотренных нормативных документов отсутствовал единый подход. В частности, необходимость проведения капитального ремонта определялась на основании межремонтных сроков, которые часто не выполнялись, в том числе из-за недостаточного финансирования. Сделан вывод, что эффективно применять проанализированные нормативные документы невозможно, поэтому требуется их переработка — планирование капитального ремонта и модернизация должны выполняться с учетом фактического состояния объектов ЖАТ, имеющегося объема финансирования, прогнозных рисков, связанных с отказами объектов ЖАТ, и других факторов.

**Ключевые слова:** капитальный ремонт, модернизация, объекты ЖАТ, риск, межремонтные сроки, планирование капитального ремонта объектов ЖАТ, планирование модернизации объектов ЖАТ.

### Summary

The paper describes the analysis of normative documents that regulate the railway automatics and telemechanics (RAT) objects major overhaul and modernization. On the basis of the analysis the authors pointed out the shortcomings of term «RAT objects major overhaul» definition and the absence of the term «RAT object modernization» definition.

The authors also established that there was no unified approach to create normative documents. In particular, the need for major overhaul was determined on the basis of inter-repair times that were often not implemented due to the lack of funding. As a conclusion, it is impossible to implement these normative documents effectively. That is why it is necessary to rewrite them — planning of major overhauls and modernization should be carried out in consideration for actual condition of RAT objects, available volume of funding and predicted risks connected with RAT objects failures and other factors.

**Keywords:** major overhaul, modernization, RAT objects, risk, inter-repair times, planning of RAT objects major overhaul, planning of RAT objects modernization.

DOI: 10.20291/1815-9400-2019-1-36-40



**В** Стратегии развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года [1, с. 4–5] указывается на необходимость:

формирования доступной и устойчивой транспортной системы;

снижения совокупных транспортных издержек;

приведения уровня качества и безопасности перевозок в соответствие с требованиями населения, экономики и лучших мировых стандартов.

Результат решения этих задач зависит от выполнения устройствами железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ) своих функций с требуемой эффективностью [2–6], что по разным причинам может стать неосуществимым без своевременного капитального ремонта или модернизации объектов ЖАТ, а эту работу нужно планировать с учетом всех факторов, влияющих на процесс движения поездов.

В инструкции [7], регламентирующей порядок планирования и проведения капитального ремонта, дается следующее определение: «капитальный ремонт линейных объектов — изменение параметров линейных объектов или их участков (частей), которое не влечет за собой изменение класса, категории и (или) первоначально установленных показателей функционирования таких объектов и при котором не требуется изменение границ полос отвода и (или) охранных зон таких объектов». Неудачность этого определения связана с тем, что оно взято из Градостроительного кодекса Российской Федерации (ст. 1, п. 14.3) и относится в первую очередь к зданиям и сооружениям, следовательно, лишь частично подходит для объектов ЖАТ. Даже в тексте самой инструкции [7, с. 4] дается более подходящее с точки зрения возможности его применения к объектам ЖАТ описание: «Капитальный ремонт объектов основных средств ЖАТ включает в себя комплекс работ, выполняемый с целью восстановления технических характеристик объекта, их эксплуатационных показателей и утраченного за период эксплуатации ресурса до значений, близких к проектным, с заменой или восстановлением изношенных деталей и узлов, в т.ч. устаревших и снятых с производства». Таким образом, очевидна необходимость корректировки определения, приведенного в [7], применительно к объектам ЖАТ.

Далее, нормативная инструкция [7] не учитывает, что, согласно Концепции комплексного управления надежностью, рисками, стоимостью жизненного цикла на железнодорожном транспорте, «...в результате многолетнего недофинансирования износ основных фондов постоянно увеличивался, что привело к тому, что в настоящее время износ некоторых элементов инфраструктуры... наиболее критичных по последствиям выхода из строя, достиг 70 %» [8, с. 5].

Итак, анализ инструкции [7] показывает, что она имеет ряд существенных недостатков: в ней не учитываются фактическое состояние объектов ЖАТ, имеющийся объем финансирования и прогнозные риски, связанные с отказами объектов ЖАТ, а необходимость проведения капитального ремонта определяется только на основании межремонтных сроков. Также в ней не отражено, что иногда вместо капитального ремонта технические и экономически целесообразно проводить модернизацию объектов ЖАТ с учетом их функционального ресурса [9].

Все эти недостатки, связанные с планированием капитального ремонта, устранены в работе [10] и легли в основу нормативного документа [11].

Согласно [10], в качестве критериев ранжирования при определении очередности проведения капитального ремонта объектов ЖАТ рассматриваются:

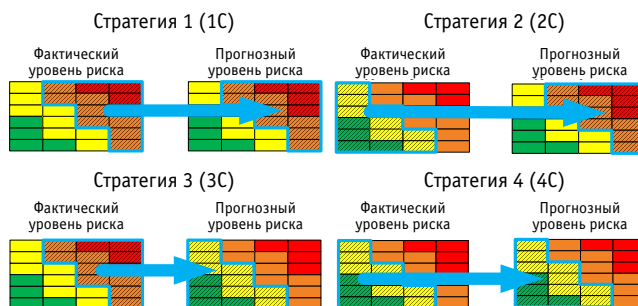
стратегия эффективности функционирования объекта ЖАТ; принадлежность объектов ЖАТ к группам в соответствии с превышением нормативного межремонтного срока; класс железнодорожной линии.

Стратегии эффективности функционирования объектов ЖАТ в зависимости от соотношения фактического и прогнозного риска характеризуются следующим образом (рис. 1, табл. 1): стратегия 1 (1С) — функционирование объекта ЖАТ признается неэффективным. Требуется проведение капитального ремонта (первая очередь);

стратегия 2 (2С) — функционирование объекта ЖАТ можно признать неэффективным. При наличии средств требуется проведение капитального ремонта (вторая очередь);

стратегия 3 (3С) — функционирование объекта ЖАТ можно признать эффективным. Проведение капитального ремонта необязательно, существует возможность перенести сроки проведения капитального ремонта на один год (третья очередь);

стратегия 4 (4С) — функционирование объекта ЖАТ признается эффективным. Проведение капитального ремонта не требуется. Рекомендуется принять решение о переносе сроков проведения капитального ремонта на один год.



**Рис. 1. Стратегии прогнозирования эффективности функционирования объектов ЖАТ при назначении капитального ремонта**

*Таблица 1*

Определение стратегий эффективности функционирования объектов ЖАТ при назначении капитального ремонта

Фактический уровень риска	Прогнозный уровень риска			
	Недопустимый	Нежелательный	Допустимый	Не принимаемый в расчет
Недопустимый	1С	1С	3С	3С
Нежелательный	1С	1С	3С	3С
Допустимый	2С	2С	4С	4С
Не принимаемый в расчет	2С	2С	4С	4С

Эти стратегии совместно с классом железнодорожной линии определяют ранг объекта ЖАТ в порядке приоритетности проведения капитального ремонта.

В соответствии с превышением нормативного межремонтного срока объекты ЖАТ делятся на следующие группы:

группа 1 (1Г) — объекты, которые нуждаются в капитальном ремонте и у которых фактический срок эксплуатации превысил нормативный межремонтный срок более чем в 2 раза ( $T_{\Phi} > 2 \cdot T_M$ );

группа 2 (2Г) — объекты, которые нуждаются в капитальном ремонте и у которых фактический срок эксплуатации превысил нормативный межремонтный срок более чем в 1,5 раза, но не более чем в 2 раза ( $1,5 \cdot T_M < T_{\Phi} \leq 2 \cdot T_M$ );

группа 3 (3Г) — объекты, которые нуждаются в капитальном ремонте и у которых фактический срок эксплуатации превысил нормативный межремонтный срок не более чем в 1,5 раза ( $T_M < T_{\Phi} \leq 1,5 \cdot T_M$ );

группа 4 (4Г) — объекты, которые нуждаются в выполнении капитального ремонта в соответствии с нормативами ( $T_{\Phi} = T_M$ ).

Наивысшим приоритетом на проведение капитального ремонта обладают объекты ЖАТ, относящиеся к первому классу железнодорожной линии, у которых превышение нормативного межремонтного срока 2 или более раз, а стратегия эффективности функционирования — 1С. Соответственно наименьший приоритет имеют объекты ЖАТ, относящиеся к пятому классу железнодорожной линии, у которых нормативный межремонтный срок не превышен, а стратегия эффективности функционирования — 4С. Для определения промежуточных позиций в титульных списках на проведение капитального ремонта в первую очередь требуется оценить степень влияния каждого критерия на эффективность планирования капитального ремонта объектов ЖАТ (достижение минимальных суммарных затрат).

В документах, регламентирующих модернизацию объектов ЖАТ, определение модернизации отсутствует вообще. Например, в ГОСТ Р 15.000–2016 [12, с. 2] приведена такая формулировка: «Модернизация продукции: создание продукции с улучшенными потребительскими свойствами путем ограниченного изменения исходной продукции и взамен ее». Понятно, что к объектам ЖАТ ее можно применить лишь частично. Следовательно, в нормативной документации должно быть определение понятия «модернизация объектов ЖАТ».

Планирование модернизации объектов ЖАТ осуществляется в соответствии с документами [13–15]. Однако в основу разработки этих документов не был положен единый подход, и они не лишены недостатков, присущих нормативной документации, по которой выполняется планирование капитального ремонта объектов ЖАТ.

Недостатки, характерные для планирования модернизации, устранены в работе [16] и легли в основу нормативного документа [17].

Согласно [16], выбор варианта модернизации объектов ЖАТ включает решение ряда задач, среди которых выделяют определение функциональной и сравнительной экономической эффективности объектов ЖАТ для каждого варианта модернизации без и с учетом их надежности (в последнем случае испол-

зуется термин «эксплуатационная эффективность»). Также при наличии железнодорожных линий разного класса они ранжируются по степени их важности. Кроме того, проводится учет функционального ресурса этих объектов и оценивается прогнозный уровень риска их функционирования.

Определение функциональной эффективности эксплуатации объектов ЖАТ производится на основе оценки функционального ресурса (ресурс железнодорожной техники в части количества и качества реализуемых функций, определяющих потенциальную возможность ее применения в различных условиях эксплуатации) находящихся в эксплуатации объектов ЖАТ [9].

Предварительно для каждого объекта ЖАТ, находящегося в эксплуатации, производится проверка соответствия матрице технических и эксплуатационных требований к железнодорожным линиям в зависимости от классов и специализаций (далее — матрица технических требований). Если объект ЖАТ не удовлетворяет матрице технических требований, то необходима его модернизация. В противном случае следует выполнить расчет функционального ресурса этого объекта согласно методике [18].

Для объектов ЖАТ, у которых функциональный ресурс отсутствует или характеризуется как незначительный, требуется модернизация, в противном случае (функциональный ресурс высокий или средний) необходимо определить эксплуатационную эффективность этих объектов.

Оценка эксплуатационной эффективности производится на основе значений фактического и прогнозного уровней рисков, связанных с уровнем надежности функционирования объектов ЖАТ. Фактический уровень риска определяется на основе статистической информации, прогнозный уровень риска рекомендуется определять для момента времени, отстоящего от текущего момента времени на один год.

В зависимости от соотношения фактического и прогнозного уровней риска возможны четыре основные стратегии эффективности эксплуатации объектов ЖАТ (см. табл. 1), которые характеризуются следующим образом:

стратегия 1 (1С) — эксплуатация объекта ЖАТ признается неэффективной. Требуется модернизация с учетом оценки эффективности ее проведения (первая очередь модернизации);

стратегия 2 (2С) — эксплуатация признается неэффективной. Требуется модернизация (при наличии средств) с учетом оценки эффективности ее проведения (вторая очередь модернизации);

стратегия 3 (3С) — эксплуатация признается эффективной. Модернизация объекта ЖАТ рассматривается в случае переизбытка ресурсов;

стратегия 4 (4С) — эксплуатация признается эффективной. Модернизации объекта ЖАТ не требуется. Ресурсы, предназначенные для модернизации, перераспределяются между областями, в которых наблюдается дефицит данных ресурсов.

Если дополнительные эксплуатационные расходы для объекта ЖАТ превышают допустимое значение, значит, требуется проведение модернизации этого объекта, даже несмотря на то, что при определении функциональной и эксплуатационной эффективности необходимость модернизации не была выявлена.

При оценке затрат, связанных с обеспечением заданных норм показателей надежности объекта ЖАТ, необходимо учитывать требуемый уровень готовности объекта и соответствующие эксплуатационные расходы. При снижении величины интенсивности отказов объектов ЖАТ и времени их восстановления после отказа, как правило, затраты на техническое обслуживание и ремонт снижаются. Минимальные эксплуатационные расходы достигаются в том случае, когда происходит постепенное снижение затрат на техническое обслуживание и ремонт, а также снижение дополнительных затрат.

В результате формируется таблица, включающая объекты ЖАТ, требующие модернизации, с указанием наименования станции (перегона), объекта ЖАТ, класса железнодорожной линии со специализацией, функционального ресурса и номера стратегии. В данном случае рассматриваются варианты модернизации объектов ЖАТ, удовлетворяющие матрице технических требований, имеющие высокий или средний функци-

ональный ресурс, допустимый или не принимаемый в расчет прогнозный уровень риска.

При наличии двух и более вариантов модернизации объектов ЖАТ следует проводить оценку сравнительной экономической эффективности способов модернизации. Оценка подобного рода заключается в расчете стоимости жизненного цикла (СЖЦ).

Предложенный метод основан на комплексной оценке эффективности модернизации объектов ЖАТ, определяемой функциональным ресурсом этих объектов, прогнозируемым уровнем риска их функционирования, а также сравнительной экономической эффективностью вариантов модернизации объектов ЖАТ, что позволяет принимать обоснованные управленческие решения по использованию материально-технических ресурсов при модернизации объектов ЖАТ (с достижением минимального уровня задержек поездо-часов при ограниченном уровне финансирования).

## Литература

1. Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года : утв. распоряжением Правительства Рос. Федерации от 17.06.2008 г. № 877-р // Собрание законодательства Российской Федерации. 21.07.2008. № 29. Ч. II. Ст. 3537.
2. Линьков В. И. Оценка эффективности интервального регулирования движения поездов // Безопасность движения поездов : матер. 8-й науч.-практ. конф. М. : МИИТ, 2007. С. XII-55.
3. Показатели эффективности интервального регулирования движения поездов / В. И. Линьков, В. И. Солдатов, Л. С. Семин, П. А. Дегтярев // Современные проблемы совершенствования работы железнодорожного транспорта : межвуз. сб. науч. тр. ; под ред. В. А. Бугреева. М. : МИИТ, 2009. С. 84–89.
4. Оценка эффективности интервального регулирования движения поездов для участка железной дороги / В. И. Линьков, В. И. Солдатов, Л. С. Семин, П. А. Дегтярев // Современные проблемы совершенствования работы железнодорожного транспорта : межвуз. сб. науч. тр. ; под ред. В. А. Бугреева. М. : МИИТ, 2009. С. 90–94.
5. Линьков В. И. Повышение эффективности интервального регулирования движения поездов // Безопасность движения поездов : матер. 11-й науч.-практ. конф. М. : МИИТ, 2010. С. VIII-20.
6. Линьков В. И., Семочкин Е. В., Бояринцев Д. С. Оценка и повышение эффективности интервального регулирования движения поездов // Безопасность движения поездов : матер. 14-й науч.-практ. конф. М. : МИИТ, 2013. С. VII-34–VII-35.
7. Виды и характеристики ремонтов, межремонтные сроки объектов основных средств железнодорожной автоматики и телемеханики : инструкция ; утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 27.10.2016 г. № 2157р.
8. Концепция комплексного управления надежностью, рисками, стоимостью жизненного цикла на железнодорожном транспорте : утв. ОАО «РЖД» 31.07.2010 г.
9. Оценка функционального ресурса систем железнодорожной автоматики и телемеханики / А. С. Веселова, А. В. Горелик, И. А. Журавлев и др. ; МИИТ. М., 2015. Деп. в ВИНТИ, № 188–В2015.

## References

1. Strategy for the development of railway transport in the Russian Federation until 2030 [Strategiya razvitiya zheleznodorozhnogo transporta v Rossiyskoy Federatsii do 2030 goda] : approved by the Order of the Government of the Russian Federation dated 17.06.2008 No. 877-r // Collection of Legislative Acts of the Russian Federation. 21.07.2008. No. 29. Part II. Paper 3537.
2. Linkov V. I. Assessment of train separation [Otsenka effektivnosti interval'nogo regulirovaniya dvizheniya poezdov] // Safety of train operation : proceedings of 8<sup>th</sup> scientific and practical conference. Moscow : MIIT, 2007. P. XII-55.
3. Indicators of train separation efficiency [Pokazатели effektivnosti interval'nogo regulirovaniya dvizheniya poezdov] / V. I. Linkov, V. I. Soldatov, L. S. Semin, P. A. Degtyarev // Modern problems of railway transport work improvement : interuniversity collection of scientific papers ; ed. by V. A. Bugreev. Moscow : MIIT, 2009. Pp. 84–89.
4. Assessment of train separation efficiency for a railway section [Otsenka effektivnosti interval'nogo regulirovaniya dvizheniya poezdov dlya uchastka zheleznoy dorogi] / V. I. Linkov, V. I. Soldatov, L. S. Semin, P. A. Degtyarev // Modern problems of railway transport work improvement : interuniversity collection of scientific papers ; ed. by V. A. Bugreev. Moscow : MIIT, 2009. Pp. 90–94.
5. Linkov V. I. Increase of train separation efficiency [Povyshenie effektivnosti interval'nogo regulirovaniya dvizheniya poezdov] // Safety of train operation : proceedings of 11<sup>th</sup> scientific and practical conference. Moscow : MIIT, 2010. P. VIII-20.
6. Linkov V. I., Semochkin E. V., Boyarintsev D. S. Assessment and increase of train separation efficiency [Otsenka i povyshenie effektivnosti interval'nogo regulirovaniya dvizheniya poezdov] // Safety of train operation : proceedings of 14<sup>th</sup> scientific and practical conference. Moscow : MIIT, 2013. Pp. VII-34–VII-35.
7. Types and characteristics of repairs, inter-repair times of RAT items of fixed assets [Vidy i kharakteristiki remontov, mezhermontnye sroki ob'ektov osnovnykh sredstv zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki] : instruction ; approved by order of JSC Russian Railways dated 27.10.2016 No. 2157r.
8. Concept of dependability, risk and life cycle cost complex management on railway transport [Kontseptsiya kompleksnogo upravleniya nadezhnost'yu, riskami, stoimost'yu zhiznennogo tsikla na zheleznodorozhnom transporte] : approved by JSC Russian Railways 31.07.2010.
9. Functional resources assessment of RAT systems [Otsenka funktsional'nogo resursa sistem zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki] / A. S. Veselova, A. V. Gorelik, I. A. Zhuravlev, et al. ; MIIT. Moscow, 2015. Deposited in VINITI, No. 188–V2015.

10. Управление ресурсами и рисками при назначении капитального ремонта систем железнодорожной автоматики / А. С. Веселова, А. В. Горелик, В. С. Дорохов и др. ; МИИТ. М., 2017. Деп. в ВИНТИ, № 138–В2017.
11. Методика управления ресурсами и рисками при назначении капитального ремонта систем ЖАТ на основе методологии УРРАН : утв. ОАО «РЖД» 30.11.2017 г.
12. ГОСТ Р 15.000–2016. Система разработки и постановки продукции на производство. Основные положения. М. : Стандартинформ, 2016. 16 с.
13. Порядок формирования нормативно-целевых бюджетов во взаимоувязке с требованиями показателей УРРАН по хозяйству автоматики и телемеханики : утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 10.12.2014 г. № 2945р.
14. Методика формирования планов работ по реконструкции основных средств для реализации в инвестиционной программе хозяйства автоматики и телемеханики ОАО «РЖД» с использованием показателей УРРАН : утв. ОАО «РЖД» 26.11.2012 г.
15. Порядок планирования, учета и контроля выполнения в хозяйстве автоматики и телемеханики : утв. распоряжением ЦДИ — филиала ОАО «РЖД» от 28.06.2016 г. № ЦДИ-302/р.
16. Определение эффективности эксплуатации и модернизации систем железнодорожной автоматики и телемеханики в зависимости от классификации железнодорожных линий / А. С. Веселова, А. В. Горелик, В. С. Дорохов и др. ; МИИТ. М., 2016. Деп. в ВИНТИ, № 166–В2016.
17. Методика определения эффективности эксплуатации и модернизации систем ЖАТ в зависимости от классификации железнодорожных линий : утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 23.12.2016 г. № 2651/р.
18. Методика оценки функционального ресурса технических средств железнодорожной автоматики и телемеханики : утв. ОАО «РЖД» 21.11.2015 г.
10. Resource and risk management at appointment of railway automatics systems major overhaul [Upravlenie resursami i riskami pri naznachenii kapital'nogo remonta sistem zheleznodorozhnoy avtomatiki] / A. S. Veselova, A. V. Gorelik, V. S. Dorokhov, et al. ; MIIT. Moscow, 2017. Deposited in VINITI, No. 138–V2017.
11. Technique of resource and risk management at appointment of major overhaul for RAT systems based on URRAN (Management of resources, risks and dependability at life cycle phases) [Metodika upravleniya resursami i riskami pri naznachenii kapital'nogo remonta sistem ZhAT na osnove metodologii URRAN] : approved by JSC Russian Railways 30.11.2017.
12. GOST R 15.000–2016. System of product development and launching into manufacture. Basic provisions [Sistema razrabotki i postavki produktii na proizvodstvo. Osnovnye polozheniya]. Moscow : Standardinform, 2016. 16 p.
13. Order of forming regulatory budgets in accordance with requirements of URRAN indicators for RAT economy [Poryadok formirovaniya normativno-tselevykh byudzhetrov vo vzaimouvyazke s trebovaniyami pokazateley URRAN po khozyaystvu avtomatiki i telemekhaniki] : approved by order of JSC Russian Railways dated 10.12.2014 No. 2945r.
14. Technique of forming operation plans of main assets reconstruction for realization in investment program of JSC Russian Railways RAT economy using URRAN indicators [Metodika formirovaniya planov rabot po rekonstruktsii osnovnykh sredstv dlya realizatsii v investitsionnoy programme khozyaystva avtomatiki i telemekhaniki ОАО «RZhD» s ispol'zovaniem pokazateley URRAN] : approved by JSC Russian Railways 26.11.2012.
15. Order of planning, accounting and performance control in RAT economy [Poryadok planirovaniya, ucheta i kontrolya vypolneniya v khozyaystve avtomatiki i telemekhaniki] : approved by order of Central Directorate Infrastructure — the branch of JSC Russian Railways dated 28.06.2016 No. TsDI-302/r.
16. Determination of exploitation and modernization efficiency of RAT systems depending on railway lines classification [Opredelenie effektivnosti ekspluatatsii i modernizatsii sistem zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki v zavisimosti ot klassifikatsii zheleznodorozhnykh liniy] / A. S. Veselova, A. V. Gorelik, V. S. Dorokhov, et al. ; MIIT. Moscow, 2016. Deposited in VINITI, No. 166–V2016.
17. Technique of determining RAT systems exploitation and modernization efficiency depending on railway lines classification [Metodika opredeleniya effektivnosti ekspluatatsii i modernizatsii sistem ZhAT v zavisimosti ot klassifikatsii zheleznodorozhnykh liniy] : approved by order of JSC Russian Railways dated 23.12.2016 No. 2651/r.
18. Technique of assessing RAT technical equipment functional resources [Metodika otsenki funktsional'nogo resursa tekhnicheskikh sredstv zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki] : approved by JSC Russian Railways 21.11.2015.

Объем статьи 0,65 авторских листа

УДК 629.463

**Александр Васильевич Смольянинов, доктор технических наук, профессор кафедры «Вагоны» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия**

## МЕТОДИКА ИНЖЕНЕРНОЙ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ БАЗЫ ВАГОНА НА ЕГО ДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ

**Alexander Vasiliyevich Smolyaninov, DSc in Engineering, Professor, Railway Cars Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia**

### Method for engineering assessment of truck-center spacing influence on dynamic parameters of a car

#### Аннотация

Процесс определения линейных размеров вагона состоит из многовариантных расчетов. Как правило, критерием окончательного выбора являются максимально возможные размеры проектируемого вагона для обеспечения наибольшей грузоподъемности.

Линейные размеры платформ для перевозки крупнотоннажных контейнеров должны отвечать условию максимально возможного числа контейнеров, размещаемых на единице подвижного состава для заданного габарита. Проектируемая платформа может иметь базу, размеры которой варьируются в достаточно широком диапазоне, при этом следует ожидать, что и динамика этих вариантов платформ будет различна.

В статье рассматриваются основные положения методики предварительной оценки динамических качеств проектируемой платформы. Приведены результаты исследований в виде графика зависимости коэффициента динамичности от базы платформы.

**Ключевые слова:** размеры вагона, погрузочная площадка, дифференциальное уравнение, коэффициент динамичности, возмущающая сила.

#### Summary

The process of determining the linear dimensions of a car consists of multivariant calculations. As a rule, the final selection criterion is the maximum possible dimensions of the designed wagon to ensure the highest weight-bearing capacity.

The linear dimensions of large-capacity container cars must meet the condition of the maximum possible number of containers placed on a unit of rolling stock for a given clearance diagram. The designed flat car can have a truck-center spacing with the size that varies in a fairly wide range, so it should be expected that the dynamics of these variants of flat cars will be different.

The paper considers the main provisions of a method for preliminary assessment of dynamic characteristics of the designed flat car. The results of studies are presented in the form of a graph of the dynamic factor dependence on the truck-center spacing.

**Keywords:** car dimensions, freight storage, differential equation, dynamic factor, disturbing force.

DOI: 10.20291/1815-9400-2019-1-41-44

**П**роектирование вагона начинается с определения его линейных размеров, которые являются составной частью технико-экономических параметров. Важнейший линейный параметр — база вагона. База ( $l$ ) и длина консолей ( $n_k$ ) — это критерии определения ширины вагона по результатам вписывания в габарит, т.е.  $2B_i = f(l, n_k)$ . Согласно ГОСТ 9238–2013 [1], максимально допускаемая ширина железнодорожного подвижного состава на некоторой высоте над уровнем верха головки рельса в рассматриваемом сечении определяется по формуле

$$2B_i = 2(B - E_i),$$

где  $B$  — полуширина соответствующего габарита железнодорожного подвижного состава на рассматриваемой высоте, мм;  $E_i$  — одно из ограничений поперечных сечений подвижного состава [1].

Величины ограничений или поперечных смещений железнодорожного подвижного состава устанавливаются при вписывании в кривую расчетного радиуса с учетом наибольших разбегов и износов деталей ходовых частей в зависимости от базы и длины консоли.

Методика определения оптимального соотношения между длиной консольных частей вагона и его базы из условия полного использования габарита подвижного состава предложена в [2]. Методика позволяет находить оптимальные значения длин консольных частей вагона при заданной базе и, наоборот, анализировать рациональность длины консолей и базы у существующих или проектируемых вагонов. Для практического использования предлагается соотношение, при котором смещения середины и концов вагона одинаковы (равны):

$$l = \frac{(l + 2 \cdot n_k)}{\sqrt{2}}. \quad (1)$$

Подчеркнем, что эти доводы основаны на необходимости определения максимальных размеров вагона по длине и ширине. Специализированные фитинговые платформы проектируются исходя из несколько других критериев, а именно из максимально возможной длины рамы платформы, кратной длине 20-футового контейнера (6,058 м). При этом минимально возможная ширина платформы не должна быть меньше ширины крупнотоннажного контейнера [3].

В работе [4] дан анализ параметров платформ для перевозки контейнеров с точки зрения максимального размещения числа последних на единице подвижного состава. В первых подобных платформах при базе  $l = 9,72$  м рама (погрузочная площадка) имела длину 13,4 м, что позволяло разместить один 40-футовый (12,192 м) или два 20-футовых контейнера. У такой платформы (модель 13-401) соотношение между длиной рамы и базой составляет 1,3786, что достаточно близко к значению  $\sqrt{2}$ , при этом ширина платформы в габарите 0-ВМ равна 2,87 м при ширине контейнера 2,438 м. Стремление увеличить число перевозимых контейнеров привело к созданию платформы с длиной рамы 24,7 м и базой 19,7 м, что позволяет разместить два 40-футовых контейнера (модель 13-3115-01) [4]. Поскольку размер базы значительно превосходит соотношение (1), такие платформы получили название длиннобазных. Известен и проект четырехосной короткобазной платформы модели 13-297 для перевозки крупнотоннажных контейнеров. В данном случае при длине рамы 14,4 м расчетная длина базы по зависимости (1) составляет 10,182 м. Фактический же строительный размер базы равен 9,4 м.

При выполнении соотношения (1) платформы с погрузочной площадкой для двух 40-футовых контейнеров имели бы длинные консольные части. Однако наличие длинных консолей, во-первых, осложняет проход горбов сортировочных горок и требует иного конструктивного исполнения центрирующей подвески ударно-центрирующего прибора автосцепного оборудования. Во-вторых, могут возникнуть проблемы с выполнением требований п. 8 ГОСТ 33211-2014 по обеспечению автоматического сце-

пления вагонов и проходу ими кривых участков пути [5].

Таким образом, проектируемая платформа по критерию размещения двух 40-футовых контейнеров может иметь базу, размеры которой варьируются в достаточно широком диапазоне, при этом следует ожидать, что и динамика этих вариантов платформ будет различна. Для исследования колебаний вагонов в вертикальной и горизонтальных плоскостях методами математического моделирования руководящий документ [6] устанавливает способы представления случайных возмущений от неровностей железнодорожного пути и расчетные спектральные плотности этих неровностей. Расчетные неровности — это обобщенная характеристика, в которую входят и геометрические неровности рельса и кругов катания колеса, и неравномерность характеристик пути по его длине (параметрические неровности). Характеристики неровностей представляются в виде последовательности  $n$  неровностей:

$$\eta_{ij} = \frac{h_{0j}}{2}(1 - \cos(\omega x^*)),$$

где  $h_{0j}$  — амплитуда неровности  $j$ -й рельсовой нити;

$\omega$  — значение пространственной частоты ( $\omega = 2\pi/L_H$ );

$i$  — порядковый номер колеса. Если  $i = 1$ ,  $x^* = x + (l_T + l)$ ; если  $i = 2$ ,  $x^* = x + l$ ; если  $i = 3$ ,  $x^* = x + l_T$ ; если  $i = 4$ ,  $x^* = x$ ;  $0 < x < n(l_T + l)$ .

Реализация данных зависимостей возможна в специальных программных комплексах, предназначенных для моделирования динамики и кинематики плоских и пространственных механи-

ческих систем (например, «Универсальный механизм»).

Для быстрой сравнительной инженерной оценки проектируемых вариантов конструкций фитинговых платформ интерес представляет следующий подход.

Рассмотрим плоскую механическую систему вынужденных колебаний платформы при движении по вертикальным неровностям вида  $\eta = h \cos \omega t$  (рис. 1). В приведенной зависимости  $h$  — амплитуда геометрической неровности;  $\omega$  — круговая частота внешнего возмущения, определяемая выражением  $\omega = \frac{2\pi}{L_H} \cdot V$ , где  $L_H$  — длина неровности;  $V$  — скорость движения вагона.

При длине неровности более 20 м и скорости движения до 120 км/ч амплитуду вертикальной неровности рекомендуется принимать величиной 24 мм [6]. При длине неровности, равной длине рельса 25 м, и скорости движения 25 м/с (90 км/ч — максимальная скорость движения грузового поезда) круговая частота будет равна 6,28<sup>1</sup>/с.

Дифференциальное уравнение колебаний подпрыгивания вагона как плоской механической системы имеет вид (см. рис. 1)

$$m\ddot{z} + R_{1T} + R_{2T} = 0, \quad (2)$$

где  $m$  — масса обрессоренных частей вагона, Нс<sup>2</sup>/м;

$R_{1T}$  и  $R_{2T}$  — реакции тележек на кузов вагона.

Исходя из конструкции двухосной тележки типа модели 18-100М реакции могут быть вычислены следующим образом:

$$R_{1T} = 2C(z - \eta_{1T}) + 2\beta(\dot{z} - \dot{\eta}_{1T});$$

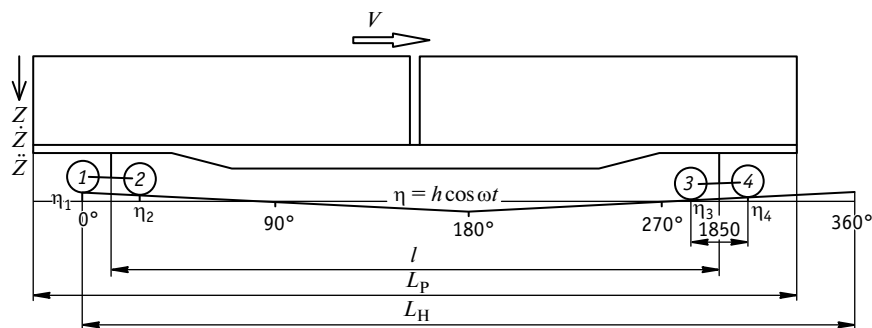


Рис. 1. Расчетная схема платформы при движении по неровностям пути



$$R_{2T} = 2C(z - \eta_{2T}) + 2\beta(\dot{z} - \dot{\eta}_{2T}),$$

где  $C$  — жесткость одного рессорного комплекта тележки, кН/м;  
 $\beta$  — параметр сопротивления гасителя колебаний, Нс/м;  
 $\eta_{1T}$  и  $\eta_{2T}$  — средние величины деформаций рессорных комплектов тележек от неровностей пути, м:

$$\eta_{1T} = \frac{\eta_1 + \eta_2}{2};$$

$$\eta_{2T} = \frac{\eta_3 + \eta_4}{2}.$$

В таком случае дифференциальное уравнение вынужденных колебаний вагона (2) будет иметь вид

$$m\ddot{z} + 4\beta\dot{z} + 4Cz = C(\eta_1 + \eta_2 + \eta_3 + \eta_4) + \beta(\dot{\eta}_1 + \dot{\eta}_2 + \dot{\eta}_3 + \dot{\eta}_4). \quad (3)$$

Далее будем рассматривать консервативную систему, т.е. систему, в которой отсутствует рассеивание энергии (нет гасителей колебаний). Уравнение (3) примет вид

$$m\ddot{z} + 4Cz = C(\eta_1 + \eta_2 + \eta_3 + \eta_4). \quad (4)$$

Текущие значения неровностей под каждым колесом вычисляются по зависимостям (см. рис. 1):

$$\eta_1 = h \cos(\omega t - \alpha_1);$$

$$\eta_2 = h \cos(\omega t - \alpha_2);$$

$$\eta_3 = h \cos(\omega t - \alpha_3);$$

$$\eta_4 = h \cos(\omega t - \alpha_4),$$

где  $\alpha_i$  — сдвиг фазы,

$$\alpha_i = \frac{x_i}{L_H} \cdot 2\pi.$$

Рассмотрим движение двух конструкций платформ.

Для платформы модели 13-401 при базе тележки  $2l_T = 1,85$  м и базе вагона  $l = 9,477$  м имеем  $\alpha_1 = 0^\circ$ ;  $\alpha_2 = 26,64^\circ$ ;  $\alpha_3 = 136,46^\circ$ ;  $\alpha_4 = 163,11^\circ$ . Сложение неровностей в зависимости (4) под каждым колесом произведем графически. Для этого построим единичную окружность радиусом  $R = h$ , на ней отметим единичные вектора соответственно углам сдвига фаз. Произведем попарно сложение векторов. В результате получим суммарный вектор, который в  $k_d = l_{1C}/R$  раз больше исходного  $h$ , т.е. коэффициент динамичности  $k_d = 43,3/30 = 1,433$  (рис. 2).

Аналогичные расчеты выполним для платформы модели 13-3115-01 при базе тележки  $2l_T = 1,85$  м и базе вагона  $l = 19,7$  м. Имеем  $\alpha_1 = 0^\circ$ ;  $\alpha_2 = 26,64^\circ$ ;  $\alpha_3 = 283,68^\circ$ ;  $\alpha_4 = 310,32^\circ$ . Для этой модели  $k_d = 3,05$ .

В таком случае уравнение (4) примет вид

$$m\ddot{z} + 4Cz = Ck_d h \cos(\omega t - \alpha_C) = R_{1C} \cos(\omega t - \alpha_C),$$

где  $R_{1C} = Ck_d h$  — амплитуда возмущающей силы, действующей на вагон в направлении оси  $Z$ ;

$\alpha_C$  — угол векторов  $a_C$  и  $a'_C$  соответственно,  $\alpha_C = 81,55^\circ$ ,  $\alpha'_C = 335,3^\circ$  (см. рис. 2).

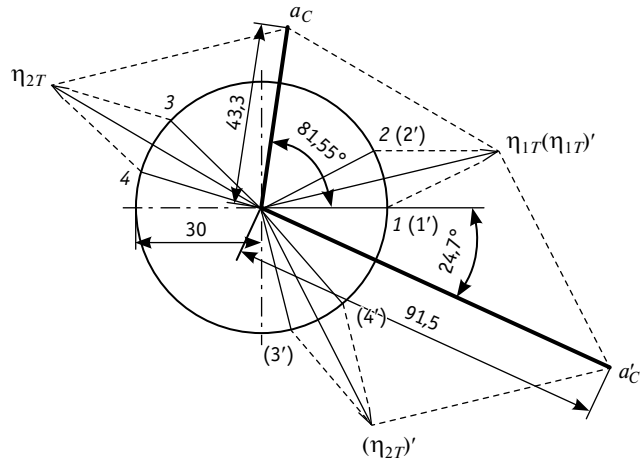


Рис. 2. Графическое сложение векторов неровностей под каждым колесом

Возмущающая сила имеет вид гармонической функции, аналогичной функции возмущения. Приведем пример. Тележка модели 18-100М имеет жесткость рессорного комплекта 4200 кН/м (420 тс/м), и при амплитуде неровности 0,01 м амплитуда возмущающей силы составит:

для платформы модели 13-401  $R_{1C} = 60,6$  кН (6,06 тс);

для платформы модели 13-3115-01  $R_{1C} = 128,1$  кН (12,81 тс).

На рис. 3 приведена зависимость коэффициента динамичности фитинговой платформы от длины базы, полученная по результатам анализа параметров платформ, рассмотренных в работе [4], за исключением платформы 13-6903 с тележкой модели 18-9855 (Barber). Все остальные платформы имеют ходовые части в виде двухосных тележек типа модели 18-100.

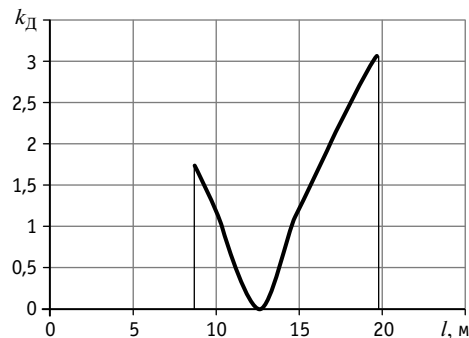


Рис. 3. График зависимости коэффициента динамичности платформы от базы

Анализ результатов, представленных на рис. 3, показывает, что при базе вагона, равной 12,5 м, коэффициент динамичности равен нулю, т.е. вагон не получает дополнительного усилия при движении по неровностям пути. Отклонение базы вагона на меньшую или большую величину приводит к росту сил, действующих на него со стороны пути. Ярким и достоверным подтверждением этого являются размеры восьмиосного полувагона модели 12-508, имевшего базу 12,07 м при длине рамы 19,11 м. Многосторонние сравнительные ходовые

испытания восьмиосных полувагонов показали, что они обладают лучшими динамическими качествами по сравнению с типовыми четырехосными, имеющими базу 8,65 м при длине рамы 12,78 м [7].

В качестве вывода отметим, что проектирование и производство фитинговых платформ исходит из необходимости перевозки на единице подвижного состава двух 40-футовых или четырех 20-футовых контейнеров, при этом конструкция в целом должна отвечать требованиям ГОСТ 33211–2014 [5].

## Литература

1. ГОСТ 9238–2013. Габариты железнодорожного подвижного состава и приближения строений. М. : Стандартинформ, 2014. 173 с.
2. Вагоны / Под ред. Л. А. Шадура ; 2-е изд., перераб. и доп. М. : Транспорт, 1973. 440 с.
3. ГОСТ 18477–79. Контейнеры универсальные. Типы, основные параметры и размеры. М. : Изд-во стандартов, 2004. 12 с.
4. Параметры платформ для перевозки крупнотоннажных контейнеров и пути повышения их эффективности / А. В. Смольянинов, А. Н. Давыдов, Д. В. Волков, Д. В. Чмир // Инновационный транспорт. 2018. № 1 (27). С. 23–31. DOI: 10.20291/2311-164X-2018-1-23-31. ISSN 2311–164X.
5. ГОСТ 33211–2014. Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам. М. : Стандартинформ, 2016. 58 с.
6. РД 32.68–96. Расчетные неровности железнодорожного пути для использования при исследованиях и проектировании пассажирских и грузовых вагонов. М. : ВНИИЖТ, 1997. 20 с.
7. Параметры и конструктивное исполнение высокопроизводительного подвижного состава / А. В. Смольянинов, В. Н. Филиппов, И. В. Козлов, А. Н. Давыдов // Транспорт Урала. 2013. № 1 (36). С. 46–49. ISSN 1815–9400.

## References

1. GOST 9238–2013. Construction and rolling stock clearance diagrams [Gabarity zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava i priblizheniya stroeniy]. Moscow : Standardinform, 2014. 173 p.
2. Cars [Vagony] / Edited by L. A. Shadur ; 2<sup>nd</sup> edition, revised and enlarged. Moscow : Transport, 1973. 440 p.
3. GOST 18477–79. Universal containers. Types, basic parameters and dimensions [Konteynery universal'nye. Tipy, osnovnye parametry i razmery]. Moscow : Standard Publishing House, 2004. 12 p.
4. Parameters of platforms for large-capacity containers transportation and ways to improve their efficiency [Parametry platform dlya perevozki krupnotonnazhnykh konteynerov i puti povysheniya ikh effektivnosti] / A. V. Smolyaninov, A. N. Davydov, D. V. Volkov, D. V. Chmir // Innotrans. 2018. No. 1 (27). Pp. 23–31. DOI: 10.20291/2311-164X-2018-1-23-31. ISSN 2311–164X.
5. GOST 33211–2014. Freight wagons. Requirements to structural strength and dynamic qualities [Vagony грузовые. Trebovaniya k prochnosti i dinamicheskim kachestvam]. Moscow : Standardinform, 2016. 58 p.
6. RD 32.68–96. Calculated irregularities of railway track for use in research and design of passenger and freight cars [Raschetnye nerovnosti zheleznodorozhnogo puti dlya ispol'zovaniya pri issledovaniyakh i proektirovaniy passazhirsikh i gruzovykh vagonov]. Moscow : VNIIZhT, 1997. 20 p.
7. Parameters and design of high-performance rolling stock [Parametry i konstruktivnoe ispolnenie vysokoproizvoditel'nogo podvizhnogo sostava] / A. V. Smolyaninov, V. N. Filippov, I. V. Kozlov, A. N. Davydov // Transport of the Urals. 2013. No. 1 (36). Pp. 46–49. ISSN 1815–9400.

Объем статьи 0,4 авторских листа

УДК 629.463.63

**Александр Владимирович Додонов**, кандидат технических наук, заместитель директора  
ООО «Инженерный центр подвижного состава» (ООО «ИЦПС»), Санкт-Петербург, Россия,

**Александр Евгеньевич Афанасьев**, кандидат технических наук, заместитель руководителя отдела  
ООО «Инженерный центр подвижного состава» (ООО «ИЦПС»), Санкт-Петербург, Россия,

**Андрей Анатольевич Хоменко**, кандидат технических наук, заведующий лабораторией  
ЗАО Научная организация «Тверской институт вагоностроения» (ЗАО НО «ТИВ»), Тверь, Россия,

**Андрей Андреевич Иванов**, инженер I категории ЗАО Научная организация «Тверской институт вагоностроения»  
(ЗАО НО «ТИВ»), Тверь, Россия

## РАЗРАБОТКА И АПРОБАЦИЯ МЕТОДИКИ РЕСУРСНЫХ ИСПЫТАНИЙ УЗЛА ЗАДЕЛКИ СТОЙКИ ВАГОНА-ПЛАТФОРМЫ ДЛЯ ЛЕСОМАТЕРИАЛОВ

**Alexander Vladimirovich Dodonov**, PhD in Engineering, Deputy Director,  
Engineering Centre of Rolling Stock LLC, St. Petersburg, Russia,

**Alexander Evgenyevich Afanasyev**, PhD in Engineering, Deputy Head of department,  
Engineering Centre of Rolling Stock LLC, St. Petersburg, Russia,

**Andrey Anatolyevich Khomenko**, PhD in Engineering, Head of laboratory,  
CJSC Scientific organization «Tver Institute of Car Engineering», Tver, Russia,

**Andrey Andreyevich Ivanov**, engineer of the I category,  
CJSC Scientific organization «Tver Institute of Car Engineering», Tver, Russia

## Development and approbation of method for life tests of body post bearing joint of flat-car for lumber

### Аннотация

В статье представлена методика ресурсных испытаний узла заделки стойки вагона-платформы для перевозки лесоматериалов. Этот узел является одним из наиболее ответственных элементов конструкции, от которого зависит безопасность движения. В качестве метода оценки надежности и ресурса рассматриваемого элемента выбраны ускоренные ресурсные испытания, позволяющие определить анализируемые характеристики на ограниченном числе опытных образцов при заданном форсированном режиме. Особое внимание уделено расчету и обоснованию режима испытаний при известном спектре нагружения узла заделки стойки, которое соответствует распределению скоростей движения вагона в эксплуатации. Выполнен анализ действующих нагрузок в эксплуатации, определены суммарное повреждающее воздействие за срок службы вагона и эквивалентная сила нагружения образцов, идентичная по повреждающему воздействию реальному спектру нагружения вагона. По результатам исследований разработана и успешно апробирована новая методика проведения стендовых испытаний, позволяющая более полно и достоверно по сравнению с расчетными методами оценить показатели ресурса узла заделки стойки вагона-платформы для перевозки лесоматериалов.

**Ключевые слова:** вагон, вагон-платформа, лесоматериалы, расчет, испытания, ресурс, методика, заделка стойки.

### Summary

The paper presents a method for life tests of body post bearing joint of flat-car for lumber. This joint is one of the most critical elements of the design that affect the safety of railway operation. As a method for assessing the reliability and life of the element under consideration the authors selected accelerated life tests that allow determining the analyzed characteristics on a limited number of prototypes at a given forced mode. Special attention is paid to calculation and justification of the testing mode at a known range of loading of the side wall post bearing, which corresponds to the distribution of velocities of a car in operation. The authors also carried out the analysis of the existing loads in operation, determined the total damaging effect for the service life of the car and the equivalent loading force of the samples that is identical to the damaging effect of the real range of loading of the car. According to the results of the research, a new method of rig tests has been developed and successfully tested, which allows assessing the life parameters of body post bearing joint of flat-car for lumber in more full and reliable way compared to the calculation methods.

**Keywords:** car, flat-car, lumber, calculation, tests, life, method, body post bearing.

DOI: 10.20291/1815-9400-2019-1-45-51

## ВВЕДЕНИЕ

По состоянию на июнь 2018 г. парк вагонов-платформ для перевозки лесоматериалов в Российской Федерации составил 28 тыс. ед. [1]. Крупнейшим оператором является ООО «Транслес», на долю которого приходится около 35 % парка вагонов этого типа. Несмотря на то что для рынка перевозок лесоматериалов прогнозируется умеренный рост [2, 3], по оценке Минпромторга России лесная отрасль обладает огромным потенциалом. Поэтому разработка перспективного железнодорожного подвижного состава, позволяющего повысить эффективность перевозок лесоматериалов, является актуальной задачей.

Для ее решения на АО «Рославльский ВРЗ» по заказу ООО «Транслес» разработан новый вагон-платформа модели 13-6923 [4]. Основное его преимущество — увеличенный погрузочный объем, равный 155 м<sup>3</sup>, что на 30–40 % больше, чем у серийно выпускаемых подобных вагонов. Повышение объема достигнуто за счет увеличения длины вагона по осям сцепления до 19540 мм и соответственно погрузочной длины, что дает возможность загружать три штабеля лесоматериалов по 6 м каждый. При этом перевозка осуществляется по тарифу, принятому для вагонов с базой до 19,6 м, что существенно снижает стоимость в пересчете на 1 м<sup>3</sup> груза.

С учетом того что инновационные вагоны-платформы представляют большой интерес для перевозочных компаний, особое внимание уделено надежности и ресурсу разработанных конструкций. Опыт эксплуатации вагонов для перевозки лесоматериалов, а также расчетные исследования вагона-платформы модели 13-6923 (табл. 1, рис. 1) позволили определить элементы, существенно влияющие на надежность вагона в целом. Одним из этих элементов является узел заделки стойки. Поскольку наиболее достоверный метод подтверждения ресурса конструкции — испытания на ресурс, то Рославльским ВРЗ совместно с ООО «ИЦПС» (Санкт-Петербург) и ЗАО НО «ТИВ» (Тверь) был выполнен комплекс таких испытаний для вагона модели 13-6923, в частности для узла заделки стойки.

Таблица 1

Технические характеристики вагона-платформы для перевозки лесоматериалов модели 13-6923

Параметры и характеристики	Значение
Грузоподъемность, т	73,5
Масса тары, т	26,3±0,2
Расчетная нагрузка от колесной пары на рельсы, кН (тс)	245 (25)
Внутренний объем, м <sup>3</sup>	155
Площадь настила пола, м <sup>2</sup>	52
Длина по осям сцепления автосцепок, мм	19540
База вагона, мм	14700
Ширина вагона погрузочная, мм	2840
Высота вагона максимальная, мм	4270
Длина вагона погрузочная, мм	18550
Количество пар стоек, шт.	12
Количество осей, шт.	4
Модель тележки	18-194-1
Автосцепное устройство	СА-3
Конструкционная скорость, км/ч	120
Габарит вагона по ГОСТ 9238	1-T



Рис. 1. Вагон-платформа для перевозки лесоматериалов модели 13-6923

## РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РЕСУРСНЫХ ИСПЫТАНИЙ

Опыт, накопленный ООО «ИЦПС», ЗАО НО «ТИВ» и других научных организаций по изучению усталостной прочности узлов вагонов различных типов [5–14], позволил разработать методику проведения стендовых испытаний. Методика включает следующие этапы: формирование перечня оцениваемых характеристик, разработка схемы приложения нагрузок, подбор средств испытаний, определение величины испытательных нагрузок, разработка порядка проведения испытаний, разработка схемы установки датчиков и оценка результатов испытаний.

Особенность данной методики заключается в том, что она впервые разработа-

на применительно к узлам вагонов-платформ для перевозки лесоматериалов.

В качестве определяемых характеристик по новой методике стендовых испытаний узлов заделки стойки вагонов-платформ были приняты статические и динамические напряжения, перемещения в месте приложения нагрузки, количество циклов колебаний до появления трещины и до разрушения, расположение трещины и ее длина.

Ввиду отсутствия опыта испытаний аналогичных узлов вагонов-платформ одним из этапов, от которого зависела достоверность полученных результатов, было обоснование величины испытательной нагрузки и контрольного числа циклов.

В процессе движения на стойку вагона действуют следующие нагрузки: статическая распорная от скатывающего груза, динамическая распорная от скатывающего груза и боковая центробежная.

Средняя нагрузка цикла  $P_m$  соответствует статической распорной нагрузке от скатывающего груза, амплитуда нагрузки цикла  $P_a$  соответствует сумме динамической распорной нагрузки от скатывающего груза и боковой центробежной силы.

Режим нагружения при испытаниях образцов описывается формулой

$$P = P_m \pm P_a$$

где  $P_m$  — средняя нагрузка цикла, кН;

$P_a$  — амплитуда нагрузки цикла, кН.

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ СРЕДНЕЙ НАГРУЗКИ ЦИКЛА

Средняя эквивалентная нагрузка цикла  $P_m$  определена из условия равенства изгибающих моментов, возникающих в заделке стойки при фактическом нагружении в эксплуатации (рис. 2а) и при испытаниях (рис. 2б).

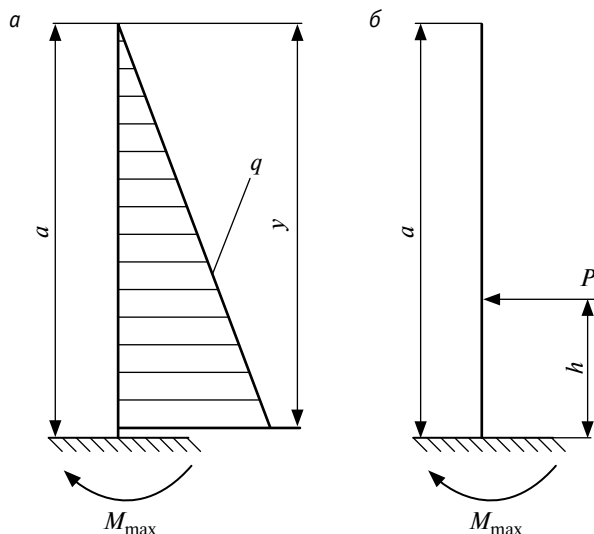


Рис. 2. Схемы нагружения стойки вагона-платформы модели 13-6923:

а — фактическое распределение распорной нагрузки на стойку;

б — схема нагружения при испытаниях

Для рассмотренных вариантов нагружения максимальный изгибающий момент в заделке вычислен по формулам:

$$M_{\max}^I = \frac{q^I y}{2} \cdot \left( a - \frac{2}{3} y \right); \quad (1)$$

$$M_{\max}^2 = P_m \cdot h, \quad (2)$$

где  $M_{\max}^I$  — максимальный изгибающий момент для варианта нагружения по схеме, приведенной на рис. 2а, кН·м;

$M_{\max}^2$  — максимальный изгибающий момент для варианта нагружения по схеме, приведенной на рис. 2б, кН·м;

$q^I$  — распределенная нагрузка на стойку, кН/м;

$a$  — высота стойки, м;

$y$  — расстояние от верха стойки до уровня пола, м;

$P_m$  — эквивалентная распорная сила, действующая на стойку при испытаниях, кН;

$h$  — высота приложения силы  $P_m$  (принята равной 1/3 высоты стойки), м.

Таким образом, сила  $P_m$  рассчитана по формуле

$$P_m = \frac{\frac{q^I y}{2} \cdot \left( a - \frac{2}{3} y \right)}{h}. \quad (3)$$

Распределенная сила  $q^I$  на одну стойку определена по формуле для вертикальных стенок в соответствии с [15]:

$$q^I = \gamma \cdot g \cdot \operatorname{tg}^2 \left( \frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right) \cdot y \cdot (l_1 + l_2), \quad (4)$$

где  $\gamma$  — плотность груза (принимается как отношение грузоподъемности к объему кузова), кг/м<sup>3</sup>;

$g$  — ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;

$\varphi$  — угол естественного откоса груза, рад;

$l_1, l_2$  — расстояния до середины смежных наиболее широких проемов между стойками, м.

В результате вычислений получена средняя нагрузка цикла  $P_m = 32,4$  кН.

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ АМПЛИТУДНОЙ НАГРУЗКИ ЦИКЛА

Для достижения положительного результата при оценке ресурса узла заделки стойки вагона-платформы модели 13-6923 должно соблюдаться условие

$$D_{\text{исп}} \geq D_{\text{экспл}} \quad (5)$$

где  $D_{\text{исп}}$  и  $D_{\text{экспл}}$  — соответственно усталостное повреждение, накопленное в процессе испытаний и в эксплуатации, кН<sup>4</sup>.

$D_{\text{экспл}}$  складывается из повреждающего воздействия от распорной динамической нагрузки вследствие колебаний вагона на рессорном подвешивании ( $D_{\text{экспл}}^I$ ) и от центробежной нагрузки, возникающей при движении вагона в кривых ( $D_{\text{экспл}}^{II}$ ):

$$D_{\text{экспл}} = D_{\text{экспл}}^I + D_{\text{экспл}}^{II}. \quad (6)$$

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ $D_{\text{экспл}}^I$

Накопленное усталостное повреждение  $D_{\text{экспл}}^I$  за срок службы рассчитано по выражению

$$D_{\text{экспл}}^I = \Pi^I \cdot N_C^I, \quad (7)$$

где  $\Pi^I$  — суммарное повреждающее воздействие во всем диапазоне скоростей за один условный цикл, кН<sup>4</sup>;

$N_C^I$  — суммарное число циклов действия динамической распорной силы за расчетный срок службы, которое в соответствии с [15] определено по формуле

$$N_C^I = f_3 \cdot T_P^I, \quad (8)$$

где  $f_3$  — центральная (эффективная) частота процесса изменения динамической силы, Гц;

$T_P^I$  — суммарное время действия динамической распорной силы при движении вагона за расчетный срок службы, с.

В качестве исходного спектра нагружения узла заделки стойки принято статистическое распределение коэффициента вертикальной динамики, вычисленного согласно [15], что соответствует распределению скоростей движения вагона в эксплуатации.

Суммарное повреждающее воздействие во всем диапазоне скоростей:

$$\Pi^I = \sum_{i=1}^k \left( (P_{\text{дин}i}^I)^m \cdot P_{Vi} \right), \quad (9)$$

где  $k$  — количество интервалов скоростей;

$P_{Vi}$  — вероятность повторения скоростей в диапазоне;

$m$  — показатель степени в уравнении кривой усталости в амплитудах,  $m = 4$ .

Динамическая распорная сила  $P_{\text{дин}}^I$ , воспринимаемая одной стойкой, определена по формуле

$$P_{\text{дин}}^I = P_m \cdot \overline{k_{\text{дв}}}, \quad (10)$$

где  $\overline{k_{\text{дв}}}$  — среднее вероятное значение коэффициента вертикальной динамики в интервале скоростей (принято согласно [15]).

#### ОПРЕДЕЛЕНИЕ $D_{\text{эксп}}^{\text{II}}$

Накопленное усталостное повреждение  $D_{\text{эксп}}^{\text{II}}$  за срок службы вагона определено как

$$D_{\text{эксп}}^{\text{II}} = \Pi^{\text{II}} \cdot N_C^{\text{II}}, \quad (11)$$

где  $N_C^{\text{II}}$  — суммарное число циклов действия динамической центробежной силы за расчетный срок службы,

$$N_C^{\text{II}} = \frac{N_C^I \cdot k_j}{s}, \quad (12)$$

где  $N_C^I$  — суммарное число циклов действия динамической силы за расчетный срок службы, определяемое по формуле (8);

$k_j$  — средняя доля протяженности кривых участков пути и стрелок;

$s$  — количество боковых стен.

В качестве исходного спектра нагружения узла заделки стойки принято статистическое распределение, аналогичное распределению динамической распорной нагрузки.

При определении эквивалентной нагрузки от центробежной силы, действующей на стойку, рассмотрены два случая приложения нагрузки (аналогично рис. 2). Принято, что бо-

ковая центробежная сила имеет равномерное распределение по высоте стойки в отличие от распорной нагрузки, которая распределена по «треугольнику».

Рассмотрены два варианта нагружения, для которых максимальный изгибающий момент в заделке стойки рассчитан по формулам:

$$M_{\text{max}}^I = q^{\text{II}} y \cdot \left( a - \frac{y}{2} \right); \quad (13)$$

$$M_{\text{max}}^{\text{II}} = P_{\text{ц}} \cdot h, \quad (14)$$

где  $M_{\text{max}}^I$  — максимальный изгибающий момент для равномерно распределенной нагрузки по высоте стойки, кН·м;

$M_{\text{max}}^{\text{II}}$  — максимальный изгибающий момент при нагружении сосредоточенной силой, кН·м;

$q^{\text{II}}$  — распределенная нагрузка на стойку, кН/м;

$P_{\text{ц}}$  — эквивалентная центробежная сила, действующая на стойку при испытаниях, Н.

Таким образом, сила  $P_{\text{ц}}$  определена по формуле

$$P_{\text{ц}} = \frac{q^{\text{II}} y \cdot \left( a - \frac{y}{2} \right)}{h}. \quad (15)$$

Распределенная сила  $q^{\text{II}}$  на одну стойку вычислена как

$$q^{\text{II}} = \frac{0,075 \cdot m_{\text{гр}} \cdot g \cdot \frac{l_1 + l_2}{L}}{y}, \quad (16)$$

где  $m_{\text{гр}}$  — масса груза в вагоне, кг;

$L$  — погрузочная длина вагона, м.

Принято, что эквивалентная центробежная сила  $P_{\text{ц}}$  равная 7,5 % от силы тяжести груза, возникает при конструкционной скорости движения. Отсюда распределение по диапазонам скоростей динамической эквивалентной центробежной силы  $P_{\text{дин}}^{\text{II}}$ , воспринимаемой одной стойкой, определено по формуле

$$P_{\text{дин}}^{\text{II}} = P_{\text{ц}} \cdot \left( \frac{\overline{V_k}}{V_{\text{констр}}} \right), \quad (17)$$

где  $V_{\text{констр}}$  — конструкционная скорость, м/с;

$\overline{V_k}$  — средняя скорость интервала, м/с.

Суммарное повреждающее воздействие во всем диапазоне скоростей вычислено по формуле

$$\Pi^{\text{II}} = \sum_{i=1}^k \left( (P_{\text{дин}i}^{\text{II}})^m \cdot P_{Vi} \right). \quad (18)$$

На основании гипотезы о линейном суммировании повреждений из полученного накопленного усталостного повреждения в эксплуатации за срок службы рассчитана эквивалентная по повреждающему воздействию амплитуда нагрузки цикла, приведенная к контрольному числу циклов  $N_{\text{исп}} = 8,5 \cdot 10^5$ :



$$P_a = m \sqrt{\frac{1}{N_{\text{исп}}}} \cdot D_{\text{экспл}} \quad (19)$$

В результате вычислений определена амплитуда нагрузки цикла, приведенная к контрольному числу циклов  $N_{\text{исп}} = 8,5 \cdot 10^5$ , которая составила 16,3 кН. Суммарное повреждающее воздействие при испытаниях вычислено по формуле

$$D_{\text{исп}} = P_a^m \cdot N_{\text{исп}} \quad (20)$$

Таким образом, установлено, что положительный результат ресурсных стендовых испытаний будет достигнут при режиме испытаний  $32,3 \pm 16,3$  кН и количестве циклов не менее  $8,5 \cdot 10^5$ .

## ПРОВЕДЕНИЕ ИСПЫТАНИЙ И АПРОБАЦИЯ МЕТОДИКИ

Всего для испытаний на АО «Рославльский ВРЗ» было изготовлено два сдвоенных образца (рис. 3). Такая конструкция была выбрана, чтобы исключить влияние концентраторов на результаты испытаний в зоне закреплений на стенде, и хорошо себя зарекомендовала, так как трещин в плоскости симметрии образца не обнаружено.

Статическое и динамическое нагружение образцов выполнялось на специальном стенде, для этого использовалась испытательная машина ПЦА-100 с подключенным к ней гидроцилиндром номинальным усилием 20 тс. Общий вид сдвоенного образца узла заделки стойки, установленного в испытательной машине, представлен на рис. 4.

Статические и динамические напряжения контролировали при помощи тензорезисторов и многоканального измерительного комплекса в контрольных точках согласно разработанной схеме. Количество циклов измеряли в автоматическом режиме по показаниям электромеханического счетчика. Наличие, длину и форму трещины регистрировали с помощью линейки и фотоаппаратуры.

Испытания проводили в соответствии с порядком, рекомендованным действующими нормативными документами [15, 16]. При статических испытаниях определяли напряжения в конструкции и прогиб образцов, при динамических — амплитуды динамических напряжений и ко-

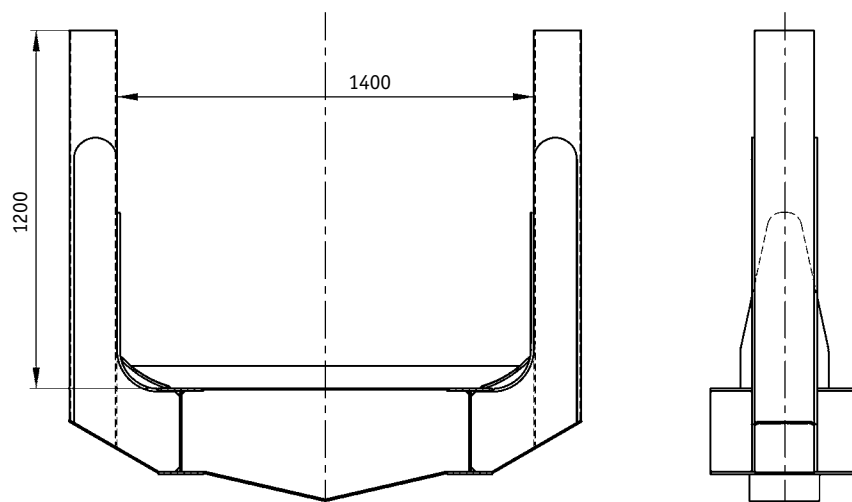


Рис. 3. Образец (сдвоенный) узла заделки стойки для испытаний, мм

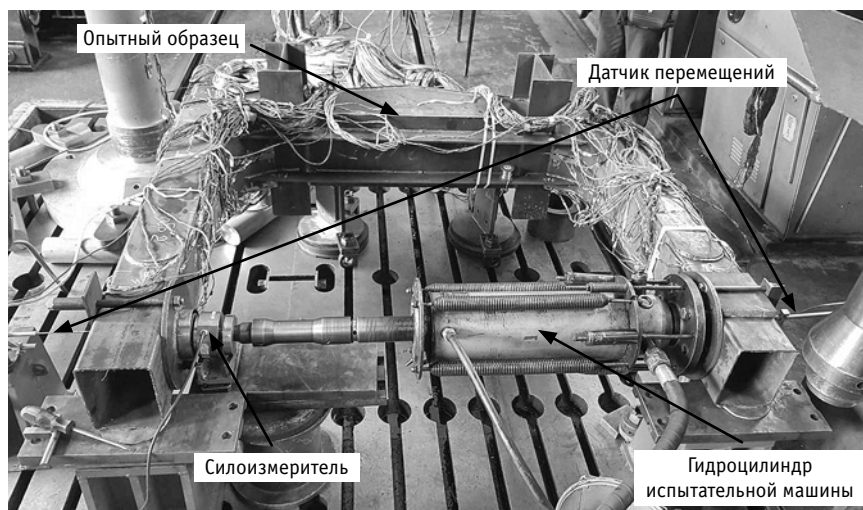


Рис. 4. Опытный образец, установленный в стенд

личество циклов до появления трещины и до разрушения.

Каждый образец испытывали на заданном режиме циклической нагрузки до разрушения или до достижения контрольного числа циклов  $N = 8,5 \cdot 10^5$ . Частота изменения циклической нагрузки составила 4 Гц. После достижения числа циклов  $N = 10^6$  переменную амплитудную нагрузку увеличивали на 10 % каждые  $2,5 \cdot 10^5$  циклов нагружения и продолжали испытания до перехода образца в предельное состояние. После достижения числа циклов  $N = 1,7 \cdot 10^6$  испытания были остановлены.

## АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ

Статические испытания показали, что напряжения в образцах возрастают линейно с увеличением нагрузки. При этом максимальные напряжения составили 195 МПа. Они зафиксированы с внутренней стороны стойки в сечении по сварному шву приварки гнутой накладки на внутреннем радиусе заделки стойки при нагрузке 50 кН и не превышали предела текучести материала образцов.

В результате ресурсных испытаний появились однотипные трещины во всех образцах, расположение трещин на одном из образцов представлено на рис. 5 и 6.

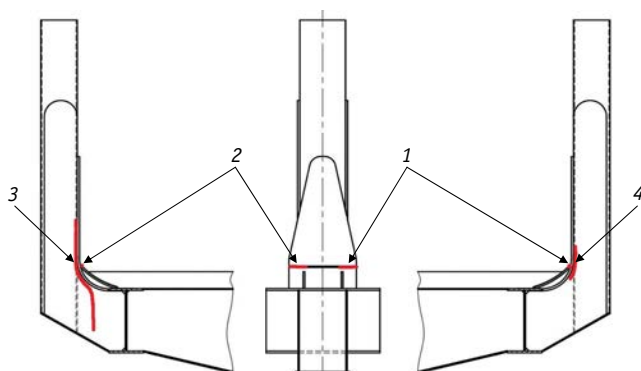


Рис. 5. Схема расположения трещин (1–4) на образце узла заделки стойки



Рис. 6. Общий вид трещин в образце узла заделки стойки

С учетом того что амплитудная нагрузка увеличивалась в ходе испытаний, количество циклов до появления трещин и до разрушения было приведено к амплитуде  $P_a = 16,3$  кН по формуле

$$N = x_i \cdot \left( \frac{P_i}{P_a} \right)^m, \quad (21)$$

где  $N$  — приведенное к амплитудной нагрузке  $P_a$  число циклов нагружения;

$x_i$  — полученное количество циклов при заданном режиме испытаний;

$P_i$  — фактическая амплитудная нагрузка при испытаниях. Результаты ресурсных испытаний с учетом пересчета по формуле (21) приведены в табл. 2.

По результатам ресурсных испытаний определены: выборочное среднее значение циклов до появления первой трещины и до разрушения  $\bar{x}$ ;

абсолютная погрешность измерений  $\Delta x$ ;

относительная живучесть Ж,

$$Ж = \frac{N_i^P - N_i^{TP}}{N_i^P}, \quad (22)$$

где  $N_i^P$  — среднее число циклов нагружения образцов до перехода в предельное состояние;

$N_i^{TP}$  — среднее число циклов нагружения образцов до появления трещины.

Анализ полученных данных показал, что первая трещина зарождается в зоне по верхнему сварному шву приварки усиливающей накладки к внутреннему усилению на радиусной части стойки (трещины 1 и 2). Разрушение происходит по сварным швам приварки внутреннего усиления на радиусной части стойки с внешней стороны усиления (трещины 3 и 4), которые выходят на основной металл бокового вертикального листа заделки стойки. Среднее количество циклов до возникновения первой трещины составило  $N = 277\,500$ , до разрушения —  $N = 1\,801\,517$ , что практически в два раза больше, чем минимально необходимое для положительного результата (850 000 циклов). Ресурс до разрушения составил 67,8 лет, живучесть узла заделки стойки — 0,85.

При статистической обработке результатов испытаний установлено, что ресурс узла заделки стойки до потери несущей способности с учетом погрешности измерений превышает назначенный срок службы вагона.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований разработана и успешно апробирована методика проведения стендовых испытаний на ресурс узлов вагона-платформы для перевозки лесоматериалов.

Новая методика позволяет более полно и достоверно по сравнению с расчетными методами оценить показатели ресурса узла заделки стойки вагона-платформы. Результаты проведенных испытаний подтвердили назначенный срок службы наиболее нагруженного узла конструкции вагона.

Результаты ресурсных испытаний, приведенные к амплитуде  $P_a = 16,3$  кН

Таблица 2

№ образца	Режим нагружения, кН		№ трещины	Количество циклов до		Ресурс до разрушения, лет
	$P_m$	$P_a$		обнаружения трещины	разрушения	
1	32,3	16,3	1	335 000	1 693 689	63,8
			2	354 000		
			3	830 000		
			4	1 452 937		
2	32,3	16,3	1	345 000	1 693 689	63,8
			2	345 000		
			3	1 284 743		
			4	1 452 937		
3	32,3	16,3	1	215 000	1 909 345 (не разрушился)	71,9
			2	347 000		
4	32,3	16,3	1	215 000	1 909 345	71,9
			2	320 000		
			3	1 440 738		
			4	1 844 858		

## Литература

1. Финляндия попросила допустить российские вагоны-лесовозы на местный рынок [Электронный ресурс]. URL: <http://www.morvesti.ru/detail.php?ID=71996> (дата обращения: 20.06.2018).
2. Обзор железнодорожного рынка РФ в апреле–мае 2018 г. [Электронный ресурс]. URL: <http://wagon-cargo.ru/news/obzor-zheleznodorozhnogo-rynka-rf-v-aprele-mae-2018-g/> (дата обращения: 20.06.2018).
3. Кудрявцева Е. Лесу готовят парк // Гудок. 2018. 13 марта. С. 4.
4. Производство новых платформ запущено благодаря помощи губернатора [Электронный ресурс]. URL: <http://мояколея1520.рф/new/1262/> (дата обращения: 20.06.2018).
5. Битюцкий А. А. Анализ развития методов оценки усталостной прочности несущих конструкций кузовов грузовых вагонов // Исследование усталостной прочности узлов и выбор параметров новых грузовых вагонов : сб. науч. тр. / под ред. А. А. Битюцкого ; Инженерный центр вагоностроения. СПб. : ОМ-Пресс, 2009. Вып. 7. С. 6–13.
6. Битюцкий А. А., Афанасьев А. Е. Исследование усталостной прочности заделок стоек боковой стены новой конструкции кузова полувагона // Исследование усталостной прочности узлов и выбор параметров новых грузовых вагонов : сб. науч. тр. / под ред. А. А. Битюцкого ; Инженерный центр вагоностроения. СПб. : ОМ-Пресс, 2009. Вып. 7. С. 62–72.
7. Битюцкий А. А., Афанасьев А. Е. Совершенствование узла заделки стойки боковой стены полувагона модели 12-9833 по критерию усталостной прочности // Совершенствование конструкций универсальных полувагонов грузовых вагонов : сб. науч. тр. / под ред. А. А. Битюцкого ; Инженерный центр вагоностроения. СПб. : ОМ-Пресс, 2010. Вып. 8. С. 31–41.
8. Хиллов И. А., Афанасьев А. Е. Выбор параметров узла заделки стойки боковой стены полувагона // Исследование усталостной прочности узлов и выбор параметров новых грузовых вагонов : сб. науч. тр. / под ред. А. А. Битюцкого ; Инженерный центр вагоностроения. СПб. : ОМ-Пресс, 2009. Вып. 7. С. 34–43.
9. Стендовые испытания на сопротивление усталости макетных узлов крытого вагона для перевозки автомобилей / А. А. Битюцкий, А. Е. Афанасьев, И. А. Хиллов, В. И. Гуськов // Транспорт Российской Федерации. 2015. № 3 (58). С. 81–85. ISSN 1994–831X.
10. Оптимизация параметров угловых швов заделки стоек боковых стен и швов соединения боковых и торцевых стен : отчет о НИР (заключ.) / ВНИИВ, Калинин. фил. Калинин, 1986. 100 с.
11. Михайлов С. И., Дубровин В. Г. Повышение вибрационной прочности узлов крепления стоек к раме полувагона // Труды УО ВНИИЖТ. 1974. Вып. 17. С. 77–85.
12. Плоткин В. С., Дружинин С. С., Ченцов Е. И. Исследование усталостной прочности заделок стоек 4-осных цельнометаллических полувагонов // Труды ВНИИВ. 1978. Вып. 35. С. 21–26.
13. Исследование прочности узлов крепления стоек 8-осных полувагонов габарита 1Т. Оценка прочности усовершенствованной конструкции узла крепления стоек 8-осного полувагона с разработкой предложений / Е. И. Ченцов и др. ; ВНИИЖТ, УО ВНИИЖТ. М. ; Свердловск, 1982. 20 с.
14. Ченцов Е. И., Михайлов С. И. Выносливость узлов крепления стоек к раме полувагона // Совершенствование конструкции, технического обслуживания, ремонта вагонов и погрузочно-разгрузочных средств / Под ред. Г. К. Сендерова, В. В. Зубарева. М., 1978. С. 45–48.
15. Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). М. : ГосНИИВ ; ВНИИЖТ, 1996. 319 с.
16. ГОСТ 33788–2016. Вагоны грузовые и пассажирские. Методы испытаний на прочность и ходовые качества. М. : Стандартинформ, 2016. 42 с.

## References

1. Finland asked to allow Russian log cars on the local market [Finlyandiya poprosila dopustit' rossiyskie vagony-lesovozy na mestnyy rynek]. [Electronic resource]. URL: <http://www.morvesti.ru/detail.php?ID=71996> (access date: 20.06.2018).
2. Review of the Russian railway market in April–May 2018 [Obzor zheleznodorozhnogo rynka RF v aprele–mae 2018 g.]. [Electronic resource]. URL: <http://wagon-cargo.ru/news/obzor-zheleznodorozhnogo-rynka-rf-v-aprele-mae-2018-g/> (access date: 20.06.2018).
3. Kudryavtseva E. Rolling stock will be prepared for lumber [Lesu podgotovoyat park] // Gudok. 2018. March, 13. P. 4.
4. Production of new flat cars launched with the help of the Governor [Proizvodstvo novykh platform zapushheno blagodarya pomoshhi gubernatora]. [Electronic resource]. URL: <http://мояколея1520.рф/new/1262/> (access date: 20.06.2018).
5. Bityutskiy A. A. Analysis of development of methods for assessing fatigue strength of freight cars load-carrying elements [Analiz razvitiya metodov otsenki ustalostnoy prochnosti nesushhih konstruktsiy kuzovov gruzovykh vagonov] // Research of fatigue strength of joints and selection of new freight cars parameters : proceedings / ed. by A. A. Bityutskiy ; Railcar-Building Engineering Centre. St. Petersburg : OM-Press, 2009. Issue 7. Pp. 6–13.
6. Bityutskiy A. A., Afanasyev A. E. Research of fatigue strength of open box car side wall post bearings with new design [Issledovanie ustalostnoy prochnosti zadelok stoev bokovoy steny novoy konstruktsii kuzova poluvagona] // Research of fatigue strength of joints and selection of new freight cars parameters : proceedings / ed. by A. A. Bityutskiy ; Railcar-Building Engineering Centre. St. Petersburg : OM-Press, 2009. Issue 7. Pp. 62–72.
7. Bityutskiy A. A., Afanasyev A. E. Development of side wall post bearing joint of open box car model 12–9833 by criterion of fatigue strength [Sovershenstvovanie uzla zadelki stoyki bokovoy steny poluvagona modeli 12-9833 po kriteriyu ustalostnoy prochnosti] // Development of universal open box cars design : proceedings / ed. by A. A. Bityutskiy ; Railcar-Building Engineering Centre. St. Petersburg : OM-Press, 2010. Issue 8. Pp. 31–41.
8. Khilov I. A., Afanasyev A. E. Selection of parameters of open box car side wall post bearing joint [Vybor parametrov uzla zadelki stoyki bokovoy steny poluvagona] // Research of fatigue strength of joints and selection of new freight cars parameters : proceedings / ed. by A. A. Bityutskiy ; Railcar-Building Engineering Centre. St. Petersburg : OM-Press, 2009. Issue 7. Pp. 34–43.
9. Rig test on fatigue strength of autorack box car modelled joints [Stendovye ispytaniya na soprotivlenie ustalosti maketnykh uzlov krytogo vagona dlya perevozki avtomobiley] / A. A. Bityutskiy, A. E. Afanasyev, I. A. Khilov, V. I. Gus'kov // Transport of the Russian Federation. 2015. No. 3 (58). Pp. 81–85. ISSN 1994–831X.
10. Parameters optimization of side wall post bearings fillet welds and perpend welds of side and end walls [Optimizatsiya parametrov uglovyykh shvov zadelki stoev bokovykh sten i shvov soedineniya bokovykh i tortsevykh sten] : research report / VNIIV. Kalinin, 1986. 100 p.
11. Mikhaylov S. I., Dubrovin V. G. Increase of vibrat strength of open box car body post bearing joints [Povyshenie vibratsionnoy prochnosti uzlov krepleniya stoev k rame poluvagona] // Works of Ural branch of VNIIZhT. 1974. Issue 17. Pp. 77–85.
12. Plotkin V. S., Druzhinin S. S., Chentsov E. I. Research of fatigue strength of four-axle open box car body post [Issledovanie ustalostnoy prochnosti zadelok stoev 4-osnykh tsel'nometallicheskiykh poluvagonov] // Works of VNIIV. 1978. Issue. 35. Pp. 21–26.
13. Strength research of body post bearings of eight-axle open box car having 1T equipment diagram. Strength assessment of eight-axle open box car body post bearing joints with advanced design and with proposal development [Issledovanie prochnosti uzlov krepleniya stoev 8-osnykh poluvagonov gabarita 1T. Otsenka prochnosti usovershenstvovannoy konstruktsii uzla krepleniya stoev 8-osnogo poluvagona s razrabotkoy predlozheniy] / E. I. Chentsov, et al. ; VNIIZhT, Ural branch of VNIIZhT. Moscow ; Sverdlovsk, 1982. 20 p.
14. Chentsov E. I., Mikhaylov S. I. Strength of open box car body post bearing joints [Vynoslivost' uzlov krepleniya stoev k rame poluvagona] // Development of design, maintenance, repair of cars and loading-unloading facilities / Ed. by G. K. Senderov, V. V. Zubarev. Moscow, 1978. Pp. 45–48.
15. Norms for calculation and design of the new and upgraded 1520 mm railway cars of Ministry of Railways (non-self-propelled) [Normy dlya rascheta i proektirovaniya novykh i modernizirovannykh vagonov zheleznykh dorog MPS kolei 1520 mm (nesamokhodnykh)]. Moscow : GosNIIV ; VNIIZhT, 1996. 319 p.
16. GOST 33788–2016. Freight and passenger railcars. Methods of testing structural strength and dynamic performance [Vagony gruzovye i passazhirskie. Metody ispytaniy na prochnost' i khodovye kachestva]. Moscow : Standardinform, 2016. 42 p.

УДК 629.014.4

Юлия Викторовна Савушкина, кандидат экономических наук, директор департамента аналитических исследований ООО «Всесоюзный научно-исследовательский центр транспортных технологий» (ООО «ВНИЦТТ»), Санкт-Петербург, Россия,

Кирилл Вальтерович Кякк, кандидат технических наук, генеральный директор ООО «ПТК-Инвест», Москва, Россия

## МЕТОДИКА ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ САМОРАЗГРУЖАЮЩИХСЯ БУНКЕРНЫХ ВАГОНОВ

Yuliya Viktorovna Savushkina, PhD in Economics, Director of Analytical Research Department, All-Union Research and Development Center for Transport Technology LLC, St. Petersburg, Russia,  
Kirill Valterovich Kyakk, PhD in Engineering, General Director of PTK-Invest LLC, Moscow, Russia

### Optimal parameters selection method for self-unloading hopper cars development

#### Аннотация

В 2012 г. в России была поставлена задача создать вагон-хоппер нового поколения. С помощью традиционной методики проектирования решить такую задачу не представлялось возможным из-за высокого уровня новизны продукции. Поэтому была разработана методика, позволяющая создавать конструкции инновационных вагонов, оптимизированные по показателю эффективности в условиях, моделирующих полный эксплуатационный цикл. Методика рассматривает множество всех возможных и технически реализуемых решений для элементов конструкции. В процессе проектирования обосновывается не только использование существующих технических решений и серийно выпускаемых комплектующих, но также синтез новых решений и постановка на производство новых комплектующих. Один из примеров применения этой методики — разработка вагонов-хопперов для перевозки зерна.

**Ключевые слова:** методика проектирования, алгоритм, вагон нового поколения, грузовой вагон, хоппер, оптимизация, критерии оптимизации, множество решений, разработка конструкции.

#### Summary

In 2012, the developers of freight railway rolling stock were tasked with creating a new generation hopper car. Promising designs had to be different in significantly improved technical and economic characteristics. The traditional design method did not allow to solve the problem due to the high level of product novelty. Therefore, there was a need for the new technique formation. The developed method allows creating designs of innovative cars optimized in terms of efficiency in conditions that simulate a full operational cycle. The cars optimization criteria and technical requirements take into account all the transport market participants needs. In the design process it is substantiated to use not only existing technical solutions and commercially available components, but also new solutions creation and production of new components. An example of the design technique application is the development of grain hopper cars.

**Keywords:** design method, algorithm, new generation car, freight car, hopper, optimization, optimization criteria, solution set, design development.

DOI: 10.20291/1815-9400-2019-1-52-60

**Ж**елезнодорожные перевозки сыпучих грузов — стабильный и постоянно растущий сегмент транспортной отрасли Российской Федерации. Так, если в 2013 г. погрузка в вагоны бункерного типа составляла 97 млн т, то в 2017-м достигла 108 млн т, а к 2023 г. прогнозируется дальнейшее увеличение перевозок вагонами-хопперами до 127 млн т. Соответственно от эффективности подвижного состава зависят показатели экономического роста грузоотправителей, грузополучателей, перевозчиков, а также заводов, выпускающих вагоны, и лизинговых компаний.

В 2012 г. в эксплуатацию на железные дороги колеи 1520 мм поступили вагоны нового поколения с увеличенной грузоподъемностью, объемом перевозимого груза и межремонтными нормативами [1]. Применявшиеся ранее и доведенные в процессе многолетнего серийного производства и эксплуатации конструкции не подходили для использования в новых вагонах. Поэтому была поставлена задача разработать методику и алгоритм проектирования, которые позволят не только адаптировать существующие конструкции, но и создать комплекс новых технических решений, обеспечивающих существенное повышение эффективности перевозок сыпучих грузов и получение экономического эффекта всеми участниками перевозочного процесса.

При создании модельного ряда вагонов-хопперов нового поколения традиционная методика проектирования подвижного состава была принципиально переработана. До этого применялись методики, предусматривающие формирование комплекса технических требований и последовательную адаптацию элементов конструкции для получения характеристик вагона, соответствующих требованиям [2–5]. Недостаток таких методик заключается в том, что технико-экономические показатели назначались на основании обзора аналогов и экспертных оценок без должного обоснования и, как правило, были либо

завышенными, либо заниженными. В первом случае по окончании разработки выяснялось, что уровень развития техники и технологии не позволяет создать желаемый объект. В результате ресурсы затрачивались на полный цикл разработки с отрицательным результатом, а конечный потребитель не получал новую продукцию. Во втором случае технические возможности могли быть недооценены, и назначались недостаточно высокие, но легкодостижимые показатели. Соответственно в производство запускалась и передавалась потребителям продукция, имеющая заниженную эффективность и, как следствие, морально устаревшая на момент создания.

Разработанные комплексная методика и алгоритм проектирования вагонов-хопперов позволяют создавать новый подвижной состав с технико-экономическими характеристиками (ТЭП), оптимизированными по показателю эффективности перевозочного процесса. Алгоритм (рис. 1 и 2) включает 8 этапов (поскольку объем статьи не позволяет подробно описать все из них, остановимся только на принципиальных особенностях).

На первом этапе определяют цель разработки, тип вагона и уточняют условия использования. Для этого формируют перечень или номенклатурные группы перевозимых грузов, уточняют объемы и маршруты перевозок, потенциальных потребителей вагонов, а также прогнозируют спрос и объем производства. Определяют плановый срок реализации бизнес-проекта (горизонт планирования), который может соответствовать сроку окупаемости разработки и постановки на производство, сроку окупаемости приобретения потребного парка вагонов или равняться продолжительности полного жизненного цикла вагона.

Для оптимизации технико-экономических характеристик и конструкции вагона-хоппера выбирают один или несколько показателей эффективности. В качестве таковых обычно используют экономические критерии (такие, например, как себестоимость перевозки 1 т груза, прибыль, получаемая от эксплуатации, ставка аренды и т.д.). Значения показателей эффективности определяют с помощью виртуального моделирования эксплуатационного цикла вагона [6, 7]. В процессе моделирования учитывают не только технические, коммерческие, но и финансовые показатели. Чем точнее модель соответствует реальной эксплуатации и исследует все особенности, тем меньше вероятность ошибки и выше достоверность полученного результата.

Для выбранного показателя эффективности (целевой функции  $W$ ) устанавливают зависимость его значения от технико-экономических характеристик (показателей назначения) вагона-хоппера [8]. То есть эффективность рассматривают как непрерывную или дискретную функцию технико-экономических характеристик разрабатываемого вагона:

$$W = F(c_1, c_2, c_3 \dots c_i), \quad (1)$$

где  $W$  — показатель эффективности вагона-хоппера;

$c_1, c_2, c_3 \dots c_i$  — технико-экономические характеристики.

Выбор оптимальных решений сводится к поиску технико-экономических характеристик вагона, при которых показате-

тель эффективности примет максимальное  $W \Rightarrow \max$  или минимальное  $W \Rightarrow \min$  значение в зависимости от физического смысла выбранного критерия.

Если проектируемый вагон-хоппер предназначен для перевозки нескольких грузов или номенклатурных групп грузов с различной плотностью, то при расчете показателя эффективности отдельно определяют эффект от перевозки каждого вида груза и суммируют с учетом вероятности перевозки каждого груза:

$$W = \sum W_k \cdot P_k, \quad (2)$$

где  $W_k$  — показатель эффективности при перевозке  $k$ -го груза;  $P_k$  — вероятность перевозки  $k$ -го груза, при этом  $\sum P_k = 1$ .

Для решения задачи оптимизации технико-экономических показателей вагона-хоппера и его конструкции из всего множества характеристик используют только те  $c_i$ , от которых зависит эффективность. Это позволяет сократить количество рассматриваемых на данном этапе параметров. Основные характеристики, определяющие эффективность всех типов вагонов-хопперов, — объем перевозимого груза, грузоподъемность, стоимость производства и межремонтные нормативы. К числу дополнительных характеристик, которые используются для отдельных типов вагонов, относятся длина по осям сцепления автосцепок, высота, количество и размер разгрузочных люков, способ загрузки и разгрузки, продолжительность разгрузки, назначенный срок службы вагона и размер планируемой к производству партии. Отобранные таким образом технико-экономические характеристики на третьем этапе алгоритма рассматриваются как изменяемые параметры, а на 4–6-м этапах, после решения задачи нахождения их оптимальных значений, становятся фиксированными целевыми показателями.

Для того чтобы создаваемый вагон-хоппер мог использоваться всеми потенциальными потребителями, определяют комплекс эксплуатационных требований, условий и ограничений. Кроме них учитывают также правила перевозки сыпучих грузов [9], нормативы безопасности на железнодорожном транспорте [10] и другие обязательные требования, относящиеся к вагонам-хопперам [9–13]. Весь этот комплекс требований представляет собой множество граничных условий, выполнение которых и должны обеспечивать разработанные в процессе проектирования технические решения.

На втором этапе формируют множество вариантов конструктивного исполнения вагонов-хопперов и определяют их технико-экономические характеристики [14]. Каждый вариант — это технически реализуемое сочетание различных конструктивных признаков, из которых используют только основные, определяющие технико-экономические характеристики. Множество конструктивных признаков существующих вагонов-хопперов дополняют перспективными техническими решениями, применяемыми в других типах вагонов или в других отраслях техники (например, новыми материалами, комплектованными с улучшенными показателями, ходовыми частями с увеличенной осевой нагрузкой и межремонтными нормативами).

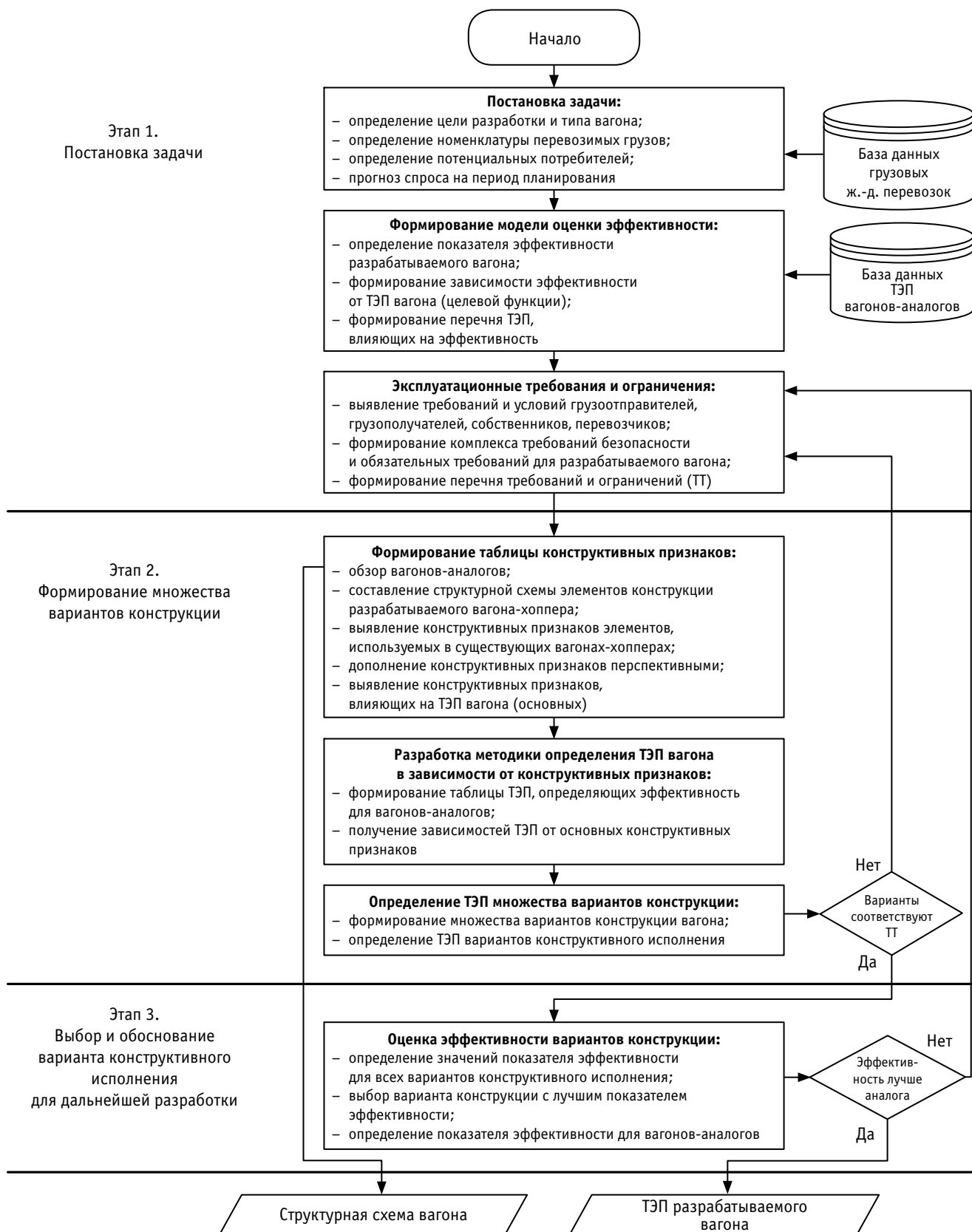


Рис. 1. Алгоритм проектирования вагонов-хопперов, этапы 1–3

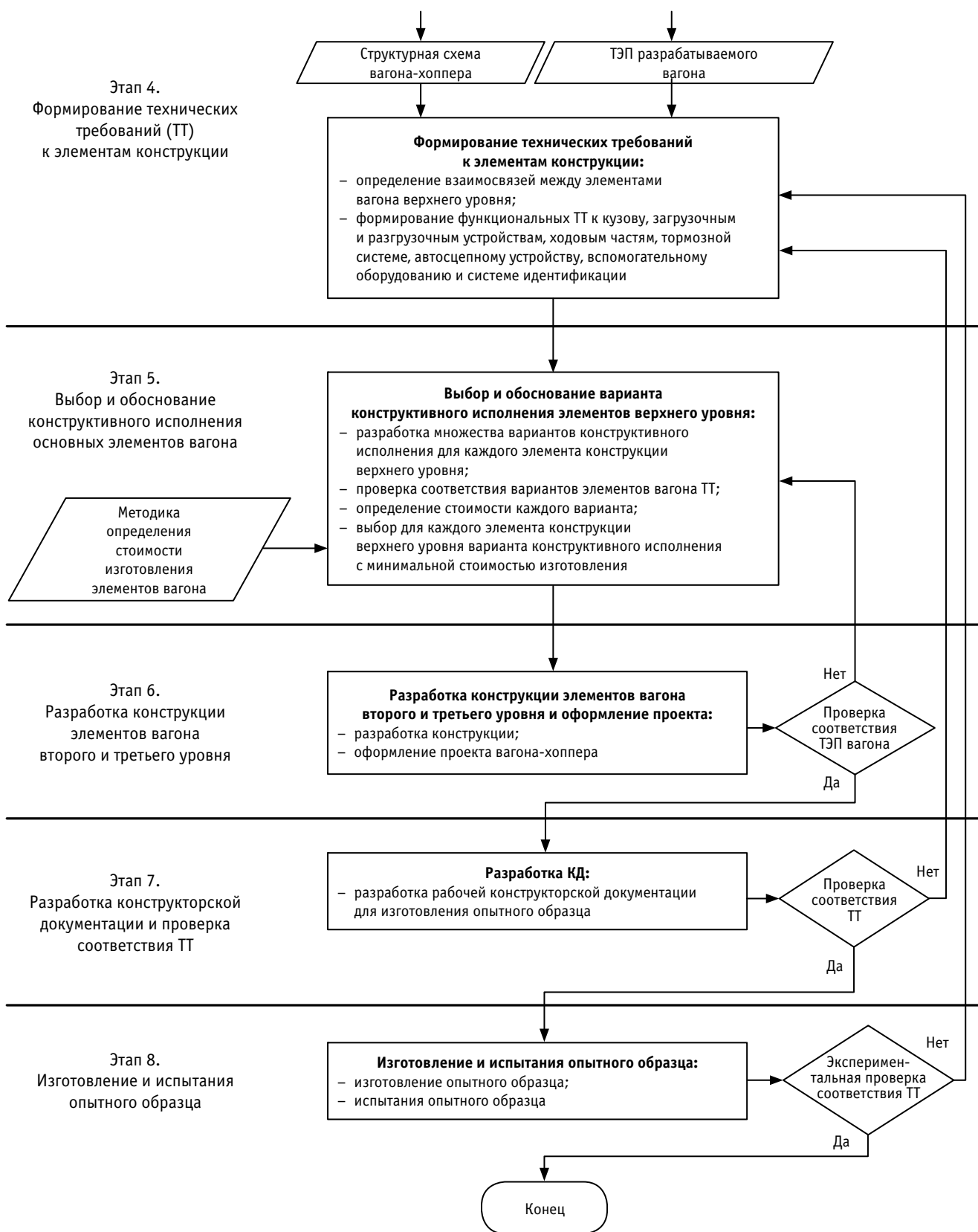


Рис. 2. Алгоритм проектирования вагонов-хопперов, этапы 4–8



Далее определяют зависимости технико-экономических характеристик вагона от основных конструктивных признаков, например зависимость массы кузова от объема, длины, конструктивной схемы и материала кузова [14]. Зависимости получают, анализируя вагоны с различными конструктивными особенностями и выявляя закономерности. Для технических решений, которые ранее не применялись, закономерности находят путем анализа базовых физических принципов, например, зависимости массы известной конструкции от показателей прочности и плотности нового материала. Таким образом, значения технико-экономических характеристик могут быть представлены в виде функций:

$$\begin{aligned} c_1 &= F(c_2, c_3, \dots, c_i, k_1, k_2, k_3, \dots, k_i); \\ c_2 &= F(c_1, c_3, \dots, c_i, k_1, k_2, k_3, \dots, k_i); \\ c_i &= F(c_1, c_2, c_3, \dots, c_{i-1}, k_1, k_2, k_3, \dots, k_i), \end{aligned} \quad (3)$$

где  $c_1, c_2, c_3, \dots, c_i$  — технико-экономические характеристики вагона;

$k_1, k_2, k_3, \dots, k_i$  — конструктивные признаки.

Следует отметить, что каждая из технико-экономических характеристик зависит не только от конструктивных признаков, но и от других показателей. Эта закономерность указывает на то, что вагон является системой, состоящей из взаимодействующих подсистем, и к нему применимы принципы системного проектирования.

Для каждого варианта по установленным зависимостям определяют технико-экономические характеристики. В связи с тем что варианты конструкции рассматриваются теоретически, затраты времени и ресурсов на полный цикл их проектирования получаются несущественными. Поэтому увеличение количества вариантов при использовании перспективных, не проверенных в эксплуатации технических решений или их комбинаций оправданно и необходимо, так как лучше рассмотреть несколько десятков не самых эффективных вариантов, чем не включить в рассмотрение один эффективный.

Каждый вариант проверяют на соответствие техническим требованиям [15]. Если вариант не соответствует заданным условиям, обязательно анализируют, является ли техническое требование обоснованным. Это необходимо, так как применение завышенных, недостаточно аргументированных требований может привести к исключению из дальнейшего рассмотрения эффективного варианта конструкции и использованию менее эффективного. Если обоснованность технического требования подтверждается, то варианты, не соответствующие ему, не рассматриваются.

На третьем этапе из всех сформированных вариантов делают выбор в пользу одного или нескольких оптимальных. Для этого по полученным ранее зависимостям определяют показатель эффективности и выбирают вариант с наилучшим его значением.

На четвертом этапе формируют технические требования к элементам конструкции. При этом анализируют структурную схему вагона и определяют взаимосвязи между элементами.

На данном этапе для упрощения задачи рассматривают только элементы верхнего уровня — кузов, загрузочные и разгрузочные устройства, ходовые части, тормозную систему, автосцепное устройство, вспомогательное оборудование. На основании технико-экономических показателей вагона и конструктивных признаков, определенных на предыдущем этапе, а также установленных взаимосвязей и ранее сформированных технических требований к вагону в целом разрабатывают функциональные технические требования отдельно для каждого элемента верхнего уровня.

На пятом этапе осуществляют выбор и обоснование конструктивного исполнения элементов верхнего уровня. Для этого формируют множество вариантов каждого элемента. Вариантами являются все известные технические решения, выявленные в результате обзора вагонов-аналогов, а также новые, ранее не применявшиеся, созданные в процессе разработки. Каждое решение проверяют на соответствие техническим требованиям к элементам верхнего уровня. Те решения, которые не соответствуют требованиям, исключают из рассмотрения. Для всех оставшихся вариантов оценивают стоимость изготовления и выбирают решение с минимальной стоимостью. Необходимо отметить, что стоимость изготовления элемента конструкции включает в себя и себестоимость, и стоимость подготовки производства с учетом дисконтирования, отнесенную к единице продукции. Обоснованные таким образом технические решения элементов верхнего уровня считают определенными и используют на следующих этапах проектирования.

На шестом, седьмом и восьмом этапах выполняют детальную разработку конструкции, проверку соответствия технико-экономических показателей вагона зафиксированным на третьем этапе и техническим требованиям, изготавливают и испытывают опытный образец.

Рассмотрим использование разработанной методики и алгоритма проектирования на примере создания вагонов-хопперов нового поколения для перевозки зерновых грузов.

Анализ перевозок зерновых грузов вагонами-хопперами, выполненный в 2013 г., показал, что номенклатура перевозимых пищевых грузов составляет более 90 наименований и является стабильной. Значительная разница насыпной плотности и угла естественного откоса, определяющего угол наклона торцевых и боковых стен, подразумевает отдельную оценку эффективности для каждого груза и последующее определение общей эффективности по формуле (2).

В процессе эксплуатации вагон-хоппер для перевозки зерна должен быть экономически эффективен для всех участников перевозочного процесса — собственника, перевозчика, грузоотправителя и грузополучателя. Поэтому в качестве критерия для сравнительной оценки эффективности вариантов конструкции разрабатываемого вагона-хоппера была принята расчетная стоимость перевозки 1 т груза. При оценке экономической эффективности учитывались следующие затраты для жизненного цикла вагона:

первоначальные затраты на приобретение потребного парка, отнесенные к одному году эксплуатации и зависящие от стоимости вагона и потребного парка;

годовые расходы на оплату процентной ставки кредита на приобретение вагонов, которые принимались для срока кредитования 7 лет и определялись стоимостью потребного парка;

затраты на ремонт потребного парка, отнесенные к одному году эксплуатации одного вагона и зависящие от межремонтных нормативов, вероятности отцепочного ремонта, а также стоимости ремонтов, включая замену колесных пар;

затраты на оплату тарифа за перевозку груза и возврат порожнего вагона. Тарифы принимались в соответствии с прейскурантом 10–01 [16].

Для определения исходных требований грузоотправителей и грузополучателей к конструкции и параметрам специализированного вагона-хоппера выполнено обследование пунктов погрузки и разгрузки зерновых грузов. В результате выявлены следующие эксплуатационные требования и ограничения. Для обслуживания на всех имеющихся в стране терминалах (более 800) с учетом рационального использования оборудованных загрузочных и разгрузочных фронтов вагон должен иметь максимальную высоту от уровня головок рельсов не более 4,85 м, длину по осям сцепления автосцепок 14,72 м или кратную, а также стандартный шаг расположения загрузочных люков. Разгрузка должна осуществляться в межрельсовое пространство. Большинство терминалов оборудованы весами, приспособленными для четырехосных вагонов с базой около 10,5 м.

Обзор вагонов-аналогов колеи 1520 мм, а также зарубежных проектов показал, что для кузова применяются конструктивные схемы с хребтовой балкой или несущими боковыми балками, плоскими каркасными или цилиндрическими бескаркасными боковыми стенами (рис. 3) [17]. Могут применяться как шибберные разгрузочные люки, так и поворотные люки с рычажным приводом. Для вагонов используются ходовые части, передающие осевые нагрузки 23,5; 25; 27 и 32,5 тс. Перспективными направлениями развития вагонов-хопперов являются конструкции четырехосных вагонов на двух двухосных тележках, а также вагоны сочлененного типа, состоящие из нескольких секций. При увеличении объема перевозимого груза увеличивается

объем кузова и соответственно его масса. Для снижения этой массы в зарубежной практике применяют кузов комбинированной конструкции, в котором рама изготовлена из стали, а боковые и торцевые стены, бункеры и крыша из алюминиевого сплава.

Сочетание конструктивных признаков позволило разработать 19 вариантов конструкции вагона-хоппера для перевозки зерна и определить их основные технико-экономические показатели (табл. 1–3).

Результаты сравнительного анализа (рис. 4) показали, что стоимость перевозки в вагонах с осевой нагрузкой 23,5 тс на 12 % выше, чем в вагонах с большими осевыми нагрузками. Для осевой нагрузки 25 тс лучшую эффективность ваго-

нов-хопперов обеспечивает применение стальных кузовов с плоскими каркасными боковыми стенами. Выполнение крыши из алюминиевого сплава позволяет увеличить грузоподъемность на 1 т и улучшить эффективность на 2 %.

Перспективный вагон-хоппер с осевой нагрузкой 27 тс и со стальным кузовом на 8 % эффективнее вагона, имеющего осевую нагрузку 25 тс. Применение алюминиевых сплавов для вагонов с осевой нагрузкой 27 и 32,5 тс может существенно снизить стоимость перевозки. Но для получения максимального эффекта необходимо изменить внутренние размеры всех погрузочных и разгрузочных эстакад, прежде всего длину, для беспрепятственного приема вагонов увеличенных размеров.

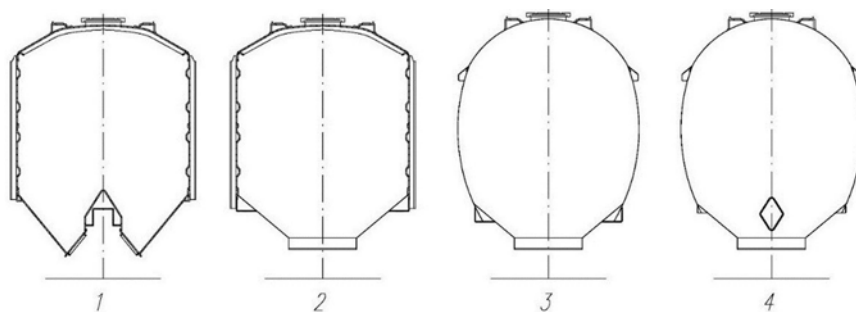


Рис. 3. Конструктивные схемы кузова:

1 — с плоскими боковыми стенами, стойками боковых стен, хребтовой балкой и парными бункерами по сторонам от хребтовой балки; 2 — с плоскими боковыми стенами, стойками боковых стен, боковыми балками и центральными бункерами; 3 — с цилиндрическими стенами, усиливающими диафрагмами, хребтовой балкой и центральными бункерами; 4 — с цилиндрическими стенами, усиливающими диафрагмами, боковыми балками и центральными бункерами

Таблица 1

Варианты конструктивного исполнения  
четырёхосного вагона-хоппера с кузовом из стали

№ варианта	1	2	3	4	5	6	7	8
Конструкция кузова	Плоские стены, хребтовая балка				Цилиндрические стены, боковые балки			
Нагрузка от колесной пары на рельсы, тс	23,5	25	27	32,5	23,5	25	27	32,5
Объем кузова, м <sup>3</sup>	107	115	126	157	105	113	124	155
Грузоподъемность, т	71	76,5	83,7	104,5	70,6	76,1	83,3	104,1
Межремонтные нормативы, тыс. км (лет)	210 (3)	800 (8)	1000 (8)	1000 (10)	210 (3)	800 (8)	1000 (8)	1000 (10)
Длина по осям сцепления автосцепок, м	14,72	14,72	14,72	18,4	14,72	14,72	14,72	18,1
Относительная стоимость перевозки 1 т груза	1	0,88	0,81	0,85	1,02	0,90	0,83	0,87

Таблица 2

Варианты конструктивного исполнения четырехосного вагона-хоппера с комбинированным кузовом из стали и алюминиевого сплава

№ варианта	9	10	11	12	13	14	15	16
Материал рамы	Сталь							
Материал стен и бункеров	АМГ	Сталь	АМГ	Сталь	АМГ6	Сталь	АМГ	Сталь
Материал крыши	АМГ							
Нагрузка от колесной пары на рельсы, тс	23,5	23,5	25	25	27	27	32,5	32,5
Объем кузова, м <sup>3</sup>	112	107	120	117	131	128	163	159
Грузоподъемность, т	74,3	71,4	79,8	77,5	87,2	84,8	108,3	105,7
Межремонтные нормативы, тыс. км (лет)	210 (3)	210 (3)	800 (8)	800 (8)	1000 (8)	1000 (8)	1000 (10)	1000 (10)
Длина вагона по осям сцепления автосцепок, м	14,72	14,72	14,72	14,72	16,1	15,6	20,0	19,5
Относительная стоимость перевозки 1 т груза	1,02	0,98	0,88	0,87	0,83	0,84	0,79	0,80

Таблица 3

Варианты конструктивного исполнения шестиосного вагона-хоппера сочлененного типа с комбинированным кузовом из стали и алюминиевого сплава и с осевой нагрузкой 25 тс

№ варианта	17	18	19
Материал рамы	Сталь		
Материал кузова	Сталь	АМГ	Сталь
Материал крыши	Сталь	АМГ	АМГ
Объем кузова, м <sup>3</sup>	171	179	174
Грузоподъемность, т	114,0	119,0	115,5
Межремонтные нормативы, тыс. км (лет)	800 (8)		
Длина вагона по осям сцепления автосцепок, м	20,8	21,7	21,0
Относительная стоимость перевозки 1 т груза	0,83	0,89	0,87

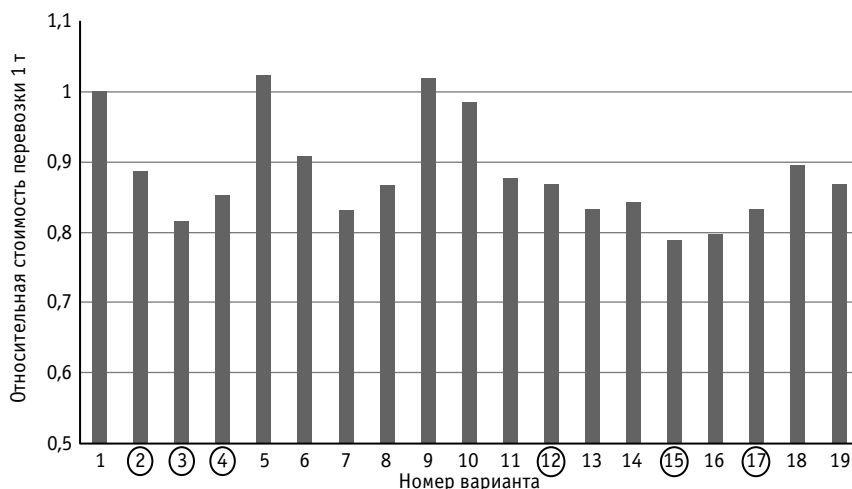


Рис. 4. Зависимость относительной стоимости перевозки 1 т зернового груза от конструктивного исполнения вагона-хоппера

Шестиосный вагон-хоппер сочлененного типа эффективнее, чем четырехосный с осевой нагрузкой 25 тс, на 6 %. Увеличение грузоподъемности и объема кузова компенсируют потери грузоотправителей и грузополучателей от повышенной длины вагона и необходимости перестановки при погрузке и разгрузке. Применение алюминиевых сплавов для вагонов сочлененного типа не приводит к снижению стоимости перевозки.

Результаты сравнительной оценки вариантов конструкции показали, что перспективные технические решения относятся к разным поколениям подвижного состава. Повышение эффективности достигается за счет использования новых комплектующих, для разработки и постановки на производство которых необходимы ресурсы и время. Поэтому было принято решение работы по вагонам с осевой нагрузкой 23,5 тс (варианты 1, 5, 9, 10) не проводить из-за низкой эффективности, а высокоэффективные вагоны внедрять поэтапно. Так, на первом этапе необходимо разработать и поставить на производство вагоны с осевой нагрузкой 25 тс (варианты 2 и 12). Затем следует спроектировать и запустить в опытную эксплуатацию вагоны-хопперы следующего поколения с осевой нагрузкой 27 тс, а также вагоны сочлененного типа (варианты 3 и 17). Далее по результатам их ввода в эксплуатацию должно приниматься решение о работах над вагонами с осевой нагрузкой более 27 тс (варианты 4 и 15).

На основании принятых технических решений были разработаны и поставлены на производство вагон-хоппер модели 19-9549 (рис. 5) и вагон-хоппер с увеличенной грузоподъемностью и крышей из алюминиевого сплава модели 19-9549-02 (рис. 6) [18, 19]. Разработка четырехосного вагона с осевой нагрузкой 27 тс (рис. 7) и шестиосного вагона сочлененного типа (рис. 8) находится на этапе 8 — проведение испытаний.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Традиционные методики проектирования не подходят для создания грузовых железнодорожных вагонов нового поколения. Поэтому была разработана усовершенствованная методика, позволяющая получить вагоны-хопперы, оптимизированные



Рис. 5. Вагон-хopper для перевозки зерна (модель 19-9549)



Рис. 6. Вагон-хopper с крышей из алюминиевого сплава для перевозки зерна (модель 19-9549-02)



Рис. 7. Вагон-хopper с осевой нагрузкой 27 тс для перевозки зерна (модель 19-6952)



Рис. 8. Шестиосный вагон-хopper сочлененного типа для перевозки зерна (модель 19-6978)

по показателю эффективности, и учитывая специфику перевозок и интересы всех участников перевозочного процесса.

Методика и ее алгоритм дают возможность поэтапно оптимизировать не только основные технико-экономические показатели вагона-хopperа, но и конструкцию всех элементов. Особенность методики

заключается в том, что в процессе проектирования принимаются решения об использовании существующих или разработке новых комплектующих.

Предлагаемая методика позволила обосновать основные направления развития вагонов бункерного типа для перевозки зерна. Ее апробация проводилась

в 2013–2014 гг., когда были разработаны и запущены в крупносерийное производство инновационные вагоны с осевой нагрузкой 25 тс. Следующий этап предусматривает реализацию перспективных проектов вагона-хopperа с осевой нагрузкой 27 тс и шестиосного вагона сочлененного типа.

## Литература

1. Проблемы и перспективы внедрения инновационных вагонов на сети РЖД [Электронный ресурс]. URL: <http://www.rzd-partner.ru/zhd-transport/news/problemy-i-perspektivy-vnedreniya-innovatsionnykh-vagonov-na-seti-rzhd/> (дата обращения: 12.11.2018).
2. Смольянинов А. В., Пранов В. А. Конструирование и расчет вагонов : метод. рекомендации. Екатеринбург : Изд-во УрГУПС, 2017. 147 с.
3. Шадур Л. А. Развитие отечественного вагонного парка. М. : Транспорт, 1988. 279 с.

## References

1. Problems and perspective of innovative cars introduction on the Russian Railways network [Problemy i perspektivy vnedreniya innovatsionnykh vagonov na seti RZhD]. [Electronic resource]. URL: <http://www.rzd-partner.ru/zhd-transport/news/problemy-i-perspektivy-vnedreniya-innovatsionnykh-vagonov-na-seti-rzhd/> (access date: 12.11.2018).
2. Smolyaninov A. V., Pranov V. A. Design and calculation of cars [Konstruirovaniye i raschet vagonov] : guidelines. Ekaterinburg : Publishing House of USURT, 2017. 147 p.
3. Shadur L. A. Development of domestic car fleet [Razvitiye otechestvennogo vagonnogo parka]. Moscow : Transport, 1988. 279 p.
4. Cars [Vagony] / Ed. by L. A. Shadur; 3<sup>rd</sup> edition, revised and enlarged. Moscow : Transport, 1980. 439 p.

4. Вагоны / Под ред. Л. А. Шадура; 3-е изд., перераб. и доп. М. : Транспорт, 1980. 439 с.
5. Устьянцев С. В., Першхайд Н. В. Эра Лоренцо. Опыт успешной адаптации иностранных конструкций и технологии транспортного машиностроения. Нижний Тагил : ОАО «УВЗ», 2012. 196 с.
6. Вентцель Е. С. Исследование операций: задачи, принципы, методология. М. : Наука, 1988. 208 с.
7. ГОСТ Р ИСО/МЭК 15288–2005. Информационная технология. Системная инженерия. Процессы жизненного цикла систем. М. : Стандартинформ, 2006. 58 с.
8. Савушкин Р. А. Совершенствование конструкции саморазгружающихся бункерных вагонов для перевозки сыпучих грузов : автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб. : ПГУПС, 2003. 26 с.
9. Правила перевозок грузов железнодорожным транспортом насыпью и навалом : утв. приказом Минтранса России от 26.09.2016 г. № 281 [Электронный ресурс]. URL: <https://cdnimg.rg.ru/pril/134/78/98/44804.pdf> (дата обращения: 12.11.2018).
10. Технический регламент Таможенного союза 001/2011. О безопасности железнодорожного подвижного состава : утв. решением Комиссии Таможенного союза от 15.07.2011 г. № 710 [Electronic resource]. URL: [http://www.tsouz.ru/kts/kts29/documents/p\\_710\\_9.pdf](http://www.tsouz.ru/kts/kts29/documents/p_710_9.pdf) (дата обращения: 12.11.2018).
11. ГОСТ 33211–2014. Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам. М. : Стандартинформ, 2016. 58 с.
12. Нормы для расчета и проектирования новых и модернизированных вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). М. : ГосНИИВ; ВНИИЖТ, 1996. 319 с.
13. ГОСТ 30243.3–99. Вагоны-хопперы крытые колеи 1520 мм для сыпучих грузов. Общие технические условия. М. : Изд-во стандартов, 2001. 6 с.
14. Кякк К. В. Разработка методики определения основных характеристик вагона-хоппера на ранних стадиях проектирования : сб. науч. тр. / Инженерный центр вагоностроения. СПб. : ОМ-Пресс, 2011. Вып. 9. С. 34–46.
15. Лозбинеv В. П. Проектирование и оптимизация несущих систем кузовов вагонов. Брянск : Изд-во БГТУ, 1997. 88 с.
16. Прейскурант № 10–01 «Тарифы на перевозки грузов и услуги инфраструктуры, выполняемые российскими железными дорогами» (Тарифное руководство № 1, части 1 и 2) : утв. постановлением ФЭК России от 17.06.2003 г. № 47-т/5 [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/901868848> (дата обращения: 12.11.2018).
17. Почиталов Ю. В. Обоснование параметров перспективного вагона-хоппера для перевозки зерна : сб. науч. тр. / Инженерный центр вагоностроения. СПб. : ОМ-Пресс, 2011. Вып. 10. С. 15–28.
18. Сертифицирован вагон-хоппер с крышей из алюминиевого сплава [Электронный ресурс]. URL: <http://www.rzd-partner.ru/zhd-transport/news/sertifitsirovan-vagon-khopper-s-kryshy-iz-alyuminievogo-splava/> (дата обращения: 12.11.2018).
19. ОАО «РЖД». Инновации. 4. Грузовые вагоны. Вагон-хоппер для перевозки сыпучих грузов с крышей из алюминиевых сплавов модели 19-9549-02 [Электронный ресурс]. URL: [http://www.rzd.ru/static/public/ru?STRUCTURE\\_ID=666&layer\\_id=3290&id=3585](http://www.rzd.ru/static/public/ru?STRUCTURE_ID=666&layer_id=3290&id=3585) (дата обращения: 12.11.2018).
5. Ust'yantsev S. V., Pershkhaydo N. V. The Era of Lorenzo. Experience of successful adaptation of foreign designs and technology of transport engineering [Era Lorentso. Opyt uspezhnoy adaptatsii inostrannykh konstruktсий i tekhnologii transportnogo mashinostroeniya]. Nizhny Tagil : JSC Uralvagonzavod, 2012. 196 p.
6. Venttsel' E. S. Operations research: tasks, principles, methodology [Issledovanie operatsiy: zadachi, printsipy, metodologiya]. Moscow : Science, 1988. 208 p.
7. GOST R ISO/IEC 15288–2005. Information technology. System engineering. System life cycle processes [Informatsionnaya tekhnologiya. Sistemnaya inzheneriya. Protsestry zhiznennogo tsikla sistem]. Moscow : Standardinform, 2006. 58 p.
8. Savushkin R. A. Improvement of design of self-unloading hopper cars for transportation of bulk cargo [Sovershenstvovanie konstruktсий samorazgruzhayushchikhsya bunkernykh vagonov dlya perevozki sypuchikh gruzov]: Synopsis of PhD in Engineering Thesis. St. Petersburg : PSTU, 2003. 26 p.
9. Regulations for carriage of bulk cargo by rail [Pravila perevozok gruzov zheleznodorozhnym transportom nasyp'yu i navalom] : approved by Order of the Russian Federation Ministry of Transport dated 26.09.2016 No. 281 [Electronic resource]. URL: <https://cdnimg.rg.ru/pril/134/78/98/44804.pdf> (access date: 12.11.2018).
10. Technical regulation of the Customs Union 001/2011. About safety of the railway rolling stock [TR TS 001/2011. O bezopasnosti zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava] : approved by Decision of the Customs Union Committee dated 15.07.2011 No. 710 [Electronic resource]. URL: [http://www.tsouz.ru/kts/kts29/documents/p\\_710\\_9.pdf](http://www.tsouz.ru/kts/kts29/documents/p_710_9.pdf) (access date: 12.11.2018).
11. GOST 33211–2014. Freight wagons. Requirements to structural strength and dynamic qualities [Vagony gruzovye. Trebovaniya k prochnosti i dinamicheskim kachestvam]. Moscow : Standardinform, 2016. 58 p.
12. Norms for calculation and design of the new and upgraded 1520 mm railway cars of Ministry of Railways (non-self-propelled) [Normy dlya rascheta i proektirovaniya novykh i modernizirovannykh vagonov zheleznnykh dorog MPS kolei 1520 mm (nesamokhodnykh)]. Moscow : GosNIIV; VNIIZhT, 1996. 319 p.
13. GOST 30243.3–99. Covered hopper waggons for loose materials of 1520 mm gauge. General specifications [Vagony-khoppery krytye kolei 1520 mm dlya sypuchikh gruzov. Obshhie tekhnicheskie usloviya]. Moscow : Publishing House of Standards, 2001. 6 p.
14. Kyakk K. V. Development of methods for determining main characteristics of hopper car at early stages of design [Razrabotka metodiki opredeleniya osnovnykh kharakteristik vagona-khoppera na rannikh stadiyakh proektirovaniya] : proceedings / Car Engineering Center. St. Petersburg : OM-Press, 2011. Issue 9. Pp. 34–46.
15. Lozbinev V. P. Design and optimization of car body bearing systems [Proektirovanie i optimizatsiya nesushhikh sistem kuzovov vagonov]. Bryansk : Publishing House of BGUTU, 1997. 88 p.
16. Price list No. 10–01 «Tariffs for transportation of goods and infrastructure services performed by the Russian Railways» (Tariff guide No. 1, parts 1 and 2) [Preyskurant № 10–01 «Tarify na perevozki gruzov i uslugi infrastruktury, vypolnyaemye rossiyskimi zheleznymi dorogami» (Tarifnoe rukovodstvo № 1, chasti 1 i 2)] : approved by Order of the Russian Federation Federal Energy Comission dated 17.06.2003 No. 47-t/5 [Electronic resource]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/901868848> (access date: 12.11.2018).
17. Pochitalov Yu. V. Rationale of perspective grain haulage hopper car parameters [Obosnovanie parametrov perspektivnogo vagona-khoppera dlya perevozki zerna] : proceedings / Car Engineering Center. St. Petersburg : OM-Press, 2011. Issue 10. Pp. 15–28.
18. Certified hopper car with an aluminum alloy roof [Sertifitsirovan vagon-khopper s kryshy iz alyuminievogo splava]. [Electronic resource]. URL: <http://www.rzd-partner.ru/zhd-transport/news/sertifitsirovan-vagon-khopper-s-kryshy-iz-alyuminievogo-splava/> (access date: 12.11.2018).
19. JSC Russian Railways. Innovations. 4. Freight cars. Hopper car for transportation of bulk cargo with an aluminum alloy roof model 19–9549–02 [OAO «RZhD». Innovatsii. 4. Gruzovye vagony. Vagon-khopper dlya perevozki sypuchikh gruzov s kryshy iz alyuminievyykh splavov modeli 19-9549-02]. [Electronic resource]. URL: [http://www.rzd.ru/static/public/ru?STRUCTURE\\_ID=666&layer\\_id=3290&id=3585](http://www.rzd.ru/static/public/ru?STRUCTURE_ID=666&layer_id=3290&id=3585) (access date: 12.11.2018).

Объем статьи 1,15 авторских листа

УДК 656.222.6

**Виталий Сергеевич Колокольников**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление эксплуатационной работой» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,

**Татьяна Сергеевна Тунева**, магистрант кафедры «Станции, узлы и грузовая работа» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия

## ОБОСНОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УВЕЛИЧЕНИЯ ХОДОВЫХ СКОРОСТЕЙ ГРУЗОВЫХ ПОЕЗДОВ

**Vitaliy Sergeyevich Kolokolnikov**, PhD in Engineering, Associate Professor, Operations Management Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,

**Tatyana Sergeevna Tuneva**, graduate student, Stations, Junctions and Freight Work Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia

### Efficiency justification of freight trains running speed increase

#### Аннотация

Чтобы обеспечить прибытие поездов на станцию назначения к заданному моменту, в графики движения должны быть заложены резервы времени, позволяющие нивелировать воздействие дестабилизирующих факторов. Однако излишние либо недостаточные резервы приводят к снижению пропускной способности и, следовательно, к экономическим потерям.

По результатам экспериментальных исследований установлено, что ходовую скорость можно увеличить за счет сокращения резервов, заложенных в график движения поездов, — это не потребует больших капитальных затрат, позволит уплотнить график и повысить пропускную способность.

В то же время, как показали расчеты на имитационной модели, поскольку на работу участков влияет ритм работы технических станций, то увеличение ходовой скорости может привести не только к положительному, но и к отрицательному результату, следовательно, экономическая эффективность от увеличения ходовой скорости определяется конкретной ситуацией, что необходимо учитывать.

**Ключевые слова:** резервы времени, организация движения поездов, имитационная модель, время хода, график движения поездов, предупреждения об ограничении скорости.

#### Summary

To ensure the arrival of trains at the destination station at a given time train schedules should include time reserves to compensate the impact of destabilizing factors. However, the excessive or insufficient reserves lead to a decrease in capacity and, consequently, to economic losses.

The results of experimental studies show that the running speed can be increased by reducing the reserves included in the train schedule. This measure will not require high capital expenditures, will enable to compact the train schedule and increase the capacity.

At the same time, calculations on the simulation model demonstrate that the increase of running speed can lead to both positive and negative results since the work of a railway section is affected by the rhythm of technical stations, i.e. economic efficiency depends on the specific situation.

**Keywords:** time reserves, train operation, simulation model, time taken, train schedule, speed limit notice.

DOI: 10.20291/1815-9400-2019-1-61-65

**С**корость — важнейший показатель, определяющий технический уровень развития железнодорожного транспорта и качество организации движения поездов [1]. Повышение скорости позволит ускорить оборот подвижного состава, сократить срок доставки грузов, выполнить заданный объем перевозок меньшим количеством локомотивов и вагонов.

Скорость доставки грузов в большей степени определяется условиями пропуска грузовых поездов, чем технической скоростью движения [2]. Например, за период с 2016 по 2018 г. в среднем по сети РЖД участковые скорости увеличились на 1,3 км/ч, при этом по итогам 2018 г. для грузовых поездов участковая скорость составила 41, а техническая — 46,8 км/ч (табл. 1).

Таблица 1

Скорости движения поездов

Показатель	2016 г.	2017 г.	2018 г.	2018 г. к 2017 г., %
Средняя участковая скорость движения грузового поезда, км/ч	39,7	40,9	41,0	+0,2
Средняя техническая скорость движения грузового поезда, км/ч	46,7	47,2	46,8	–0,8
Маршрутная скорость грузового поезда, км/сут	642,8	664,7	627,4	–5,6
Скорость доставки грузов, км/сут	380,50	364,78	371,38	+1,8

В последнее время большое внимание уделяется повышению ходовых скоростей грузовых поездов. Можно выделить две принципиальные группы мер — организационно-технологические, т.е. устранение узких мест при небольших капитальных вложениях, и дорогостоящие, направленные на реконструкцию технического оснащения линии (рис. 1).



Рис. 1. Меры по увеличению скорости грузовых поездов

При разработке графика движения поездов (ГДП) прогнозируются закономерности изменения количества предупреждений об ограничении скорости и протяженность пути, на котором они действуют [3]. Эти предупреждения можно разделить на постоянные, длительные, связанные с производством ремонтных работ и вызываемые расстройствами пути в отдельных местах (рис. 2).

Известно, что на работу железнодорожного транспорта влияет большое количество случайных факторов [4]. Чтобы снизить воздействие дестабилизирующих факторов и обеспе-

чить прибытие поездов на станцию назначения к заданному моменту, в графики движения должны быть заложены резервы времени. Эти резервы могут быть как излишними, так и недостаточными, и все они влекут за собой снижение пропускной способности и экономические потери. Например, излишние резервы ухудшают показатели использования станционных путей и вагонов, локомотивов и локомотивных бригад, а недостаточные приводят к конфликтным ситуациям при занятии перегонов, сбоям в технологических процессах предприятий и значительным вторичным задержкам. Задержки поездов на перегонах могут быть вызваны отказами технических средств (неисправности подвижного состава и технических устройств, наличие предупреждений об ограничении скорости движения) и технологическими нарушениями (несвоевременное открытие сигналов на станциях и перенасыщение участков поездами). И те и другие возникают в результате пропуска опаздывающих поездов и несинхронности их движения.

Чтобы определить потери времени хода и снижение средних скоростей от действия ограничений, с помощью ПО ИСКРА [5] были проведены тягово-энергетические расчеты движения грузовых поездов по участкам главного хода Свердловской железной дороги (рис. 3). Максимально допустимой (установленной) скорости, обеспечиваемой тяговыми ресурсами, соответствовали значения времени хода на перегонах, полученные при тяговых расчетах. Эти значения сравнивались с нормативными, т.е. заложенными в ГДП (рис. 4 и 5).

Как видно из рис. 5, на участке Называевская — Войновка в ГДП заложены относительно малые резервы времени. Это можно объяснить равнинным профилем участка и небольшим количеством поездов, что позволяет легко поддерживать графиковую дисциплину. Больше всего резервов заложено на участке Екатеринбург — Пермь, и есть предположение, что они избыточны. Следовательно, устранение дополнительных ограничений на этом участке позволило бы сэкономить 48 мин в четном и 3 мин в нечетном направлении.



Рис. 2. Виды предупреждений

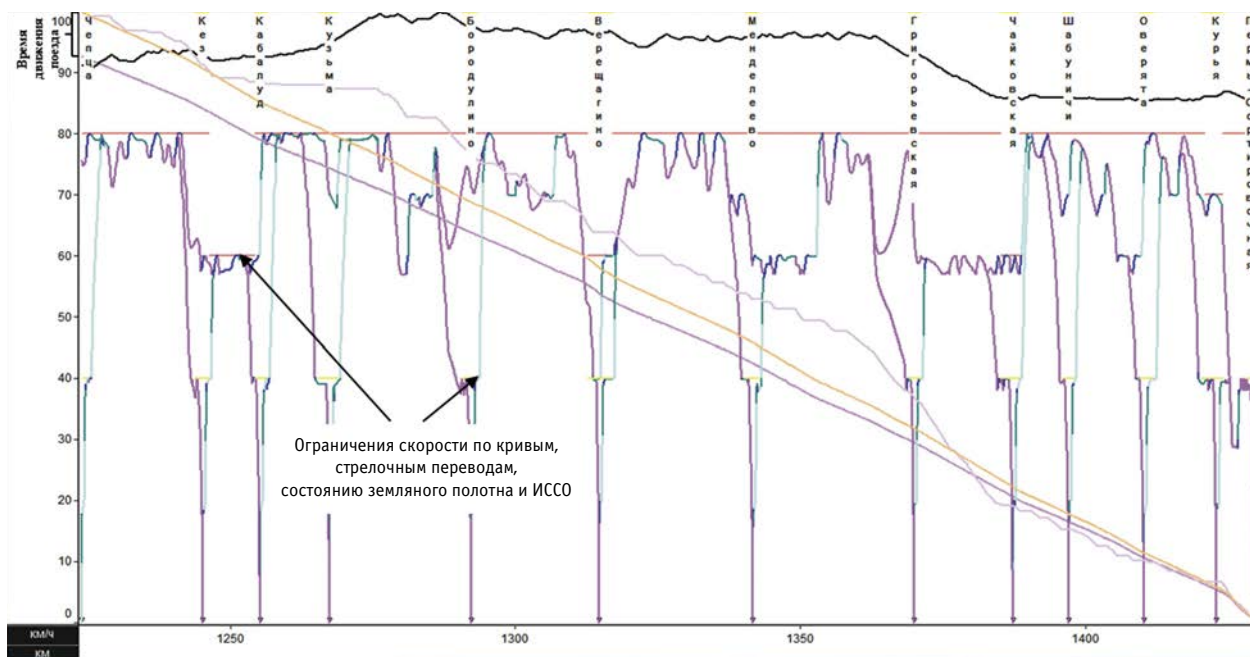


Рис. 3. Вариант движения нечетного поезда массой 6300 т с тягой электровозом ВЛ11 по участку Пермь-Сортировочная — Чепца



Рис. 4. Резерв времени, заложенный в ГТП:

—●— резерв в нечетном направлении, %; —●— резерв в четном направлении, %

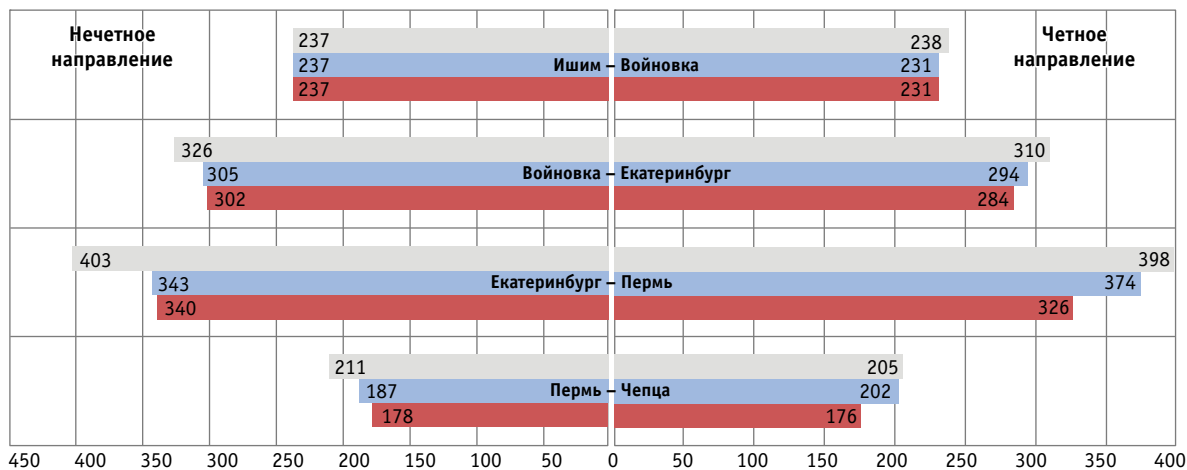


Рис. 5. Время хода грузовых поездов, мин:

— без дополнительных ограничений; — с ограничениями; — время из ГТП



Различие отношения скоростей в нечетном (груженом) и четном (порожнем) направлениях объясняется почти в три раза меньшим весом порожних поездов, медленным разгоном груженных поездов после проследования участков с ограничениями скорости и более высокими скоростями движения порожних поездов на зеленые и желтые показания светофоров (рис. 6).

Наличие избыточных резервов дает основания предполагать, что вместо применения дорогостоящих мероприятий по увеличению скоростей на отдельных участках достаточно всего лишь пересмотреть времена хода поездов. Чтобы оценить эффект от увеличения ходовых скоростей, были проведены экспериментальные исследования на имитационной модели полигона [6]. В частности, при моделировании установлено, что сокращение резервов, заложенных в ГДП, позволяет увеличить плотность потока поездов (рис. 7).

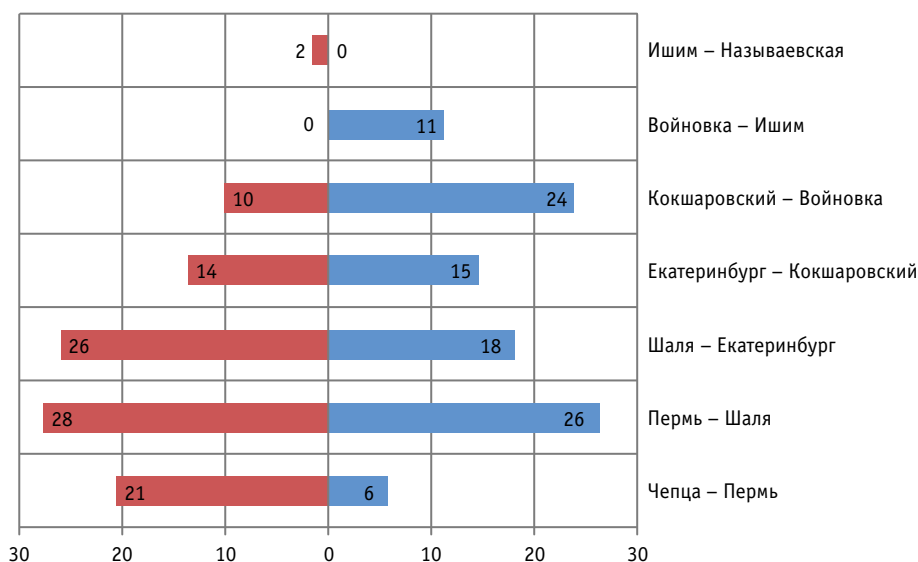
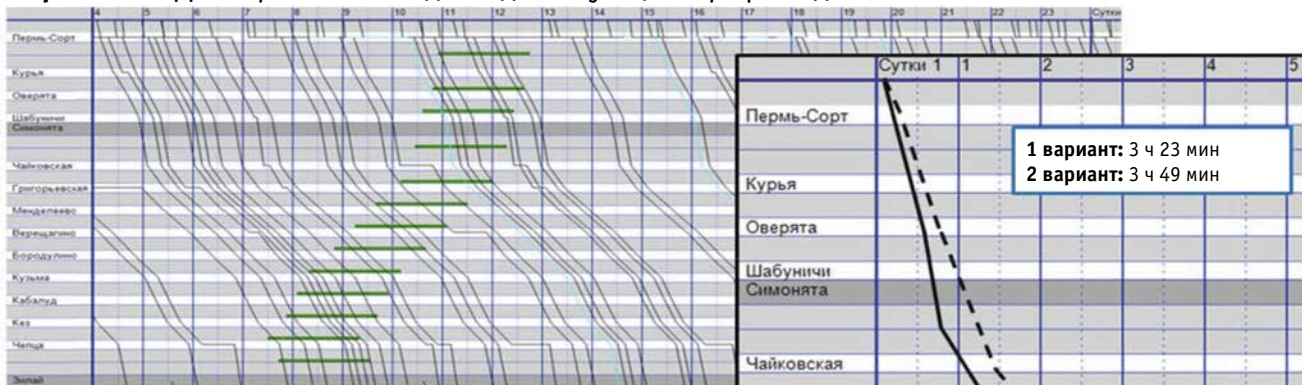


Рис. 6. Резерв времени, заложенный в ГДП, для поездов нечетного и четного направления, %:  
■ — нечетное направление; ■ — четное направление

## Вариант 2: ГДП с временами хода из действующего графика движения



## Вариант 1: ГДП с временами хода из тяговых расчетов

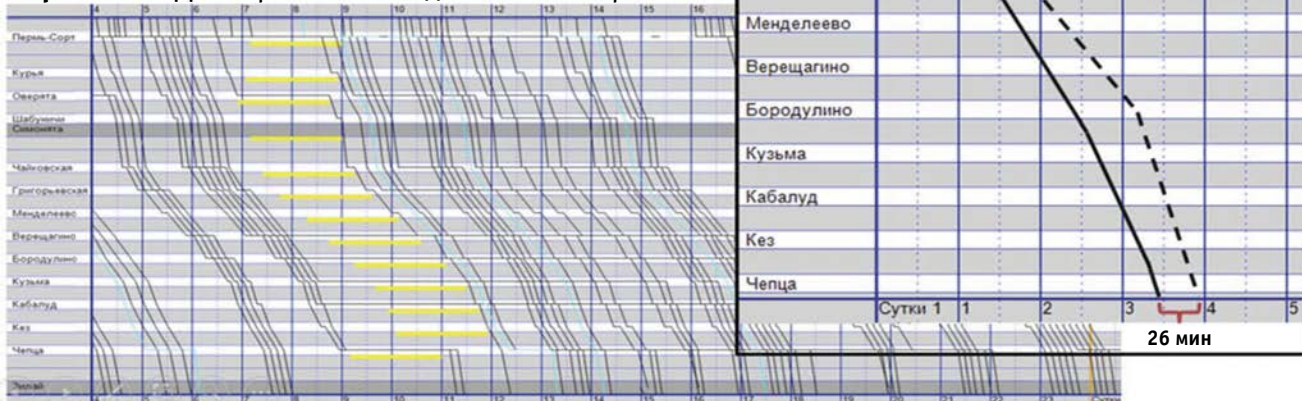


Рис. 7. Графики движения поездов

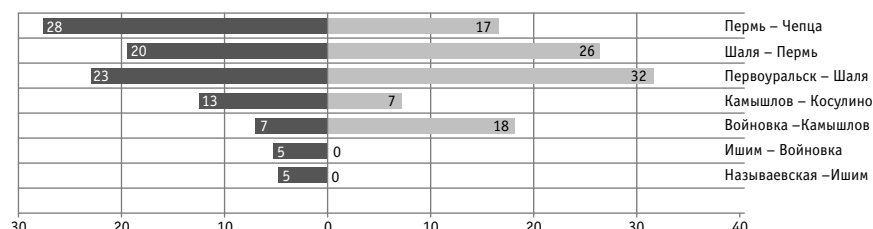


Рис. 8. Резерв участковой и технической скорости движения нечетных грузовых поездов по участкам, %:  
■ — техническая скорость; ■ — участковая скорость

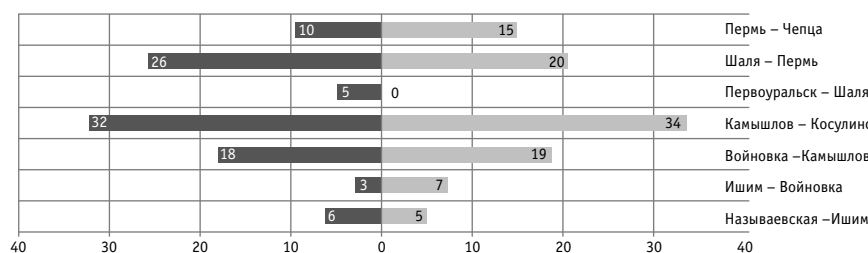


Рис. 9. Резерв участковой и технической скорости движения четных грузовых поездов по участкам, %:  
■ — техническая скорость; ■ — участковая скорость

Таблица 2

Маршрутная скорость движения грузовых поездов  
на участке Называевская — Чепца

Направление	Маршрутная скорость, км/ч		
	Исходная	С уменьшением резервов	Изменение
Нечетное	35,85	39,14	+3,29
Четное	38,31	39,92	+1,61

Вместе с тем расчеты на модели показали, что на разных участках эффект от увеличения скоростей отличается. На некоторых (например, Екатеринбург — Шалья — Пермь) при увеличении технической скорости значительно повышается и участковая скорость. Однако есть и такие участки, на которых при увеличении ходовой скорости участковая повышается несущественно либо остается на прежнем уровне (рис. 8 и 9). Это обусловлено тем, что на работу участка влияет ритм работы технических станций, который может препятствовать более раннему прибытию поездов. То есть увеличение ходовой скорости может привести не только к положительному, но и к отрицательному результату, что определяется конкретной ситуацией и должно учитываться при построении ГДП. Но в целом по дороге маршрутная скорость повышается (табл. 2), что свидетельствует о реальном ускорении поездов и сокращении времени доставки грузов.

Таким образом, как показали экспериментальные исследования на имитационной модели, увеличение ходовой скорости за счет сокращения резервов, заложенных в ГДП, вполне реализуемое решение, которое позволяет уплотнять график, повышать пропускную способность и не требует больших капитальных затрат.

## Литература

1. Организация движения на железнодорожном транспорте / Д. П. Заглядимов, Л. П. Петров, Е. С. Сергеев, В. А. Буянов : учеб. М. : Транспорт, 1978. 552 с.
2. Левин Д. Ю. Системное управление перевозочным процессом на железнодорожном транспорте. М. : Инфра-М, 2018. 313 с.
3. Козлов П. А., Колокольников В. С. Структурно-функциональная оптимизация больших полигонов железнодорожного транспорта // Транспорт Урала. 2018. № 3 (58). С. 3–7. DOI: 10.20291/1815-9400-2018-3-3-7. ISSN 1815–9400.
4. Тимухина Е. Н., Колокольников В. С., Кашеева Н. В. Определение рациональной инфраструктуры железнодорожных станций для пропуска тяжёловесных поездов // Транспорт: наука, техника, управление. 2017. № 7. С. 32–36. ISSN 0236–1914.
5. Модель проверяет скорость / П. А. Козлов, В. С. Колокольников, Е. Н. Тимухина, Н. А. Тушин // Железнодорожный транспорт. 2017. № 3. С. 42–44. ISSN 0044–4448.
6. Modeling of large railway polygons / Ye. Timukhina, P. Kozlov, V. Kolokolnikov, N. Tushin // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 216. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201821602025>.

## References

1. Organization of service on railway transport [Organizatsiya dvizheniya na zheleznodorozhnom transporte] / D. P. Zaglyadimov, L. P. Petrov, E. S. Sergeev, V. A. Buyanov : textbook. Moscow : Transport, 1978. 552 p.
2. Levin D. Yu. System train management on railway transport [Sistemnoe upravlenie perevozochnym protsessom na zheleznodorozhnom transporte]. Moscow : Infra-M, 2018. 313 p.
3. Kozlov P. A., Kolokolnikov V. S. Structural functional optimization of large railway testing grounds [Strukturno-funktsional'naya optimizatsiya bol'shikh poligonov zheleznodorozhnogo transporta] // Transport of the Urals. 2018. No. 3 (58). Pp. 3–7. DOI: 10.20291/1815-9400-2018-3-3-7. ISSN 1815–9400.
4. Timukhina E. N., Kolokolnikov V. S., Kasheeva N. V. Definition of a rational infrastructure of railway stations for handling heavy-tonnage trains [Opredelenie ratsional'noy infrastruktury zheleznodorozhnykh stantsiy dlya propuska tyazhelovesnykh poezdov] // Transport: science, equipment, management. 2017. No. 7. Pp. 32–36. ISSN 0236–1914.
5. Model verifies speed [Model' proveryaet skorost'] / P. A. Kozlov, V. S. Kolokolnikov, E. N. Timukhina, N. A. Tushin // Railway Transport. 2017. No. 3. Pp. 42–44. ISSN 0044–4448.
6. Modeling of large railway polygons / Ye. Timukhina, P. Kozlov, V. Kolokolnikov, N. Tushin // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 216. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201821602025>.

УДК 656.212.5

Константин Ильич Корниенко, преподаватель кафедры «Управление эксплуатационной работой» Сибирского государственного университета путей сообщения (СГУПС), Новосибирск, Россия

## ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ВЕЛИЧИНЫ И ДЛИНЫ ПРОТИВОУКЛОНА В КОНЦЕ ПУТИ СОРТИРОВОЧНОГО ПАРКА НА КАЧЕСТВО ЕГО ЗАПОЛНЕНИЯ ПРИ РАСФОРМИРОВАНИИ СОСТАВОВ

Konstantin Ilyich Kornienko, Lecturer, Operations Management Department, Siberian Transport University (STU), Novosibirsk, Russia

### Influence of sorting track opposite elevation length and incline change on it's occupancy quality during the process of breaking-up

#### Аннотация

Сортировочный парк оказывает большое влияние на перерабатывающую способность сортировочной горки. Во время эксплуатации профили его путей изменяются под действием множества факторов. Исследования показывают, что вследствие отклонения профиля от нормативных значений происходит снижение качества заполнения путей при расформировании составов, т.е. возрастают вероятность соударения вагонов и вероятность недоката отцепов до передвигающихся вагонов. Поскольку приведение уклонов к проектным значениям требует больших капитальных и временных затрат, актуальной становится задача, связанная с расчетом эффективности выправки профиля. В статье исследуется влияние изменения противоположного уклона в конце пути на качество его заполнения. На основании полученных результатов сделан вывод, что качество заполнения пути сортировочного парка зависит не только от длины, но и в большей степени от величины противоположного уклона.

**Ключевые слова:** имитационное моделирование, сортировочный парк, сортировочная горка, качество заполнения путей, реверсное движение.

#### Summary

Sorting yard have a great influence on hump capacity. Grading of sorting tracks are changing during operation due to a variety of factors. Studies show, that the deviation of grading from the standard values leads to a decrease in the occupancy quality, namely to an increase of cars collision probability (with exceeding the permissible speed of collision), as well as to an increase in size of intervals between cuts. Adjusting of grading to standard values requires high capital expenditures and is time-consuming. Therefore, today the actual task is to calculate the grading adjusting efficiency. The paper examines the effect of opposite elevation change on the track occupancy quality. As a result of the study, the track occupancy quality is influenced not only by the length, but to a greater extent by the incline of the opposite elevation.

**Keywords:** simulation modeling, sorting yard, hump, occupancy quality, reverse movement.

DOI: 10.20291/1815-9400-2019-1-66-70

Сортировка вагонов — один из важнейших элементов перевозочного процесса [1]. Для этой операции используются сортировочные горки различной мощности. Так как от правильной работы сортировочных устройств зависит время доставки грузов потребителям, то совершенствованию проектирования горок уделяется постоянное внимание [2].

Исследования последних десятилетий посвящены в основном надвигной и спускной частям горки [3–9]. Это обусловлено тем, что, согласно правилам и нормам проектирования, сортировочная горка рассматривается только до расчетной точки, находящейся на расстоянии 50 м от последней стрелки [10, 11]. В то же время на качество работы сортировочной системы большое влияние оказывает сортировочный парк [12, 13]. Публикации, посвященные оценке качества заполнения путей сортировочного парка, также во многом связаны со спускной частью. Например, в [14–16] оценивается влияние горба горки на качество заполнения путей. Можно также отметить работу [17], в которой рассматривается зависимость качества разделения отцепов на стрелках от качества заполнения путей сортировочного парка. В ней сделан вывод, что высокое качество разделения отцепов на стрелках возможно только при увеличении скорости роспуска составов и движении вагонов по стрелочной зоне с высокой скоростью. Это, в свою очередь, приводит к тому, что отцепы выходят на парковую тормозную позицию с высокой скоростью движения, а следовательно, увеличивается вероятность соударения вагонов в сортировочном парке с превышением скорости соударения.

Последние исследования показывают, что на многих сортировочных горках уклоны сортировочного парка не содержатся в проектных значениях [18]. Это связано с тем, что профиль пути изменяется во время эксплуатации под воздействием множества факторов. Изменение уклонов сортировочных путей приводит к снижению качества их заполнения. На выправку профиля путей и приведение уклонов до проектных значений требуются значительные капитальные вложения.

Поэтому на сегодняшний день актуальной становится задача по оценке эффективности выправки.

Целью настоящей статьи является изучение влияния изменения противоуклона в конце пути сортировочного парка на качество заполнения путей. Исследование проводилось с помощью имитационной модели заполнения путей сортировочного парка «СортПарк 2» [19–23]. Структура вагоно- и отцепопотока задавалась случайным распределением. Длина пути была выбрана равной 1000 м. Уклоны соответствовали нормативным значениям.

Первая серия экспериментов заключалась в оценке влияния изменения точки начала противоуклона при неизменной величине уклона. Точка начала противоуклона сдвигалась с 700 до 900 м\* с шагом в 10 м. Величина противоуклона во всех экспериментах не изменялась и была равна  $-2\text{‰}$ , вследствие чего уровень головки рельса в конце пути опускался. При точке начала противоуклона в 700 м он отличался от нормативного уровня более чем на 0,5 м.

Во второй серии экспериментов уровень головки рельса в конце противоуклона оставался неизменным. Следовательно, при сдвиге точки начала противоуклона его величина изменялась и при начале противоуклона 700 м составляла  $-0,27\text{‰}$ .

На рис. 1 представлены профили путей для обеих серий экспериментов при точке начала противоуклона в 700 м и нормативном профиле пути.

Высокое качество заполнения путей сортировочного парка должно определяться двумя факторами:

- минимизацией окон между отцепами;
- соударением отцепов с допустимой скоростью.

Одним из способов оценки величины окон между отцепами является коэффициент качества заполнения пути [23]. В общем виде он показывает использование полезной длины сортировочного пути между осаживаниями и, согласно нормативам, должен находиться в пределах 0,8–1. Чем выше этот коэффициент, тем меньше средняя величина окон между отцепами.

Как видно из рис. 2, при изменении точки начала противоуклона средний коэффициент качества заполнения пути растет. Следовательно, при точке начала противоуклона в 700 м полезная длина пути будет использоваться не в полной мере. При этом увеличение коэффициента в первой серии экспериментов происходит с большей скоростью, чем во второй. То есть на средний коэффициент качества заполнения путей сортировочного парка будет оказывать влияние не только длина, но и в большей мере величина противоуклона.

Так как полезная длина пути будет расходоваться более рационально, то для накопления одного состава потребуется меньшее количество осаживаний. Рис. 3 подтверждает, что при изменении точки начала противоуклона среднее количество осаживаний снижается. Также по рис. 3 видно, что на среднее количество осаживаний влияет величина противоуклона. Следовательно, при рассмотрении вопроса выправки профиля пути необходимо обращать внимание не только на длину противоуклона, но и на его величину.

\*Нормативное значение точки начала противоуклона для пути длиной 1000 м составляет 900 м [10].

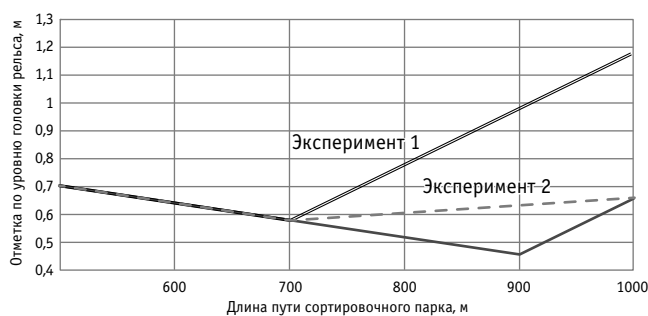


Рис. 1. Профили путей для обеих серий экспериментов

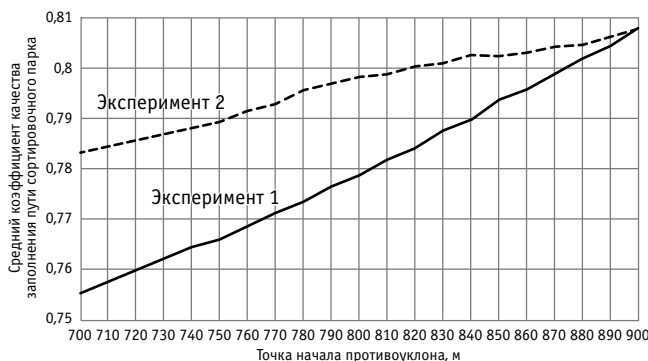


Рис. 2. Зависимость среднего коэффициента качества заполнения пути сортировочного парка от точки начала противоуклона

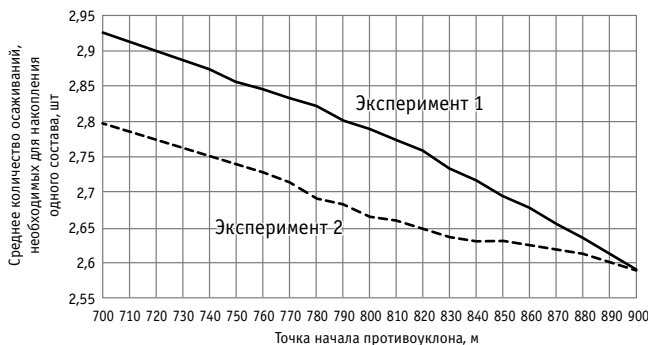
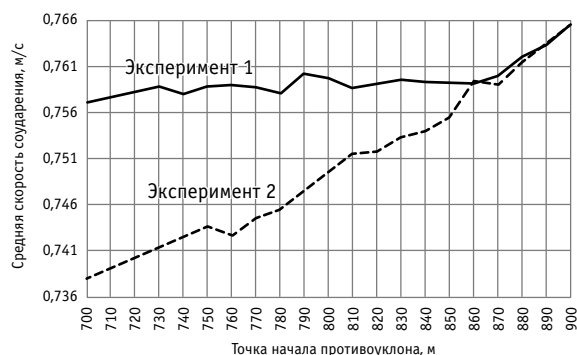


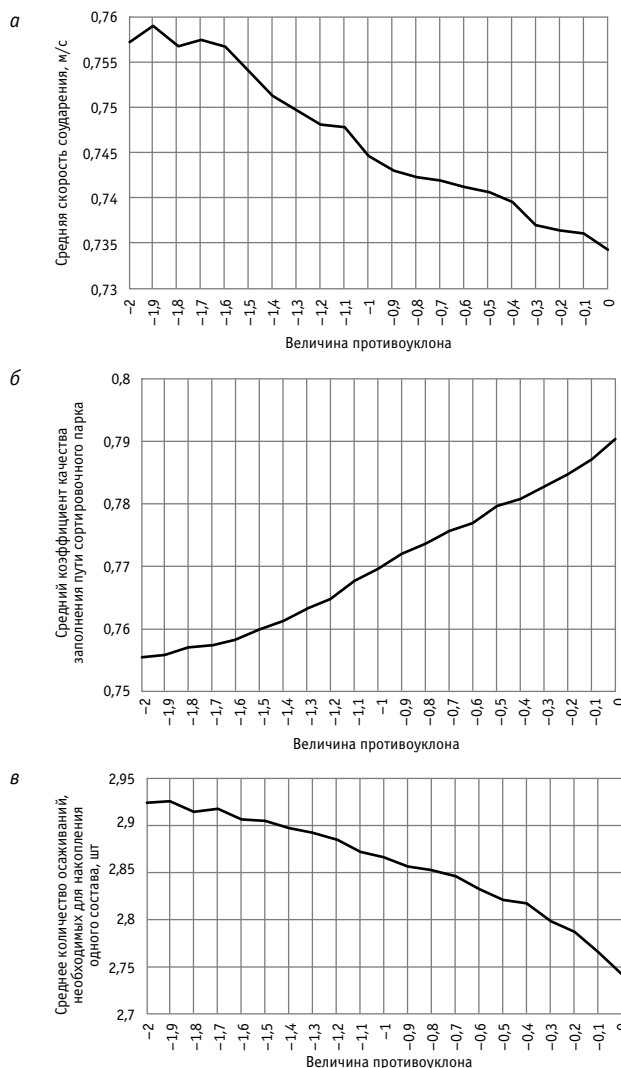
Рис. 3. Зависимость среднего количества осаживаний, необходимых для накопления одного состава от точки начала противоуклона

При дифференцировании полученных на рис. 3 зависимостей можно сделать вывод, что приращение значений отличается. Максимальное приращение будет на интервале 800–900 м. Для первого эксперимента разница между точками составляет в среднем 0,02, для второго эксперимента 0,01. Выправка профиля в данном интервале имеет максимальный эффект для первого эксперимента: при смещении точки противоуклона с 700 на 800 м среднее количество осаживаний сократится на 0,13, а в интервале 800–900 м — примерно на 0,2. Для второго эксперимента оба значения составляют 0,07.

На рис. 4 представлена зависимость средней скорости соударения отцепов в зависимости от точки начала противоуклона.



**Рис. 4. Зависимость средней скорости соударения отцепов от точки начала противоуклона**



**Рис. 5. Зависимость средней скорости соударения (а), среднего коэффициента качества заполнения путей (б) и среднего количества осаживаний, необходимых для накопления одного состава (в), от величины противоуклона**

Из рис. 4 видно, что для первого эксперимента средняя скорость практически не изменяется на всей области. Это связано с тем, что при неизменной величине противоуклона изменение точки начала противоуклона приведет к изменению средней точки полной остановки отцепа при первом роспуске на путь, следовательно, основное накопление отцепов производится на уклоне. Во втором эксперименте средняя скорость соударения увеличивается, так как значение противоуклона изменяется от 0,08 до  $-2,00$ , что приведет не к такому сильному изменению точки полной остановки и к снижению средней скорости соударения.

В [11] приведена формула для определения количества поврежденных вагонов исходя из средней скорости соударения. Подстановка в эту формулу значений средней скорости показывает, что количество поврежденных вагонов в первом эксперименте не изменяется, а во втором непрерывно увеличивается.

Из рис. 2–4 можно сделать общий вывод о том, что эффективность выправки профиля пути зависит от величины противоуклона. Для дальнейшего исследования был проведен эксперимент на пути с длиной противоуклона 300 м. В этом эксперименте значение противоуклона изменялось от  $-2$  до 0. Полученные результаты представлены на рис. 5.

Таким образом, из рис. 5 следует, что эффективность выправки противоуклона в конце сортировочного пути зависит от величины противоуклона.

## ВЫВОДЫ

Выполненное исследование позволяет утверждать, что длина и величина противоуклона в конце пути сортировочного парка значительно влияют на качество заполнения пути.

Увеличение длины противоуклона приводит к снижению коэффициента качества заполнения пути и, как следствие, к увеличению среднего количества осаживаний, необходимых для накопления одного состава. Степень этого влияния, в свою очередь, зависит от величины противоуклона. Чем больше эта величина, тем выше степень влияния и ниже качество заполнения пути.

Средняя скорость соударения отцепов в значительной степени определяется величиной противоуклона. При больших значениях противоуклона средняя скорость соударения отцепов не зависит от точки начала противоуклона. Снижение величины противоуклона приводит к снижению средней скорости соударения отцепов. В то же время величина противоуклона должна обеспечивать остановку первого отцепа на пути. При снижении величины противоуклона это условие может не соблюдаться. Определение оптимальной величины и длины противоуклона требует дальнейших исследований.

Приведение противоуклона к нормативным значениям повысит качество заполнения пути: количество осаживаний, необходимых для накопления одного поезда, уменьшится, а средний коэффициент качества заполнения пути увеличится. В целом это повлияет на повышение перерабатывающей способности сортировочной горки.

## Литература

1. Казанцева Л. С., Югина О. П. Нормирование сроков доставки грузов и технология перевозочного процесса // Бюллетень транспортной информации. 2015. № 6 (240). С. 29–33. ISSN 2072–8115.
2. Проектирование инфраструктуры железнодорожного транспорта (станции, железнодорожные и транспортные узлы) : учеб. / Н. В. Правдин, С. П. Вакуленко, А. К. Головнич и др. М. : УМЦ ЖДТ, 2012. 1086 с.
3. Prokop J., Myojin Sh. Design of hump profile in railroad classification yard // Memoirs of the Faculty of Engineering. 1993. Vol. 27. No. 2. Pp. 41–58.
4. Бессоненко С. А. Вероятностный подход к расчету сортировочных горок // Транспорт: наука, техника, управление. 2010. № 3. С. 23–25. ISSN 0236–1914.
5. Бессоненко С. А. Расчет скорости отцепов и мощности тормозных позиций сортировочной горки с использованием вероятностных показателей // Транспорт: наука, техника, управление. 2006. № 5. С. 11–16. ISSN 0236–1914.
6. Осипов Д. В. К вопросу определения продольных динамических нагрузок, действующих на отцепы при соударениях на сортировочных горках // Транспортная инфраструктура Сибирского региона : матер. Девятой Междунар. науч.-практ. конф. Иркутск : ИргУПС, 2018. Т. 1. С. 107–112.
7. Управление скоростью скатывания отцепов при уменьшении тормозной мощности замедлителей / Д. М. Козаченко, В. И. Бобровский, С. В. Гревцов, М. И. Березовый // Наука та прогрес транспорту. 2016. № 3 (63). С. 28–40. ISSN 2307–3489.
8. Правдин Н. В., Бессоненко С. А. Определение уклонов скоростных участков и тормозных позиций на спускной части сортировочной горки // Транспорт: наука, техника, управление. 2008. № 9. С. 6–10. ISSN 0236–1914.
9. Avramović Z. Ž. Method for evaluating the strength of retarding steps on a marshalling yard hump // European Journal of Operational Research. 1995. Vol. 85. No. 3. P. 504–514.
10. Правила и нормы проектирования сортировочных устройств на железных дорогах колеи 1520 мм. М. : Техинформ, 2003. 168 с.
11. Пособие по применению правил и норм проектирования сортировочных устройств / Ю. А. Муха, Л. Б. Тишков, В. П. Шейкин и др. М. : Транспорт, 1994. 220 с.
12. Исследование влияния профиля горки на скорость движения отцепов в сортировочном парке при попутном ветре / Е. А. Ахмаев, С. А. Бессоненко, В. В. Борисов, К. И. Корниенко // Вестник СГУПС. 2017. № 1 (40). С. 13–18. ISSN 1815–9265.
13. Исследование движения отцепа в сортировочном парке / Е. А. Ахмаев, С. А. Бессоненко, В. В. Борисов, К. И. Корниенко // Транспорт Урала. 2017. № 4 (55). С. 49–53. DOI: 10.20291/1815-9400-2017-4-49-53. ISSN 1815–9400.
14. Карасев С. В. Влияние конструкции горки, структуры вагонопотока и внешней среды на качество заполнения путей сортировочного парка : дис. ... канд. техн. наук. Новосибирск, 2003. 203 с.
15. Жуков В. И., Карасев С. В., Куценко О. В. Имитация процесса заполнения пути накопления вагонов в сортировочном парке // Совершенствование эксплуатационной работы железных дорог. Новосибирск, 2002. С. 119–129.

## References

1. Kazantseva L. S., Yugina O. P. Rationing of freight delivery time and technology of railway transportation [Normirovanie srokov dostavki грузов i tekhnologiya perevozhnogo protsessa] // Bulletin of Transport Information. 2015. No. 6 (240). Pp. 29–33. ISSN 2072–8115.
2. Railway transport infrastructure design (stations, railway and transport junctions) [Proektirovanie infrastruktury zheleznodorozhnogo transporta (stantsii, zheleznodorozhnye i transportnye uzly)] : textbook / N. V. Pravdin, S. P. Vakulenko, A. K. Golovnich, et al. Moscow : UMTs ZhDT, 2012. 1086 p.
3. Prokop J., Myojin Sh. Design of hump profile in railroad classification yard // Memoirs of the Faculty of Engineering. 1993. Vol. 27. No. 2. Pp. 41–58.
4. Bessonenko S. A. Probabilistic approach to the calculation of sorting humps [Veroyatnostnyy podkhod k raschetu sortirovochnykh gorok] // Transport: science, equipment, management. 2010. No 3. Pp. 23–25. ISSN 0236–1914.
5. Bessonenko S. A. Calculation of cut speed and hump retarder positions power using probabilistic indicators [Raschet skorosti ottsepov i moshhnosti tormoznykh pozitsiy sortirovochnoy gorki s ispol'zovaniem veroyatnostnykh pokazateley] // Transport: science, equipment, management. 2006. No. 5. Pp. 11–16. ISSN 0236–1914.
6. Osipov D. V. On the determination of longitudinal dynamic loads affecting the cuts when they collide on humps [K voprosu opredeleniya prodol'nykh dinamicheskikh nagruzok, deystvuyushchikh na ottsepy pri soudareniyakh na sortirovochnykh gorkakh] // Transport infrastructure of the Siberian Region : materials of the 9<sup>th</sup> International scientific and practical conference. Irkutsk : ISTU, 2018. Vol. 1. Pp. 107–112.
7. Controlling the speed of rolling cuts in conditions of reduction of brake power of car retarders [Upravlenie skorost'yu skatyvaniya ottsepov pri umen'shenii tormoznoy moshhnosti zamedliteley] / D. M. Kozachenko, V. I. Bobrovskiy, S. V. Grevtsov, M. I. Berezoviy // Science and Transport Progress. 2016. No. 3 (63). Pp. 28–40. ISSN 2307–3489.
8. Pravdin N. V., Bessonenko S. A. Determination of speed sections and retarder positions inclines on descending part of hump [Opredelenie uklonov skorostnykh uchastkov i tormoznykh pozitsiy na spusknoy chasti sortirovochnoy gorki] // Transport: science, equipment, management. 2008. No. 9. Pp. 6–10. ISSN 0236–1914.
9. Avramović Z. Ž. Method for evaluating the strength of retarding steps on a marshalling yard hump // European Journal of Operational Research. 1995. Vol. 85. No. 3. P. 504–514.
10. Rules and regulations for design of sorting devices on 1520 mm railways tracks [Pravila i normy proektirovaniya sortirovochnykh ustroystv na zheleznykh dorogakh kolei 1520 mm]. M. : Tekhinform, 2003. 168 p.
11. Manual on the application of rules and norms for the design of sorting devices [Posobie po primeneniyu pravil i norm proektirovaniya sortirovochnykh ustroystv] / Yu. A. Mukha, L. B. Tishkov, V. P. Sheykin, et al. M. : Transport, 1994. 220 p.
12. The impact of the falling gradient of classification tracks on the car speed under favoring wind [Issledovanie vliyaniya profilya gorki na skorost' dvizheniya ottsepov v sortirovochnom parke pri poputnom vetre] / E. A. Akhmaev, S. A. Bessonenko, V. V. Borisov, K. I. Kornienko // The Siberian Transport University Bulletin. 2017. No. 1 (40). Pp. 13–18. ISSN 1815–9265.
13. Investigation of car movement in a sorting park [Issledovanie dvizheniya ottsepa v sortirovochnom parke] / E. A. Akhmaev, S. A. Bessonenko, V. V. Borisov, K. I. Kornienko // Transport of the Urals. 2017. No. 4 (55). Pp. 49–53. DOI: 10.20291/1815-9400-2017-4-49-53. ISSN 1815–9400.
14. Karasev S. V. Influence of hump construction, car traffic formation and the external environment on the quality of filling the tracks of the classification yard [Vliyanie konstruktssii gorki, struktury vagonopotoka i vneshney sredy na kachestvo zapolneniya putey sortirovochnogo parka] : PhD in Engineering Thesis. Novosibirsk, 2003. 203 p.
15. Zhukov V. I., Karasev S. V., Kutsenko O. V. Simulation of the process of filling the way of accumulation of cars in the sorting park [Imitatsiya protsessa zapolneniya puti nakopleniya vagonov v sortirovochnom parke] // Improvement of the railway operation. Novosibirsk, 2002. Pp. 119–129.

16. Карасев С. В. Исследование совместного влияния высоты сортировочной горки, структуры состава и ветровых условий на заполнение пути накопления вагонов в сортировочном парке : матер. науч.-техн. конф. «Наука и молодежь XXI века». Новосибирск, 2002. С. 8–11.
17. Назаров А. А. Снижение скорости отцепов в начале сортировочных путей, оснащенных системой распределенного регулирования скорости // Наука та прогрес транспорту. 2016. № 4 (64). С. 47–54. ISSN 2307–3489.
18. Старостина Т. И. Анализ особенностей конструкции продольного профиля сортировочных путей действующих сортировочных станций // Инновационные технологии нового тысячелетия : сб. статей Междунар. науч.-практ. конф. Ч. 2. Уфа : Аэтерна, 2016. С. 81–83.
19. Корниенко К. И. Совершенствование методики имитационного моделирования заполнения пути сортировочного парка // Транспорт Урала. 2018. № 2 (57). С. 35–42. DOI: 10.20291/1815-9400-2018-2-35-42. ISSN 1815–9400.
20. Корниенко К. И. Программа для имитационного моделирования скорости движения отцепа в сортировочном парке «Сорт-Парк» // Хроники объединенного фонда электронных ресурсов «Наука и образование». 2017. № 6 (97). С. 54.
21. Корниенко К. И. Исследование влияния изменения профиля пути сортировочного парка на качество его заполнения при расформировании составов // Вестник УрГУПС. 2018. № 3 (39). С. 33–42. DOI: 10.20291/2079-0392-2018-3-33-42. ISSN 2079–0392.
22. Kornienko K., Bessonenko S. Effect of the sorting track profile change on the it's occupancy quality at train humping // MATEC Web Conf. 2018. Vol. 216. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201821602012>.
23. Bessonenko S., Kornienko K., Tanaino I. Influence of opposite elevation on the occupancy level of the tracks of sorting park // MATEC Web Conf. 2018. Vol. 239. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201823903002>.
16. Karasev S. V. Research of the joint influence of the hump height, car composition and wind conditions of filling the track in the classification yard [Issledovanie sovmestnogo vliyaniya vyсотy sortirovochnoy gorki, struktury sostava i vetrovykh usloviy na zapolnenie puti nakopleniya vagonov v sortirovochnom parke] : materials of scientific and technical conference «Science and youth of the XXI century». Novosibirsk, 2002. Pp. 8–11.
17. Nazarov A. A. Reduction in cuts speed at the beginning of a sorting sidings, equipped with quasi-continuous speed control system [Snizhenie skorosti ottsepov v nachale sortirovochnykh putey, osnashennykh sistemoy raspredelennogo regulirovaniya skorosti] // Science and Transport Progress. 2016. No. 4 (64). Pp. 47–54. ISSN 2307–3489.
18. Starostina T. I. Analysis of the structural features of the longitudinal profile of the sorting ways of the existing sorting stations [Analiz osobennostey konstruktssii prodol'nogo profilya sortirovochnykh putey deystvuyuschikh sortirovochnykh stantsiy] // Innovative technologies of the new Millennium : proceedings of International scientific and practical conference. Part 2. Ufa : Aeterna, 2016. Pp. 81–83.
19. Kornienko K. I. Improvement of simulation modeling of classification tracks filling [Sovershenstvovanie metodiki imitatsionnogo modelirovaniya zapolneniya puti sortirovochnogo parka] // Transport of the Urals. 2018. No. 2 (57). Pp. 35–42. DOI: 10.20291/1815-9400-2018-2-35-42. ISSN 1815–9400.
20. Kornienko K. I. Program for simulation modeling of cut speed in sorting yard «SortPark» [Programma dlya imitatsionnogo modelirovaniya skorosti dvizheniya ottsepa v sortirovochnom parke «SortPark»] // Chronicles of the electronic resources united fund «Science and education». 2017. No. 6 (97). P. 54.
21. Kornienko K. I. Studying the impact of changes in the sorting yard track profile on its filling while trains splitting [Issledovanie vliyaniya izmeneniya profilya puti sortirovochnogo parka na kachestvo ego zapolneniya pri rasformirovaniy sostavov] // Herald of USURT. 2018. No. 3 (39). Pp. 33–42. DOI: 10.20291/2079-0392-2018-3-33-42. ISSN 2079–0392.
22. Kornienko K., Bessonenko S. Effect of the sorting track profile change on the it's occupancy quality at train humping // MATEC Web Conferences. 2018. Vol. 216. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201821602012>.
23. Bessonenko S., Kornienko K., Tanaino I. Influence of opposite elevation on the occupancy level of the tracks of sorting park // MATEC Web Conf. 2018. Vol. 239. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201823903002>.

Объем статьи 0,67 авторских листа



УДК 625.012

Андрей Владимирович Петряев, кандидат технических наук, старший научный сотрудник кафедры «Строительство дорог транспортного комплекса» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС), Санкт-Петербург, Россия

## НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА, АРМИРОВАННОГО ГЕОСИНТЕТИЧЕСКИМИ МАТЕРИАЛАМИ

Andrey Vladimirovich Petryaev, PhD in Engineering, Senior Researcher, Transport Complex Roads Construction Department, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (PSTU), St. Petersburg, Russia

### Carrying capacity of railway formation armoured by geosynthetic materials

#### Аннотация

В статье рассмотрены модельные испытания, проведенные в целях изучения возможности и оценки эффективности использования ряда конструктивных решений с геосинтетическими материалами для повышения несущей способности и снижения деформируемости земляного полотна. Для исследования напряженно-деформированного поведения насыпи, армированной в верхней части геосинтетическими материалами, испытана маломасштабная модель земляного полотна.

Результаты экспериментальных исследований показали, что несущая способность земляного полотна улучшалась за счет армирования. Установлено, что наличие в грунте геосинтетического материала, воспринимающего деформацию при растяжении, препятствует образованию сплошных поверхностей скольжения и тем самым повышает его прочность на сдвиг.

**Ключевые слова:** геосинтетический материал, земляное полотно, армирование, модель, георешетка.

#### Summary

The paper describes the model tests carried out in order to study the possibility and evaluate the effectiveness of using a set of design solutions with geosynthetic materials in order to improve the carrying capacity and reduce the deformability of the formation. To study the stress-strain behavior of the embankment armoured in the upper part with geosynthetic materials, the author tested a small-scale model of the formation.

The results of experimental studies showed that the carrying capacity of the formation was improved due to armouring. As a result, it is established that the presence in the soil of geosynthetic material that perceives the deformation under tension prevents the formation of continuous sliding surfaces and thereby increases its shear strength.

**Keywords:** geosynthetic material, formation, armouring, model, geogrid.

DOI: 10.20291/1815-9400-2019-1-71-75

Современные геосинтетические материалы используются на железных дорогах всех европейских стран при строительстве и реконструкции путевых сооружений различного назначения. Общая особенность реконструкции существующих и строительства новых железных дорог — необходимость в качественном основании пути. В связи с этим геосинтетические материалы могут сыграть важную роль, например, для улучшения несущей способности земляного полотна, а также для увеличения срока службы путевой структуры в целом.

К числу методов, которые используются при оценке различных проектных решений по усилению земляного полотна, относится маломасштабное моделирование. Даже приблизительное удовлетворение требований теории подобия в модели позволяет получить очень ценные данные, охватывающие качественную сторону изучаемых явлений и раскрывающие механизмы изучаемых процессов. Полученные на моделях результаты могут быть использованы для количественной оценки напряженно-деформированного состояния земляного полотна.

Например, при модельных испытаниях, рассмотренных в работе [1], было достигнуто существенное повышение несущей способности и уменьшение уклона прилегающих фундаментов при армировании песка георешеткой. Штамповые испытания песчаного основания [2] позволили установить, что несущая способность может быть значительно увеличена за счет усиления зоны, расположенной непосредственно под фундаментом, короткими полотнищами из геосинтетического материала шириной, равной ширине фундамента. При этом усиленная зона грунта вела себя как часть глубокого фундамента. Штамповые испытания на грунте-аналоге из керамического материала показали, что использование георешетки повышает жесткость почвенного слоя и его несущую способность [3].

Как следует из результатов экспериментальных исследований, несущая способность грунта улучшалась за счет армирования, а эффект улучшения существенно зависел от глубины, на которой располагались армирующие элементы.

В инженерной практике рекомендуется, чтобы расстояние от подошвы фундамента до верхнего слоя геосинтетического



материала и расстояния между ее слоями были от 0,2 до 0,4 ширины фундамента ( $B$ ). Общая глубина залегания геосинтетических материалов под фундаментом должна составлять от 1,4 до 1,6  $B$ , а длина армированных элементов — от 4 до 6  $B$  [4].

По результатам испытаний, представленных в [3], при укладке георешетки на глубину от 0,065 до 0,5 ширины штампа несущая способность основания увеличивается.

Испытания штампом для определения несущей способности песчаного основания [5] позволили сделать вывод, что ее максимальное увеличение получено при соотношении глубины укладки георешетки к ширине штампа менее единицы. Армирование под ленточным фундаментом на глубине, более чем в 2,25 раза превышающей ширину фундамента, не способствовало повышению несущей способности основания.

Проведенные испытания песчаного основания, армированного тканым геотекстилем, позволили получить зависимость модуля упругости основания и его несущей способности от количества армирующих слоев, расположенных на глубине 0,25, 1 и 2 диаметра штампа [6]. По результатам этих исследований можно сделать вывод, что укладка дополнительных слоев георешетки на глубину, превышающую диаметр штампа, не приводит к значительному увеличению модуля упругости основания и его несущей способности. Кроме того, по мере увеличения расстояния между слоями арматуры ее эффективность снижается.

Использование при штамповых испытаниях смеси алюминиевых стержней в качестве подобия песчаного основания [7] показало, что на эффект армирования больше влияют ширина геосинтетических материалов и количество слоев, чем их жесткость. Для практического применения укладка геосинтетических материалов в два слоя достаточна, так как большая несущая способность достигается при меньшей деформации. Также установлено, что поверхности скольжения армированных фундаментов с увеличением ширины уложенного геосинтетического материала распространяются больше в горизонтальном направлении, чем в вертикальном. Такое увеличение

длины поверхности скольжения не может быть вызвано жесткостью геосинтетического материала.

Для достижения сходства модели и железнодорожного полотна необходимо учитывать большое количество параметров (конструкцию подвижного состава, верхнего строения пути, земляного полотна, упругие и пластические свойства материалов, характеристики грунтов земляного полотна и др.). При переходе к моделям невозможно сохранить числовые значения всех критериев подобия. Однако правильное представление о поведении земляного полотна можно получить и в тех случаях, когда удовлетворяется только часть критериев подобия.

В настоящее время крайне сложно и для инженерной практики нецелесообразно в точности смоделировать такой процесс. Достаточно создать модель, которая будет учитывать основные условия грунта в земляном полотне. В наших экспериментах основное внимание уделялось моделированию деформированного состояния под действием статических нагрузок.

Одним из самых ранних методов моделирования земляного полотна является маломасштабное моделирование. При помощи этого метода можно внести существенные дополнения в расчеты. Во мно-

гих случаях он позволяет решать сложные вопросы, которые пока не поддаются изучению ни аналитически, ни полевыми наблюдениями.

Выбор масштаба модели обусловлен прежде всего технологическими особенностями изготовления элементов модели. Когда масштаб моделей близок к натуральному значению, моделирование связано с высокими материальными затратами. При очень малых масштабах могут быть значительные различия между механическими характеристиками модели и оригиналом, и на этой модели сложно установить измерительное оборудование, что может привести к большим погрешностям.

Модельные испытания проводились в большом испытательном лотке лаборатории механики грунтов ПГУПС. Лоток представляет собой железобетонный резервуар с размерами 300×400 см и глубиной 203 см.

В качестве грунта для проведения модельных испытаний использовался мелкий песок (табл. 1). Это позволило снизить влияние величины частиц грунта на результаты испытаний модели малых размеров и оценить влияние прочностных характеристик грунта на несущую способность модели насыпи. Характеристики грунтов модели приведены в табл. 2.

Таблица 1

Гранулометрический состав грунта

Размер частиц, мм	>10	10–5	5–2	2–1	1–0,5	0,5–0,25	0,25–0,1	<0,1
Содержание частиц, %	0,09	0,73	3,13	9,41	15,02	40,67	16,84	14,11

Таблица 2

Свойства грунта

Характеристики	Средние значения характеристик по глубине $H$ , см		
	0–50	75	100–125
Плотность грунта, кН/м <sup>3</sup>	1,667	1,652	1,982
Плотность сухого грунта, кН/м <sup>3</sup>	1,624	1,535	1,748
Влажность природная, %	3,26	7,6	13,39
Коэффициент пористости	0,65	0,76	0,63
Удельное сцепление, кПа	3		
Угол внутреннего трения, °	36		
Модуль деформации, МПа	38		

Заполнение лотка песком осуществлялось до уровня 1,0 м. Модель земляного полотна была сформирована по специальному шаблону с механическим уплотнением. Лоток оснащен системой металлических балок, которые позволяют передавать нагрузку на модель до 500 кН.

Модели земляного полотна испытывались в масштабе 1:19. Модель нагружалась гидравлическим домкратом ДГ-100-2 мощностью 1000 кН. Величина нагрузки, которая передавалась на модель насыпи, фиксировалась с помощью динамометра ДС-5, рассчитанного на максимальную силу 50 кН. Динамометр дублировался манометром на домкрате для повышения надежности измерения испытательной нагрузки.

Деревянный брус с размерами 150×16×10 см (площадь штампа 0,24 м<sup>2</sup>) был принят как модель верхнего строения пути и был усилен 4 металлическими уголками (45×45 мм) для защиты от расщепления. Модель насыпи выполнена шириной 18 см поверху и крутизной откосов 1:1,25. Высота модели земляного полотна осталась неизменной — 60 см.

Металлическая пластина размером 450×350×25 мм была размещена под домкратом для обеспечения его устойчивости на брус. Горизонтальное положение бруса проверялось с помощью уровня. Деформация штампа измерялась 4 деформометрами системы Максимова с ценой деления 0,1 мм.

Для обеспечения строго вертикальной передачи нагрузки в центр модели помещался металлический шарик диаметром 8 мм. Вертикальное положение домкрата во время установки и эксперимента контролировалось отвесом.

Установка для испытания модели представлена на рис. 1.

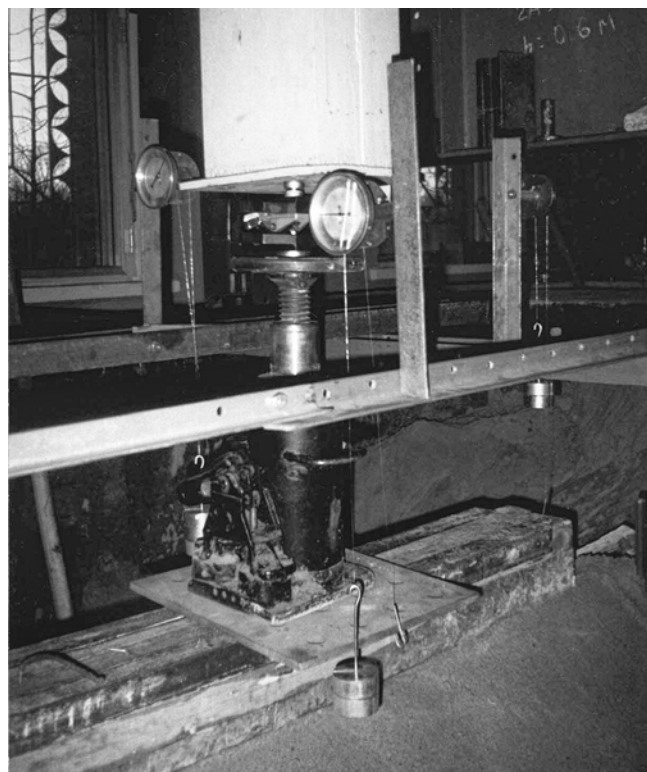


Рис. 1. Общий вид грунтового лотка

Геосинтетические материалы укладывались на разной глубине (10–40 см) в один или два слоя, с послойным уплотнением или без него. Уплотнение производилось методом ручной электрической трамбовки (методом от откосов к середине). Некоторые характеристики используемых геосинтетических материалов приведены в табл. 3.

Таблица 3

#### Основные характеристики геосинтетических материалов

Характеристики	Тип 1	Тип 2	Тип 3
Вид	Геоячейка	Двухосная георешетка	Двухосная георешетка
Вид полимера	Полиэтилен	Полипропилен	Полиэстер
Размер ячейки, мм	200	39	50
Усилие при 5 %-й деформации, кН/м		21/21	28/28
Максимальное растягивающее усилие, кН/м	29/29	30/30	80/80
Удлинение при разрыве, %	25	12	13

Схемы армирования земляного полотна, исследованные в наших экспериментах, представлены на рис. 2 и 3.

В ходе маломасштабных модельных исследований проведено несколько экспериментальных серий. В первой изучены деформационные свойства модели насыпи без армирования, в последующих — деформационные свойства моделей, усиленных геосинтетическими материалами в верхней части насыпи.

Вес модели верхнего строения пути и системы нагружения учитывались при определении давления на первом этапе нагрузки. Загрузка модели земляного полотна осуществлялась до ее разрушения. Насыпь считалась разрушенной, когда деформация происходила с провалом грунтового массива во все стороны модели или со смещением грунтовой массы в сторону наименьшего сопротивления (в сторону одного из откосов).

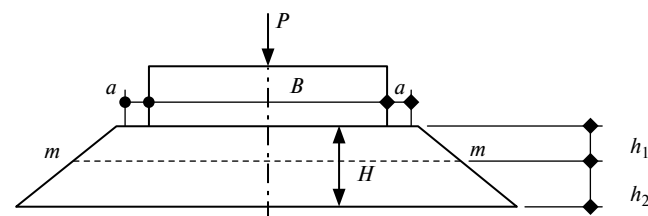


Рис. 2. Модель с одним слоем геосинтетического материала:  
 $m = 1:1,25$ ;  $B = 16$  см;  $a = 1$  см;  $H = 60$  см;  $h_1 = 25$  см;  $h_2 = 35$  см

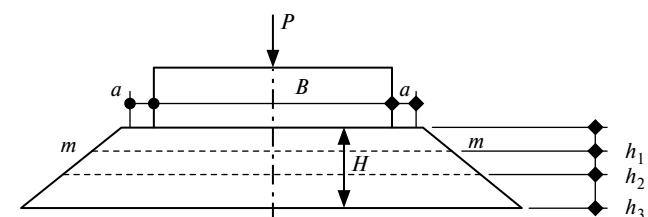


Рис. 3. Модель с двумя слоями геосинтетического материала:  
 $m = 1:1,25$ ;  $B = 16$  см;  $a = 1$  см;  $H = 60$  см;  $h_1 = 20$  см;  $h_2 = 20$  см;  $h_3 = 20$  см

Испытания показали, что деформации модели насыпи (с георешеткой и без нее) увеличиваются по линейной зависимости до полного разрушения (рис. 4). Деформации в первой фазе возникли за счет уплотнения грунта под моделью верхнего строения пути. Предел пропорциональности наступил, когда нагрузка на модель насыпи составила 70–80 % от предельной. Деформация модели в данном случае составила 40–45 % от деформации при максимальной нагрузке.

Дальнейшее увеличение нагрузки приводило к более быстрому увеличению осадки, а зависимость осадки от нагрузки принимала нелинейный характер. Осадка происходила как за счет дальнейшего уплотнения грунта, так и за счет образования сдвиговых зон. В начале второй фазы трещины на поверхности грунта начали расходиться, они удлинялись и расширялись от углов модели насыпи по мере увеличения нагрузки.

Трещины на поверхности модели появились при вертикальной нагрузке 75–80 % от максимальной. На основной площадке трещины были развиты преимущественно в направлении одного из склонов. Угол направления трещины со сторонами модели составлял около 120°. На склоне трещины развивались как продолжение трещин верха насыпи, затем резко шли вниз примерно на 2/3 высоты модели.

При дальнейшем увеличении приложенной нагрузки происходил третий этап осадки, когда модель верхнего строения пути резко просаживалась, а окружающий грунт смещался вверх и в стороны. При разрушении модели насыпи смещение грунта ограничивалось трещинами, образовавшимися в начале второй фазы деформации. На заключительном этапе разрушение обычно было двусторонним и происходило в плоскости укладки геосинтетического материала.

Для объективной оценки влияния армирования верхней части модели насыпи на ее осадку, разрушающие силы и общий модуль деформации использовались коэффициенты отнормированного уменьшения (увеличения) вышеуказанных значений —  $K_S$ ,  $K_P$ ,  $K_E$  соответственно.  $K_S$  — отношение деформации модели насыпи, не армированной и армированной геоматериалами при нагрузке 10 кН;  $K_P$  — отношение несущей способности модели насыпи, армированной и не армированной геоматериалами;  $K_E$  — отношение модуля суммарной деформации насыпной модели, армированной и не армированной геоматериалами. Значения этих коэффициентов для серии модельных испытаний приведены в табл. 4.

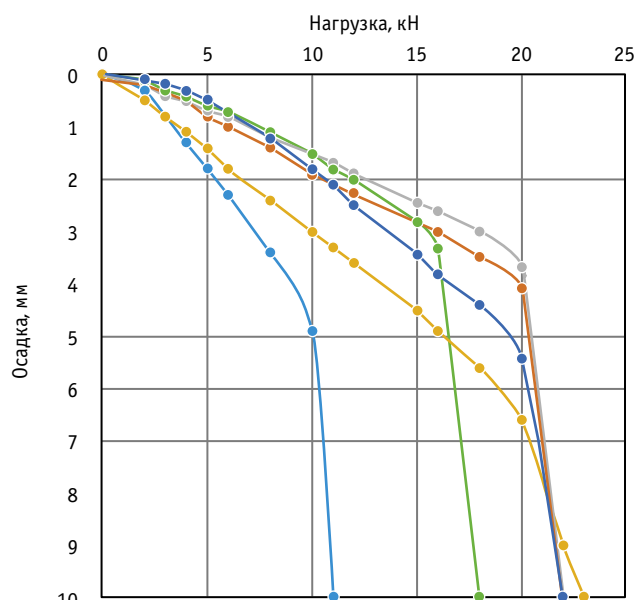


Рис. 4. График зависимости осадки от нагрузки модели насыпи, усиленной геоматериалами:

— без усиления; — тип 1; — тип 2 (один слой); — тип 2 (два слоя); — тип 2 (два слоя без уплотнения); — тип 3

Анализ полученных результатов показал, что наличие геоматериалов приводит к уменьшению осадки модели насыпи под нагрузкой в диапазоне от 1,6 до 3,3 раза, увеличению общего модуля деформации в 1,7–3,3 раза и увеличению несущей способности в 1,6–2,1 раза. В ходе испытаний установлено, что тип георешетки не оказывает существенного влияния на несущую способность модели насыпи.

Укладка второго слоя георешетки не приводит к существенному повышению несущей способности земляного полотна. Эффект от его применения по сравнению с однослойной структурой составляет около 5 %. Несущая способность модели насыпи, армированной георешеткой, на 20 % выше, чем при использовании геоячеек.

Наличие в грунте геосинтетического материала, воспринимающего деформацию при растяжении, препятствует образованию сплошных поверхностей скольжения и тем самым повышает его несущую способность. На начальном этапе нагружения,

Таблица 4

Результаты испытания моделей

Тип усиления	Осадка при нагрузке 10 кН, мм	Нагрузка при разрушении, кН	$K_P$	$K_S$	$K_E$
Без усиления	4,9	11,0	1,0	1,0	1,0
Тип 1	1,5	18,0	1,6	3,3	2,6
Тип 2 (один слой)	1,7	22,0	2,0	2,9	3,3
Тип 2 (два слоя)	1,8	23,0	2,1	2,7	1,7
Тип 2 (один слой без уплотнения)	3,1	22,0	2,0	1,6	1,8
Тип 3	1,9	22	2,0	2,6	2,6

в фазе уплотнения грунта, геосинтетический слой не оказывает влияния на процесс деформации насыпи. Дальнейшая горизонтальная деформация грунта в фазе сдвига вызывает растяжение геосинтетического материала, вызванное трением, что ограничивает боковое смещение. Потеря несущей способности возникает при недостаточной прочности или жесткости геосинтетических материалов или при преодолении их адгезии к грунту. Сдвиг происходит над поверхностью геосинтетического материала, если его сцепление с грунтом меньше, чем сопротивление сдвигу самого грунта.

Установлено, что армирующий геосинтетический материал должен располагаться в зоне растягивающих напряжений в направлении, совпадающем с главной скоростью деформации растяжения грунта.

Серия проведенных модельных экспериментов позволила сделать вывод, что увеличение количества слоев геосинтетического материала не оказывает существенного влияния на несущую способность земляного полотна. Таким образом, если геосинтетический материал имеет необходимую прочность, то достаточно укладки одного слоя.

## Литература

1. Lavasan A. A., Ghazavi M. Behavior of closely spaced square and circular footings on reinforced sand // Soil and Foundations. 2012. Vol. 52. Issue 1. Pp. 160–167.
2. Huang C., Tatsuoka F. Bearing capacity of reinforced horizontal sandy ground // Geotextiles and Geomembranes. 1990. No. 9. Pp. 51–82.
3. Raymond G., Ismail I. The effect of geogrid reinforcement on unbound aggregates // Geotextiles and Geomembranes. 2003. No. 21 (6). Pp. 355–380.
4. Chen Q., Abu-Farsakh M. Ultimate bearing capacity analysis of strip footings on reinforced soil foundation // Soils and Foundations. 2015. No. 55 (1). Pp. 74–85.
5. The bearing-capacity of a strip foundation on geogrid reinforced sand / K. H. Khing, B. M. Das, V. K. Puri, et al. // Geotextiles and Geomembranes. 1993. No. 12. Pp. 351–361.
6. Basudhar P. K., Saha S., Deb K. Circular footings resting on geotextile-reinforced sand bed // Geotextiles and Geomembranes. 2007. No. 25. Pp. 377–384.
7. Yamamoto K., Kusuda K. Failure mechanisms and bearing capacities of reinforced foundations // Geotextiles and Geomembranes. 2001. No. 19. Pp. 127–162.

## References

1. Lavasan A. A., Ghazavi M. Behavior of closely spaced square and circular footings on reinforced sand // Soil and Foundations. 2012. Vol. 52. Issue 1. Pp. 160–167.
2. Huang C., Tatsuoka F. Bearing capacity of reinforced horizontal sandy ground // Geotextiles and Geomembranes. 1990. No. 9. Pp. 51–82.
3. Raymond G., Ismail I. The effect of geogrid reinforcement on unbound aggregates // Geotextiles and Geomembranes. 2003. No. 21 (6). Pp. 355–380.
4. Chen Q., Abu-Farsakh M. Ultimate bearing capacity analysis of strip footings on reinforced soil foundation // Soils and Foundations. 2015. No. 55 (1). Pp. 74–85.
5. The bearing-capacity of a strip foundation on geogrid reinforced sand / K. H. Khing, B. M. Das, V. K. Puri, et al. // Geotextiles and Geomembranes. 1993. No. 12. Pp. 351–361.
6. Basudhar P. K., Saha S., Deb K. Circular footings resting on geotextile-reinforced sand bed // Geotextiles and Geomembranes. 2007. No. 25. Pp. 377–384.
7. Yamamoto K., Kusuda K. Failure mechanisms and bearing capacities of reinforced foundations // Geotextiles and Geomembranes. 2001. No. 19. Pp. 127–162.

Объем статьи 0,55 авторских листа

УДК 621.436

Леонид Валерьевич Плотников, кандидат технических наук, доцент кафедры «Турбины и двигатели» Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина (УрФУ), Екатеринбург, Россия,  
 Никита Игоревич Григорьев, кандидат технических наук, заместитель главного конструктора ООО «Уральский дизель-моторный завод» (УДМЗ), старший преподаватель кафедры «Турбины и двигатели» Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина (УрФУ), Екатеринбург, Россия,  
 Николай Сергеевич Кочев, аспирант кафедры «Теплоэнергетика и теплотехника» Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина (УрФУ), Екатеринбург, Россия

## УЛУЧШЕНИЕ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПОРШНЕВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ ЭФФЕКТА ЭЖЕКЦИИ В ВЫПУСКНОЙ СИСТЕМЕ

Leonid Valeryevich Plotnikov, PhD in Engineering, Associate Professor, Turbines and Engines Department, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin (UrFU), Ekaterinburg, Russia,  
 Nikita Igorevich Grigoryev, PhD in Engineering, Deputy Chief Designer of Ural Diesel Engine Plant LLC, Senior Lecturer, Turbines and Engines Department, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin (UrFU), Ekaterinburg, Russia,  
 Nikolay Sergeyevich Kochev, postgraduate student, Thermal Engineering and Heat Engineering Department, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin (UrFU), Ekaterinburg, Russia

## Improvement of technical and economic indicators of piston engines due to application of ejection effect in exhaust system

### Аннотация

В статье представлены результаты физического и численного моделирования газодинамики и теплообмена пульсирующих потоков в процессе выпуска отработавших газов в поршневых двигателях внутреннего сгорания (ДВС). Экспериментальные исследования проводились на одноцилиндровой натурной модели автомобильного ДВС размерности 8,2/7,1. Приведены газодинамические, расходные и теплообменные характеристики пульсирующих потоков в выпускной системе разной конфигурации (оснащенные эжектором и без него). Показано, что установка эжектора в выпускной системе приводит к стабилизации течения и позволяет улучшить очистку цилиндра от отработавших газов, а также оптимизировать тепловое состояние выпускных трубопроводов. Экспериментальные данные дополнены численным моделированием рабочего процесса полноразмерного тепловозного двигателя 8ЧН 21/21 производства ООО «Уральский дизель-моторный завод» также с разными конфигурациями выпускных систем. Установлено, что применение эффекта эжекции в выпускной системе дизеля 8ЧН 21/21 приводит к улучшению очистки цилиндров до 10 % и снижению удельного расхода топлива в среднем на 1 %.

**Ключевые слова:** поршневой двигатель внутреннего сгорания, выпускная система, отработавшие газы, газодинамика и теплообмен, эффект эжекции, технико-экономические показатели, эксплуатационные показатели автомобильного и железнодорожного транспорта.

### Summary

The paper presents the results of physical and numerical modeling of gas dynamics and heat exchange of pulsating exhaust gas flows in the exhaust system of piston internal combustion engines (ICE). Experimental studies were carried out on a single-cylinder full-scale model of an automobile ICE of dimension 8.2/7.1. Gas-dynamic, consumable and heat exchange characteristics of pulsating flows in the exhaust system of different configurations (equipped with and without an ejector) are given in the article. It is shown that the installation of an ejector in the exhaust system leads to stabilization of the flow and allows to improve the cleaning of the cylinder from the exhaust gases, as well as to optimize the thermal state of the exhaust pipelines. The experimental data were supplemented by numerical modeling of the working process of a full-size diesel engine (dimension 21/21) produced by the Ural Diesel Engine Plant. Simulations were also performed for engines with different exhaust system configurations. It has been established that the use of the ejection effect in the exhaust system of a diesel engine leads to an improvement in cylinder cleaning up to 10 % and a decrease in specific fuel consumption by an average of 1 %.

**Keywords:** piston internal combustion engine, exhaust system, exhaust gases, gas-dynamics and heat transfer, ejection effect, technical and economic indicators, automobile and railway transport.

DOI: 10.20291/1815-9400-2019-1-76-80

Традиционно улучшение технико-экономических показателей поршневых двигателей внутреннего сгорания (ДВС) достигается на основе совершенствования систем топливоподачи и наддува, а также процессов газообмена, смесеобразования и сгорания [1–4]. При этом существует значительный резерв повышения эффективности работы поршневых ДВС за счет улучшения тепломеханических характеристик потоков отработавших газов в выпускных системах [5, 6]. Известно, что конструкция выпускной системы в первую очередь должна обеспечивать хорошую очистку цилиндров от отработавших газов [7–9]. При этом качество очистки цилиндра в основном определяется геометрической конфигурацией выпускных систем и особенностями структуры течения в них газов [10, 11]. Отрицательные явления, характерные для выпускных систем поршневых ДВС, заключаются в возникновении застойных зон и обратных волн давления [7, 10]. Один из способов борьбы с этими явлениями состоит в создании эффекта эжекции в выпускной системе, некоторые конструктивные исполнения описаны в работе [12]. Однако подобные выпускные системы основаны на согласовании газодинамических явлений от работы соседних цилиндров, имеют сложную конфигурацию и могут быть реализованы только на дизельных двигателях больших размерностей.

В настоящей работе по результатам физического и численного моделирования предложен оригинальный способ модернизации выпускных систем поршневых двигателей за счет применения эффекта эжекции с целью тепломеханической стабилизации течения и соответственно улучшения показателей газообмена и технико-экономических характеристик поршневых ДВС. Таким образом, поскольку поршневые двигатели — это неотъемлемый элемент автомобилей и тепловозов, их совершенствование будет также способствовать улучшению эксплуатационных показателей автомобильного и железнодорожного транспорта.

По результатам анализа литературы и выполнения пилотных исследований предложен метод, основанный на создании эффекта эжекции в выпускной системе. Первоочередная идея эжекции состоит в том, чтобы создать в выпускном трубопроводе дополнительное разрежение, которое будет способствовать лучшей очистке цилиндра от отработавших газов. В данном случае техническое решение заключалось в том, что в выпускном трубопроводе устанавливалась эжекционная трубка, в которую поступал сжатый воздух через электропневмоклапан [13]. Таким образом в выпускной системе создавалось дополнительное разрежение, которое стабилизировало течение газов и ослабляло переходные процессы в пограничном слое. Конструктивное исполнение предлагаемого способа представлено на рис. 1.

Анализ конструкций выпускных систем с принудительной эжекцией для различных двигателей показал, что для многих типов и размерностей поршневых ДВС они могут быть реализованы без серьезных доработок и существенных финансовых затрат.

Для экспериментального исследования газодинамики и теплообмена в выпускных системах поршневых двигателей разработана экспериментальная установка, представляющая собой

натурную одноцилиндровую модель автомобильного двигателя размерности 8,2/7,1. Опыты проводились для традиционной выпускной системы и выпускной системы с эжекционной трубкой (см. рис. 1) в диапазоне частот вращения коленвала  $n$  от 600 до 3000  $\text{мин}^{-1}$  при разных избыточных давлениях на выпуске  $p_b$ . Давление  $p_b$  в цилиндре перед выпускным клапаном составляло от 0,5 до 2,0 бар. Средняя температура воздуха в подающей магистрали равнялась 40 °С. В выпускной системе с принудительной эжекцией сжатый воздух в эжекционную трубку поступал из автономного компрессора. Разрежение в выпускном трубопроводе (за выпускным клапаном) при отсутствии потока отработавших газов в системе составляло 0,05 бар. Следует отметить, что принудительная эжекция имела место только в процессе выпуска (во время открытого клапана).

Для определения скорости потока воздуха  $w_x$  и локального коэффициента теплоотдачи  $\alpha_x$  использовались термоанемометры постоянной температуры (метод термоанемометрирования подробно описан в [14]). Частота вращения коленчатого вала двигателя замерялась с помощью тахометра. Все экспериментальные данные поступали в автоматизированную измерительную систему на базе аналого-цифрового преобразователя. Более подробное описание экспериментальной установки и средств измерений дано в работе [10].

Сравнение газодинамических и расходных характеристик газовых потоков в выпускных системах с принудительной эжекцией и без нее представлено на рис. 2 и 3.

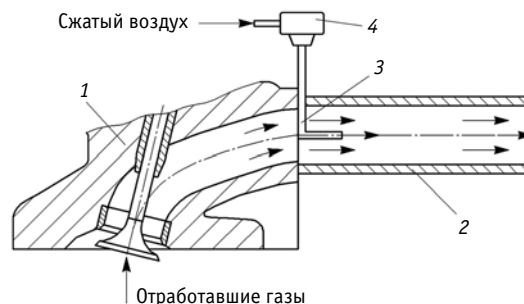


Рис. 1. Схема выпускной системы поршневого двигателя с эжекцией [13]:

1 — головка цилиндра двигателя; 2 — выпускной трубопровод; 3 — эжекционная трубка; 4 — электропневмоклапан

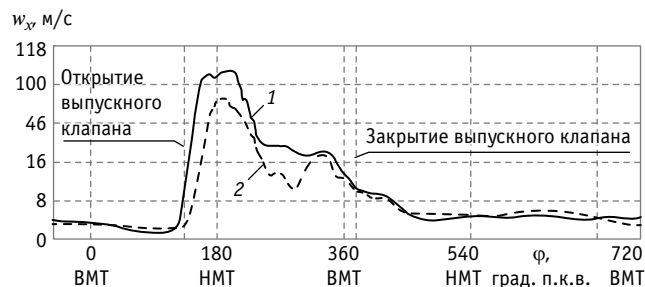


Рис. 2. Зависимости местной ( $l_x = 140$  мм,  $d = 30$  мм) скорости потока газа  $w_x$  в выпускной системе с эжекцией (1) и в традиционной системе (2) от угла поворота коленвала  $\varphi$  при частоте вращения коленвала  $n = 1500$   $\text{мин}^{-1}$  и начальном избыточном давлении  $p_b = 2,0$  бар

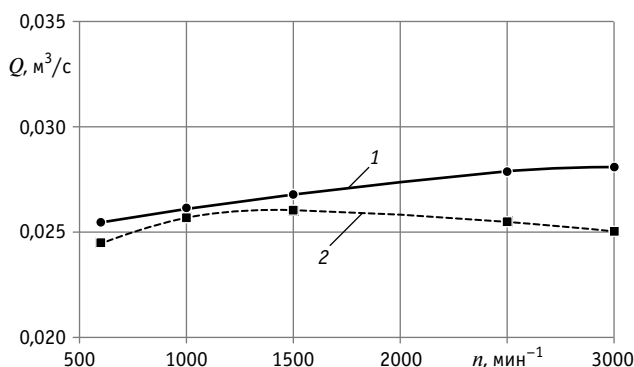


Рис. 3. Зависимость объемного расхода воздуха  $Q$  через выпускную систему с эжекцией (1) и традиционную систему (2) от частоты вращения коленчатого вала двигателя  $n$

Установлено, что максимальные значения скорости потока газа  $w_x$  в выпускной системе с принудительной эжекцией значительно выше (до 35 %), чем в системе без эжекции (см. рис. 2). Также следует отметить сглаживание пульсаций скорости потока газа в выпускной системе с эжекцией в процессе выпуска (в период открытого выпускного клапана). Все это свидетельствует о стабилизации течения, что, по мнению авторов, является следствием создания дополнительного разрежения в выпускной системе за счет принудительной эжекции.

Изменение газодинамических характеристик газовых потоков оказывает влияние на расход газа через выпускную систему с эжекционной трубкой. Из рис. 3 видно, что объемный расход газа  $Q$  через выпускную систему с принудительной эжекцией возрастает во всем исследованном диапазоне частот вращения коленчатого вала  $n$ . Установлено, что при частоте вращения коленчатого вала до 1500  $\text{min}^{-1}$  увеличение объемного расхода газа через выпускную систему с эжекцией варьируется от 1,5 до 3,9 %, тогда как при  $n = 3000 \text{ min}^{-1}$  рост  $Q$  составляет почти 10 %. Это должно привести к лучшей очистке цилиндров от отработавших газов и соответственно к повышению эффективной мощности двигателя. Следует отметить, что данные о расходе воздуха через выпускную систему с эжектором приведены за вычетом расхода воздуха через эжекционную трубку.

Представление о влиянии принудительной эжекции на локальный коэффициент теплоотдачи от выпускных газов к стенкам трубопровода дает рис. 4.

Из рис. 4 видно, что при установке в выпускной системе эжекционной трубки максимальные значения локального коэффициента теплоотдачи  $\alpha_x$  снижаются в среднем на 20 %. При этом следует отметить, что в период закрытого выпускного клапана интенсивность теплоотдачи несколько выше в выпускной системе с эжекцией.

Таким образом, можно предположить, что создание эффекта эжекции приведет к уменьшению тепловой напряженности элементов выпускной системы и повышению ее надежности, поскольку наблюдается снижение интенсивности теплоотдачи. Более того, можно предположить, что подаваемый через эжекционную трубку воздух будет дополнительно охлаждать отработавшие газы и стенки выпускного трубопровода.

Чтобы оценить влияние эффекта эжекции в выпускной системе на технико-экономические показатели полноразмерных ДВС, в программе ACTUS (Швейцария, ABB Turbo Systems Ltd.) выполнено численное моделирование рабочего процесса дизельного двигателя 8ЧН 21/21 (заводское обозначение 8ДМ-21) производства ООО «Уральский дизель-моторный завод». ACTUS — это специализированная программа для моделирования рабочих процессов двигателей, оснащенных турбонаддувом, с учетом геометрии цилиндропоршневой группы, конфигурации газозвуковых систем, параметров турбокомпрессора, которая может применяться для различных целей и задач [15–17].

Численное моделирование подтверждает результаты экспериментальных исследований о сглаживании пульсаций скорости потока в выпускном трубопроводе. В частности, как видно из рис. 5, амплитуды пульсаций скорости потока в выпускной системе дизеля 8ДМ-21 снижаются вплоть до 50 % при сохранении средней скорости потока газов в течение рабочего цикла двигателя.

Установлено, что коэффициент остаточных газов снижается до 10 % на частичных режимах работы двигателя за счет использования принудительной эжекции в выпускной системе поршневого ДВС, что приводит к уменьшению удельного расхода топлива в среднем на 1,5 % (рис. 6).

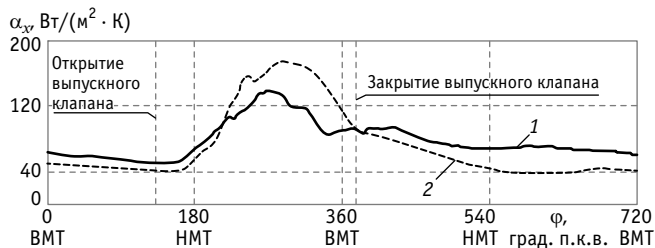


Рис. 4. Зависимости местной ( $l_x = 140 \text{ мм}$ ,  $d = 30 \text{ мм}$ ) скорости потока газа  $w_x$  в выпускной системе с эжекцией (1) и в традиционной системе (2) от угла поворота коленвала  $\phi$  при частоте вращения коленвала  $n = 3000 \text{ min}^{-1}$  и начальном избыточном давлении  $p_b = 2,0 \text{ бар}$

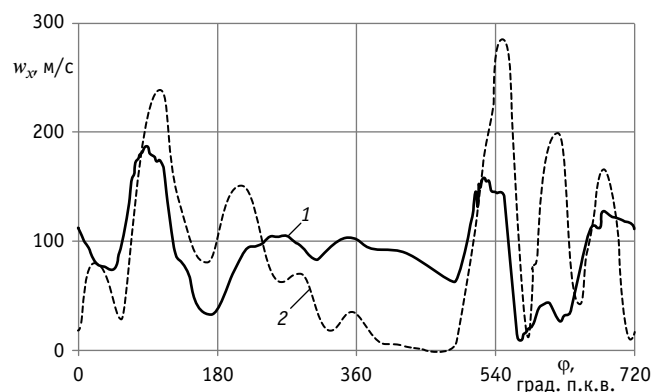
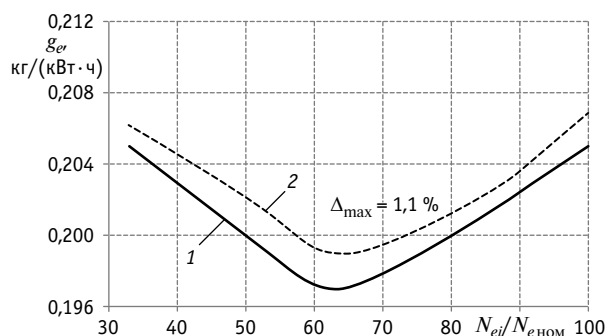


Рис. 5. Расчетные зависимости местной ( $l_x = 140 \text{ мм}$ ,  $d = 30 \text{ мм}$ ) скорости потока газов  $w_x$  в выпускной системе с эжекцией (1) и в традиционной системе (2) для дизеля 8ДМ-21 при частоте вращения коленвала  $n = 1500 \text{ min}^{-1}$  и мощности 930 кВт



**Рис. 6.** Расчетные зависимости удельного расхода топлива  $g_e$  от относительной мощности двигателя  $N_{ei}/N_{е\text{ном}}$  при разных конфигурациях выпускной системы дизеля 8ДМ-21:  
1 — с эжекцией; 2 — без эжекции

Следует отметить, что снижение удельного расхода топлива в среднем на 1 % для двигателя 8ДМ-21 позволит сократить общее потребление топлива конечным потребителям приблизительно на 2 кг/ч. Таким образом, в эксплуатации ежегодно суммарные расходы на топливо снизятся примерно на 500 тыс. руб. (или около 8000 евро).

В целом по результатам выполненного исследования можно сделать следующие выводы:

1) экспериментальными исследованиями определены основные закономерности изменения мгновенных значений скорости и локального коэффициента теплоотдачи в выпускных

системах разной конфигурации (с эжекцией и без нее) при разных режимах работы поршневого двигателя;

2) установлено, что за счет использования в выпускной системе эффекта эжекции интенсивность локальной теплоотдачи уменьшается на 20 %, что позволяет снизить тепловые нагрузки на основные детали системы;

3) экспериментально подтверждено, что применение принудительной эжекции в выпускной системе поршневого ДВС приводит к увеличению расхода газа через систему на 1,5–10 % в зависимости от режима работы двигателя, что позволяет улучшить очистку цилиндров от отработавших газов (снизить коэффициент остаточных газов) и повысить технико-экономические показатели поршневых двигателей;

4) на основе численного моделирования в программном комплексе ACTUS установлено, что применение принудительной эжекции в выпускной системе дизеля 8ЧН 21/21 приводит к снижению коэффициента остаточных газов вплоть до 10 % и уменьшению удельного эффективного расхода топлива на величину до 2,0 %;

5) результаты исследования могут быть использованы на поршневых двигателях размерностей 8,2/7,1 и 21/21, которые являются силовыми установками для автомобильного и железнодорожного транспорта, с целью повышения их эффективности.

*Работа выполнена при поддержке РНФ  
в рамках научного проекта 18-79-10003.*

## Литература

1. Шароглазов Б. А., Шишков В. В. Поршневые двигатели: теория, моделирование и расчет процессов : учеб. / под ред. Б. А. Шароглазова. Челябинск : Изд. центр ЮУрГУ, 2011. 525 с.
2. Heywood J. B. Internal combustion engine fundamentals. New York : McGraw-Hill, 1988. 458 p.
3. Шестаков Д. С., Пронин И. Е. Доводка рабочего процесса тепловозных дизелей 8ЧН 21/21 с российскими турбокомпрессорами ТКР180 // Транспорт Урала. 2015. № 4 (47). С. 81–85. DOI: 10.20291/1815-9400-2015-4-81-85. ISSN 1815-9400.
4. Шестаков Д. С., Кочев Н. С. Методы определения и устранения неравномерности цикловой подачи топлива при настройке ТНВД многоцилиндровых дизелей // Двигателестроение. 2015. № 3 (261). С. 22–25. ISSN 0202-1633.
5. Increasing reliability of gas-air systems of piston and combined internal combustion engines by improving thermal and mechanic flow characteristics / Yu. M. Brodov, N. I. Grigoryev, B. P. Zhilkin, et al. // Thermal Engineering. 2015. Vol. 62. No. 14. Pp. 1038–1042.
6. Wang T. J. Optimum design for intake and exhaust system of a heavy-duty diesel engine by using DFSS methodology // Journal of Mechanical Science and Technology. 2018. Vol. 32. No. 7. Pp. 3465–3472.
7. Драганов Б. Х., Круглов М. Г., Обухова В. С. Конструирование впускных и выпускных каналов двигателей внутреннего сгорания. Киев : Вища школа, 1987. 175 с.
8. Вихерт М. М., Грудский Ю. Г. Конструирование впускных систем быстроходных дизелей. М. : Машиностроение, 1982. 151 с.

## References

1. Sharoglazov B. A., Shishkov V. V. Piston engines: theory, modeling and calculation processes [Porshnevye dvigateli: teoriya, modelirovanie i raschet protsessov] : textbook / Ed. by B. A. Sharoglazov. Chelyabinsk : Publishing Center of SUSU, 2011. 525 p.
2. Heywood J. B. Internal combustion engine fundamentals. New York : McGraw-Hill, 1988. 458 p.
3. Shestakov D. S., Pronin I. E. Adjustment of operation of 8ChN 21/21 diesel locomotive engines with Russian TKR 180 turbochargers [Dovodka rabocheho protsessha teplovoznnykh dizeley 8ChN 21/21 s rossiyskimi turbokompressorami TKR 180] // Transport of the Urals. 2015. No. 4 (47). Pp. 81–85. DOI: 10.20291/1815-9400-2015-4-81-85. ISSN 1815-9400.
4. Shestakov D. S., Kochev N. S. Prevention of fuel injection rate non-uniformity during multi-cylinder injection pump tuning [Metody opredeleniya i ustraneniya neravnomernosti tsiklovoy podachi topliva pri nastroyke TNVD mnogotsilindrovyykh dizeley] // Engines construction. 2015. No. 3 (261). Pp. 22–25. ISSN 0202-1633.
5. Increasing reliability of gas-air systems of piston and combined internal combustion engines by improving thermal and mechanic flow characteristics / Yu. M. Brodov, N. I. Grigoryev, B. P. Zhilkin, et al. // Thermal Engineering. 2015. Vol. 62. No. 14. Pp. 1038–1042.
6. Wang T. J. Optimum design for intake and exhaust system of a heavy-duty diesel engine by using DFSS methodology // Journal of Mechanical Science and Technology. 2018. Vol. 32. No. 7. Pp. 3465–3472.
7. Draganov B. Kh., Kruglov M. G., Obukhova V. S. Design of intake and exhaust channels of internal combustion engines [Konstruirovaniye vpusknykh i vypusknnykh kanalov dvigateley vnutrennego sgoraniya]. Kiev : Higher School, 1987. 175 p.
8. Vikhert M. M., Grudskiy Yu. G. Designing the intake systems of high-speed diesel engines [Konstruirovaniye vpusknykh sistem bystrokhodnykh dizeley]. Moscow : Machinery, 1982. 151 p.



9. Конструирование двигателей внутреннего сгорания : учеб. / Н. Д. Чайнов, Н. А. Иващенко, А. Н. Краснокутский, Л. Л. Мягков ; под ред. Н. Д. Чайнова. М. : Машиностроение, 2008. 496 с.
10. Совершенствование процессов в газоздушных трактах поршневых двигателей внутреннего сгорания / Б. П. Жилкин, В. В. Лашманов, Л. В. Плотников, Д. С. Шестаков. Екатеринбург : Изд-во УрФУ, 2015. 228 с.
11. Khairuddin U. B., Costall A. W. Aerodynamic optimization of the high pressure turbine and interstage duct in a two-stage air system for a heavy-duty diesel engine // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. 2018. Vol. 140. No. 5. Article number 052801.
12. Двигатели внутреннего сгорания. Системы поршневых и комбинированных двигателей : учеб. / С. И. Ефимов, Н. А. Иващенко, В. И. Ильин и др. ; под ред. А. С. Орлина ; 3-е изд. М. : Машиностроение, 1985. 456 с.
13. Система выхлопа поршневого двигателя / Б. П. Жилкин, Л. В. Плотников, Н. И. Григорьев : пат. на полезную модель 135728 Рос. Федерация. № 2013118761/06 ; заявл. 23.04.13 ; опубл. 20.12.13, Бюл. № 35.
14. Plotnikov L. V., Zhilkin B. P. The gas-dynamic unsteadiness effects on heat transfer in the intake and exhaust systems of piston internal combustion engines // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2017. Vol. 115. Pp. 1182–1191.
15. Contribution of turbocharging solutions towards improved fuel efficiency of two-stroke low-speed engines / P. Schurmann, M. Hubacher, C. Christen, et al. // 27<sup>th</sup> CIMAC World Congress on Combustion Engine Technology. Shanghai, May 13–16, 2013. Pp. 677–685.
16. Plotnikov L. V., Bernasconi S., Brodov Yu. M. The effects of the intake pipe configuration on gas exchange, and technical and economic indicators of diesel engine with the 21/21 dimension // Procedia Engineering. 2017. Vol. 206. Pp. 140–145.
17. Plotnikov L. V., Bernasconi S., Zhilkin B. P. Analysis of resonator installation effect in intake system of the diesel engine on parameters of gas exchange quality // Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Conference on Industrial Engineering, 2019. Pp. 69–77.
9. Construction of an internal combustion engine [Konstruirovaniye dvigateley vnutrennego sgoraniya] : textbook / N. D. Chaynov, N. A. Ivashchenko, A. N. Krasnokutskiy, L. L. Myagkov ; ed. by N. D. Chaynov. Moscow : Machinery, 2008. 496 c.
10. Improvement of processes in gas tracts of reciprocating internal combustion engines [Sovershenstvovaniye protsessov v gazovozdushnykh traktakh porshnevyykh dvigateley vnutrennego sgoraniya] / B. P. Zhilkin, V. V. Lashmanov, L. V. Plotnikov, D. S. Shestakov. Ekaterinburg : Publishing House of UrFU, 2015. 228 p.
11. Khairuddin U. B., Costall A. W. Aerodynamic optimization of the high pressure turbine and interstage duct in a two-stage air system for a heavy-duty diesel engine // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. 2018. Vol. 140. No. 5. Article number 052801.
12. Internal combustion engines. Systems of piston and hybrid engines [Dvigateli vnutrennego sgoraniya. Sistemy porshnevyykh i kombinirovannykh dvigateley] : textbook / S. I. Efimov, N. A. Ivashchenko, V. I. Ilyin, et al. ; ed. by A. S. Orlin ; 3<sup>rd</sup> ed. Moscow : Machinery, 1985. 456 p.
13. Exhaust system of a piston engine [Sistema vykhlopa porshnovego dvigatelya] / B. P. Zhilkin, L. V. Plotnikov, N. I. Grigoryev : pat. for utility model 135728 Russian Federation. No. 2013118761/06 ; filed 23.04.13 ; publ. 20.12.13, Journal No. 35.
14. Plotnikov L. V., Zhilkin B. P. The gas-dynamic unsteadiness effects on heat transfer in the intake and exhaust systems of piston internal combustion engines // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2017. Vol. 115. Pp. 1182–1191.
15. Contribution of turbocharging solutions towards improved fuel efficiency of two-stroke low-speed engines / P. Schurmann, M. Hubacher, C. Christen, et al. // 27<sup>th</sup> CIMAC World Congress on Combustion Engine Technology. Shanghai, May 13–16, 2013. Pp. 677–685.
16. Plotnikov L. V., Bernasconi S., Brodov Yu. M. The effects of the intake pipe configuration on gas exchange, and technical and economic indicators of diesel engine with the 21/21 dimension // Procedia Engineering. 2017. Vol. 206. Pp. 140–145.
17. Plotnikov L. V., Bernasconi S., Zhilkin B. P. Analysis of resonator installation effect in intake system of the diesel engine on parameters of gas exchange quality // Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Conference on Industrial Engineering, 2019. Pp. 69–77.

Объем статьи 0,67 авторских листа

УДК 629.113

Сергей Николаевич Кривцов, доктор технических наук, профессор кафедры «Автомобильный транспорт» Иркутского национального исследовательского технического университета (ИрНТУ), Иркутск, Россия,

Татьяна Игоревна Кривцова, кандидат технических наук, доцент кафедры «Автомобильный транспорт» Иркутского национального исследовательского технического университета (ИрНТУ), Иркутск, Россия

## ВЛИЯНИЕ ДОБАВКИ ЭТИЛОВОГО СПИРТА НА ТОПЛИВНУЮ ЭКОНОМИЧНОСТЬ АВТОМОБИЛЯ С БЕНЗИНОВЫМ ДВИГАТЕЛЕМ

Sergey Nikolayevich Krivtsov, DSc in Engineering, Professor, Automobile Transport Department, Irkutsk National Research Technical University (INRTU), Irkutsk, Russia,

Tatyana Igorevna Krivtsova, PhD in Engineering, Associate Professor, Automobile Transport Department, Irkutsk National Research Technical University (INRTU), Irkutsk, Russia

### Influence of ethanol additives on fuel efficiency of gasoline vehicle

#### Аннотация

Статья посвящена одному из направлений улучшения экологических характеристик автомобилей с бензиновыми двигателями — использованию добавки спирта в моторное топливо. Аналитически исследовано изменение топливной экономичности при увеличении доли спирта в бензине, разработан приборный комплекс для получения топливно-экономической характеристики установившегося движения автомобиля по ровному асфальтобетонному покрытию. Выявлены закономерности изменения топливной экономичности от изменения массовой доли спирта в топливе. Апробирован и предложен способ повышения топливной экономичности автомобиля — отключение обратной связи по составу отработавших газов при увеличении массовой доли этанола.

**Ключевые слова:** бензоэтанольные смеси, топливная экономичность, расход топлива, датчики расхода топлива, топливно-экономическая характеристика.

#### Summary

The paper is devoted to one of the ways to improve the environmental characteristics of gasoline cars — the use of alcohol additives in motor fuel. The authors analytically studied the change of fuel efficiency with an increase in the share of alcohol in gasoline and developed the instrument complex for obtaining the fuel-economic characteristics of a steady motion on a flat asphalt-concrete coating. The paper reveals the regularities of changes in the fuel efficiency from changes in the mass share of alcohol in the fuel. To reduce the negative effect of the deterioration of the fuel efficiency with an increase in the mass share of ethanol the authors tested and proposed to turn off the feedback on the composition of the exhaust gases.

**Keywords:** gasoline-ethanol mixtures, fuel efficiency, fuel consumption, fuel consumption sensors, fuel-economic characteristics.

DOI: 10.20291/1815-9400-2019-1-81-85

#### ВВЕДЕНИЕ

Снижение токсичности отработавших газов автотранспортных средств, а также выбросов диоксида углерода в окружающую среду относится к числу актуальных проблем. Один из путей сокращения эмиссии отработавших газов — переход на альтернативные виды топлива, в том числе замещение топлив нефтяного происхождения возобновляемыми источниками энергии. Для автомобилей, оснащенных бензиновыми двигателями, таким видом топлива могут быть спирты [1–3], причем особый интерес представляет этиловый спирт. Этот вид топлива имеет более высокое октановое число, нежели бензины, и обеспечивает более высокие экологические показатели [4, 5]. Подавляющее число работ, проводимых в данном направлении, посвящено стендовым испытаниям преимущественно новых двигателей [3–5]. Значительно меньше эксплуатационных исследований, в которых рассматривается использование смесового топлива с этиловым спиртом для автомобилей с пробегом.

#### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Ввиду более высоких экологических показателей спиртов, а также более высоких октановых чисел смесевых топлив большой интерес представляет изучение того, как изменяется топливная экономичность автомобиля при увеличении, в том числе сверх нормативов, содержания спирта в топливе [6, 7]. В настоящей работе поставлены следующие задачи:

выявить закономерности изменения топливной экономичности и тягово-скоростных свойств автомобиля, имеющего пробег 100 тыс. км, при использовании бензина марки АИ-92 с массовой долей этилового спирта до 20 %;

обосновать и апробировать способ улучшения топливной экономичности автомобиля при использовании бензина с массовой долей этилового спирта 20 %.



Путь, скорость и ускорение измеряли при помощи штатного индуктивного датчика ABS TOYOTA 89542–30230 (датчик выдает 48 сигналов на один оборот колеса) с переднего колеса автомобиля, катящегося в ведомом режиме без увода. Кинематический радиус качения колеса при заданной нагрузке определяли в соответствии с теоретическими положениями и методикой, изложенной в работе [9].

Эксперименты проводили на автомобиле Toyota Chaser, имеющем пробег более 100 тыс. км.

При испытаниях использовали внешний алюминиевый бензобак на 20 л, переделанный под погружной бензонасос и условия эксперимента (см. рис. 1) с погружным бензонасосом DENSO 195130–1020 производительностью 255 л/ч (рис. 2).

Расходы топлива через подающую и возвратную магистраль измеряли датчиками с овальными шестернями OVAL-Flowmate LSF 45. В подающей магистрали датчик устанавливали на участке между топливным баком и фильтром тонкой очистки, в обратной магистрали — на входе в бак. Такое расположение необходимо для предотвращения нагрева датчиков от двигателя, а также для более быстрой установки и демонтажа. Питание датчиков осуществлялось от бортовой сети автомобиля.

Таким образом, израсходованное топливо считали как разность прямого и обратного (возвращаемого в бак) расходов.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Анализ топливно-экономической характеристики установившегося движения автомобиля Toyota Chaser по ровному асфальтобетонному покрытию (рис. 3) позволяет заключить, что при увеличении доли этилового спирта в бензине увеличивается и путевой расход на всех скоростях движения. Это можно объяснить снижением теплотворной способности топлива, а следовательно, и его удельного эффективного расхода [выражение (2)].

Оценка относительного изменения путевого расхода топлива по отношению к бензину марки АИ-92 представлена на рис. 4. Из анализа рис. 4 можно сделать вывод, что в сравнении с топливом АИ-92 при скоростях 30–100 км/ч путевой расход бензина с массовым содержанием этанола 5 % увеличивается на 16,94–48,85 %, с содержанием 10 % — на 31,14–125,59 %, с содержанием 15 % — на 32,24–139,69 %, с содержанием 20 % — на 36,61–149,39 % соответственно. Увеличение массовой доли спирта приводит к увеличению путевого расхода топлива непропорционально.

Математическая обработка данных методом параметрической аппроксимации в среде MATLAB позволила получить уравнение, с помощью которого можно рассчитать путевой расход топлива в зависимости от скорости и массовой доли этилового спирта при движении автомобиля Toyota Chaser на третьей передаче по ровному асфальтобетонному покрытию (рис. 5):

$$Q_S = 5,175 + 61,25 \cdot \delta - 0,0485 \cdot V - 115,1 \cdot \delta^2 - 0,2382 \cdot \delta \cdot V + 0,0009 \cdot V^2, \quad (6)$$

где  $\delta$  — объемная доля спирта в смеси;

$V$  — скорость установившегося движения, км/ч.



Рис. 2. Экспериментальная установка для измерения расхода топлива (установлена в автомобиле на месте заднего сиденья)

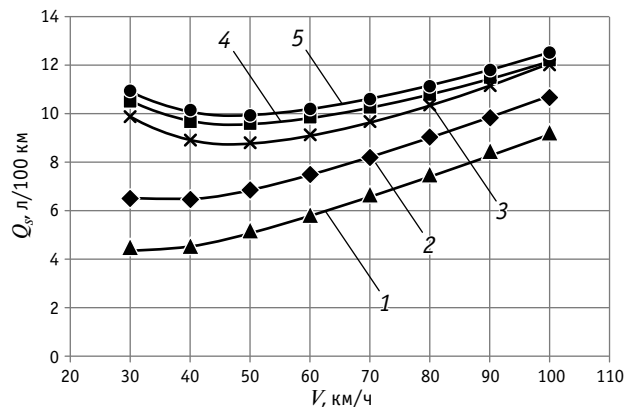


Рис. 3. График зависимости путевого расхода топлива с разным содержанием этилового спирта (0–20 %) от скорости движения автомобиля Toyota Chaser на третьей передаче по ровному асфальтобетонному покрытию: 1 — бензин АИ-92; 2–5 — бензин АИ-92 с содержанием этилового спирта соответственно 5, 10, 15 и 20 %

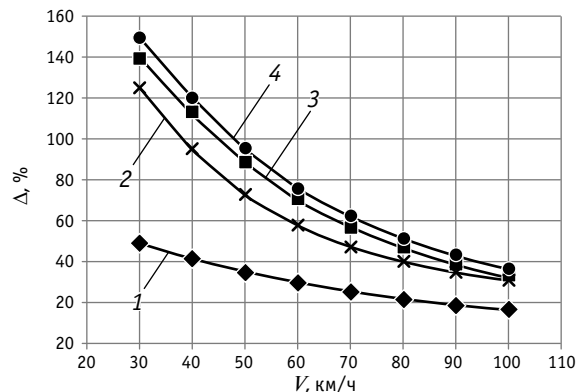
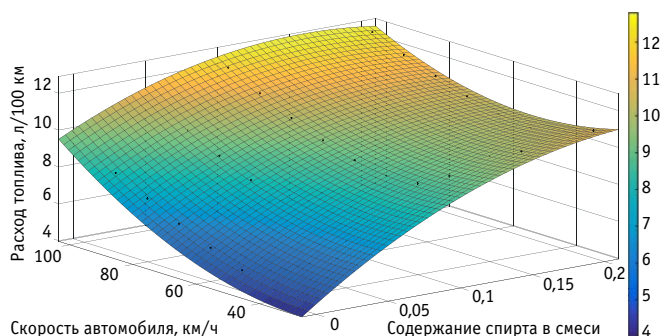


Рис. 4. Сравнение путевого расхода топлива с разным содержанием этанола по отношению к бензину марки АИ-92: 1–4 — бензин АИ-92 с содержанием этилового спирта 5, 10, 15 и 20 % соответственно



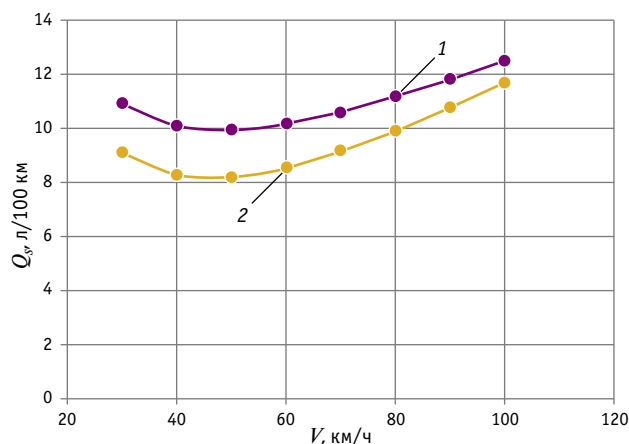
**Рис. 5.** График зависимости путевого расхода топлива от скорости и доли содержания спирта при движении автомобиля Toyota Chaser на третьей передаче по ровному асфальтобетонному покрытию

Ухудшение топливной экономичности при увеличении массовой доли этанола в топливе является нежелательным. При этом представляет интерес поиск мероприятий, направленных на увеличение массового содержания спирта и одновременного снижения расхода топлива.

Современные автомобили оснащаются системой, позволяющей отслеживать состав отработавших газов по наличию или отсутствию в них кислорода. Система управления двигателем настроена на бензин, поэтому работа на бензоэтанольных смесях является в данном случае неоптимальной [5], что объясняется наличием в составе спиртов кислорода. По этой причине различаются и стехиометрические коэффициенты. Для этанола такое отличие достигает чуть более 60 % в сравнении с бензином, что может привести к ошибочной коррекции топливовоздушной смеси. Указанные обстоятельства позволили предположить, что при эксплуатации автомобиля на бензоэтанольных топливах обратная связь по составу отработавших газов должна быть либо модифицирована, либо отключена.

Для проверки этого предположения были выполнены дополнительные эксперименты на топливе с массовым содержанием этанола 20 % при отключенном кислородном датчике (рис. 6).

Эксперименты показали, что отключение кислородного датчика не привело к аварийному режиму работы двигателя, однако позволило снизить путевой расход топлива до уровня, примерно соответствующего 10 %-й концентрации этанола (см. рис. 3 и 6).



**Рис. 6.** График зависимости расхода топлива от скорости при движении автомобиля Toyota Chaser на третьей передаче по ровному асфальтобетонному покрытию:

1 — бензин АИ-92 с содержанием этилового спирта 20 %;  
2 — бензин АИ-92 с содержанием этилового спирта 20 % при отключенном датчике кислорода в отработавших газах

## ВЫВОДЫ

Таким образом, проведенные исследования позволили:

1) определить функциональную закономерность изменения топливной экономичности при равномерном движении автомобиля по асфальтобетонному покрытию в диапазоне скоростей 30–100 км/ч, которая описывается уравнением

$$Q_S = 5,175 + 61,25 \cdot \delta - 0,0485 \cdot V - 115,1 \cdot \delta^2 - 0,2382 \cdot \delta \cdot V + 0,0009 \cdot V^2;$$

2) выявить, что с увеличением массовой доли содержания этанола в бензине АИ-92 до 20 % при установившемся движении путевой расход топлива также увеличивается;

3) обосновать и апробировать способ улучшения топливной экономичности автомобиля при использовании бензина с массовой долей этилового спирта 20 % — отключение датчика кислорода в отработавших газах. Использование этого способа практически не влияет на мощность, подведенную к колесам, но позволяет снизить путевой расход топлива на 6,65–18,39 %.

## Литература

- Ирисов С. А. Спирт, как моторное топливо. М. ; Л., 1933. 136 с.
- Экспериментальная оценка энерго-экологических показателей автомобильного двигателя на бензоэтаноле / А. М. Левтеров, В. П. Мараховский, В. Н. Бганцев, М. В. Сарапина // Автомобильный транспорт. 2008. № 22. С. 98–101. ISSN 2219–8342.
- Сухарев В. Ю., Аншелес В. Р. Бензиново-метанольные смеси — энергоэффективное и экологичное топливо для автомобилей // Вестник Череповецкого государственного университета. 2014. № 3 (56). С. 24–28. ISSN 1994–0637.

## References

- Irisov S. A. Alcohol as motor fuel [Spirt, kak motornoe toplivo]. Moscow ; Leningrad, 1933. 136 p.
- Experimental evaluation of energy and environmental parameters of bioethanol automobile engines [Eksperimental'naya otsenka energo-ekologicheskikh pokazateley avtomobil'nogo dvigatelya na benzoetanole] / A. M. Levterov, V. P. Marakhovskiy, V. N. Bgantsev, M. V. Sarapina // Automobile Transport. 2008. No. 22. Pp. 98–101. ISSN 2219–8342.
- Sukharev V. Yu., Ansheles V. R. Gasoline-methanol mixtures — energy-efficient and ecological fuel for motor vehicles [Benzinovo-metanol'nye smesi — energoeffektivnoe i ekologichnoe toplivo dlya avtomobiley] // Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2014. No. 3 (56). Pp. 24–28. ISSN 1994–0637.

4. Улучшение энергетических и экологических характеристик поршневых ДВС при переходе на бензоэтанольное топливо / А. А. Абрамов, А. В. Апельнский, К. С. Руновский, В. П. Белов // Известия МГТУ (МАМИ). 2013. Т. 1. № 2 (16). С. 101–106. ISSN 2074–0530.
5. Василевкин Е. В., Егоров В. Н., Руновский К. С. Конструктивные изменения в ДВС, необходимые при переходе на бензоэтанольные топлива // Известия МГТУ (МАМИ). 2013. Т. 1. № 1 (15). С. 10–14. ISSN 2074–0530.
6. ГОСТ EN 15376–2014. Топлива автомобильные. Этанол в качестве компонента моторного топлива. Требования и методы испытания. М. : Стандартинформ, 2015. 12 с.
7. ГОСТ Р 52201–2004. Топливо моторное этанольное для автомобильных двигателей с принудительным зажиганием. Бензолы. Общие технические требования. М. : Стандартинформ, 2009. 6 с.
8. Экспериментальное исследование влияния технического состояния электрогидравлических форсунок на топливную экономичность автомобиля с дизельным двигателем, оснащенный аккумуляторной топливopодaющей системой / С. Н. Кривцов, В. Г. Зимин, Т. И. Кривцова, И. В. Якимов // Труды НАМИ. 2017. № 1 (268). С. 29–36. ISSN 0135–3152.
9. Krivtsov S. N., Syrbakov A. P., Korchuganova M. A. Measuring of traction and speed characteristics as well as of fuel economy of a car in road conditions // Innovative technologies in engineering: proceedings of VII International scientific and practical conference. 2016. Vol. 142. No. 1. P. 012101. DOI: 10.1088/1757-899X/142/1/012101.
10. ГОСТ Р 54810–2011. Автомобильные транспортные средства. Топливная экономичность. Методы испытаний. М. : Стандартинформ, 2012. 23 с.
4. Enhancement of energy and environmental performance of reciprocating internal combustion engines on transition to gasoline-ethanol fuel [Uluchshenie energeticheskikh i ekologicheskikh kharakteristik porshnevyykh DVS pri perekhode na benzoetanol'noe toplivo] / A. A. Abramov, A. V. Apelinskiy, K. S. Runovskiy, V. P. Belov // Izvestiya MGТУ «MAMI». 2013. Vol. 1. No 2 (16). Pp. 101–106. ISSN 2074–0530.
5. Vasilevkin E. V., Egorov V. N., Runovskiy K. S. Structural alterations of an engine when switching to gasoline-ethanol fuels [Konstruktivnye izmeneniya v DVS, neobkhodimye pri perekhode na benzoetanol'nye topliva] // Izvestiya MGТУ «MAMI». 2013. Vol. 1. No. 1 (15). Pp. 10–14. ISSN 2074–0530.
6. GOST EN 15376–2014. Automotive fuels. Ethanol as a blending component for motor fuel. Requirements and test methods [Topliva avtomobil'nye. Etanol v kachestve komponenta motornogo topliva. Trebovaniya i metody ispytaniya]. Moscow : Standardinform, 2015. 12 p.
7. GOST R 52201–2004. Fuel motor ethanol for automotive spark-ignition engines. Benzanols. General technical requirements [Toplivo motornoe etanol'noe dlya avtomobil'nykh dvigateley s prinuditel'nyy zazhiganiem. Benzanoly. Obshhie tekhnicheskie trebovaniya]. Moscow : Standardinform, 2009. 6 p.
8. Experimental study of the electrohydraulic injectors technical condition effect on the fuel efficiency of a diesel vehicle equipped with accumulator fuel-delivery system [Eksperimental'noe issledovanie vliyaniya tekhnicheskogo sostoyaniya elektrogidravlicheskiy forsunok na toplivnuyu ekonomichnost' avtomobilya s dizel'nyy dvigatelem, osnashhennym akumul'yatornoy toplivopodayushhey sistemoy] / S. N. Krivtsov, V. G. Zimin, T. I. Krivtsova, I. V. Yakimov // Trudy NAMI. 2017. No. 1 (268). Pp. 29–36. ISSN 0135–3152.
9. Krivtsov S. N., Syrbakov A. P., Korchuganova M. A. Measuring of traction and speed characteristics as well as of fuel economy of a car in road conditions // Innovative technologies in engineering: proceedings of VII International scientific and practical conference. 2016. Vol. 142. No. 1. P. 012101. DOI: 10.1088/1757–899X/142/1/012101.
10. GOST R 54810–2011. Motor vehicles. Fuel economy. Test methods [Avtomobil'nye transportnye sredstva. Toplivnaya ekonomichnost'. Metody ispytaniy]. Moscow : Standardinform, 2012. 23 p.

Объем статьи 0,55 авторских листа

УДК 629.4.027.434:625.144.1

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

Сергей Николаевич Антропов, аспирант кафедры «Электрическая тяга» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛНООБРАЗНОГО ИЗНОСА РЕЛЬСОВ С УЧЕТОМ ТЕОРИИ ТРЕНИЯ ПАРЫ «КОЛЕСО — РЕЛЬС»

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

Sergey Nikolayevich Antropov, postgraduate student, Electric Traction Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia

## Study of rail corrugations considering «wheel — rail» friction theory

### Аннотация

Выполнен статистический анализ параметров волнообразного износа рельсов на участках эксплуатации грузовых локомотивов с тяжелым профилем пути, позволивший установить характерные зависимости появления разных по длине и глубине типов волн. Задача исследования причин, приводящих к волнообразному износу рельсов, имеет многогранный характер, в статье она рассмотрена с учетом теории трения. Это позволило определить природу возникновения волнообразного износа рельсов при помощи закономерностей изменения коэффициента сцепления. Установлено условие устойчивого равновесия системы «колесо — рельс» на основе теоремы Ляпунова. Выявлены наиболее существенные факторы, влияющие на волнообразный износ рельсов.

**Ключевые слова:** локомотив, колесо, рельс, трение, износ, волнообразный, исследование.

### Summary

The paper shows the statistical analysis of rail corrugations parameters at freight locomotives operation areas with a heavy gradient, which enabled to establish the specific dependences of the appearance of different types of corrugations in length and depth. The task to investigate the reasons leading to corrugations of rails has a multifaceted nature, in the paper it is considered taking into account the theory of friction. This allowed determining the nature of rail corrugations occurrence with the use of patterns of change in the friction coefficient. On the basis of Lyapunov's theorem the authors established the condition of stable balance of the «wheel — rail» system. As a result, the authors revealed the most significant factors influencing corrugations of rails.

**Keywords:** locomotive, wheel, rail, friction, wear, corrugated, study.

DOI: 10.20291/1815-9400-2019-1-86-89

В последнее время на полигоне Свердловской железной дороги, в частности на участках с тяжелым профилем пути, большие проблемы создает волнообразный износ рельсов. Протяженность таких участков в 2018 г. превысила 1000 км, и с учетом снижения объема работ по шлифовке рельсов можно спрогнозировать не только расширение полигона эксплуатации с волнообразным износом рельсов, но и саму величину износа. Следует отметить, что причина возникновения участков с волнообразным износом рельсов имеет комплексный характер. Здесь наряду с механическим и термодинамическим взаимодействием колеса и рельса немаловажную роль играют конструктивные особенности подвижного состава и процессы управления тяговым приводом.

В апреле–мае 2017 г. в ходе опытных поездок на грузонапряженном участке между станциями Шаля — Подволошная, имеющем верхнее строение пути среднего типа, был определен волнообразный износ рельсов. Полученный массив данных — 696 значений параметров глубины волн — позволил составить классификацию волн по виду износа рельсов (табл. 1).

Таблица 1

Классификация волн по виду износа рельсов

Тип волн	Диапазон глубины волны, мм
Длинные	0,15–0,45
Средние	0,10–0,48
Короткие	0,03–0,23

На основе статистических данных в соответствии с методикой [1] были построены гистограммы плотности распределения относительной частоты по диапазонам глубины для каждого типа волн (рис. 1–3).

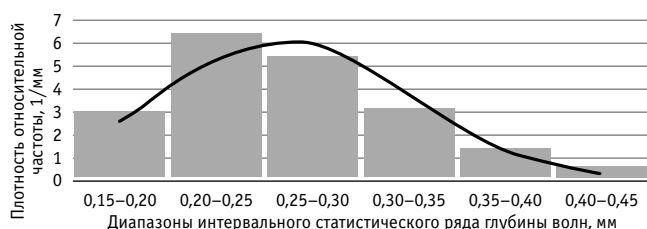


Рис. 1. Гистограмма плотности относительной частоты по диапазонам глубины длинных волн

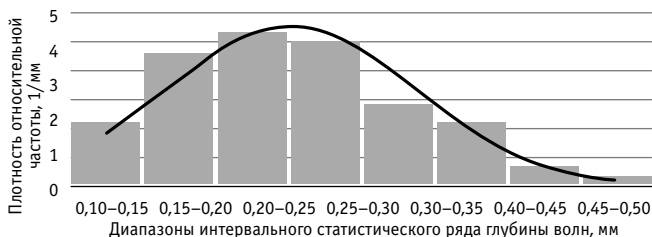


Рис. 2. Гистограмма плотности относительной частоты по диапазонам глубины волн средней длины

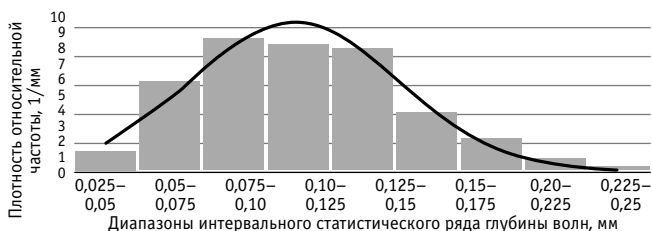


Рис. 3. Гистограмма плотности относительной частоты по диапазонам глубины коротких волн

Исходя из вида гистограмм и того, что рассчитанные значения асимметрии и эксцесса близки к нулю, генеральная совокупность глубины волн поддается закону нормального распределения. Следовательно, распределение плотности относительной частоты значений глубины волн можно представить в виде теоретического закона распределения.

Согласно «правилу трех сигм ( $3\sigma$ )», вероятность возникновения волн, выходящих за пределы  $\bar{x}_B \pm 3\sigma$ , равна 0. Таким образом, целесообразно рассматривать диапазоны глубины волн по закону нормального распределения в диапазоне значений от  $\bar{x}_B - 3\sigma$  до  $\bar{x}_B + 3\sigma$ :

$$f(x) = \frac{1}{\sigma_B \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x - \bar{x}_B)^2}{2\sigma_B^2}}. \quad (1)$$

На основе анализа гистограмм и их теоретических адаптированных кривых можно сделать вывод, что наибольшую вероятность возникновения имеют волны с глубиной  $\bar{x}_B$ .

В свою очередь, природа возникновения волнообразного износа рельсов носит неоднозначный характер. К числу наиболее существенных факторов образования различных по длине и глубине типов волн относится механическое взаимодействие между колесом локомотива и рельсом, которое обусловлено при-

родой появления сил сцепления под влиянием внешних возмущений. Показателями процесса взаимодействия в паре «колесо — рельс», касательных сил на площадке контакта колеса и рельса с учетом конструктивных и эксплуатационных особенностей локомотива являются коэффициент трения, сила крива и коэффициент сцепления. Однако на практике обычно принято использовать только коэффициент сцепления.

При эксплуатации локомотивов в составе поездов повышенной массы на участках с тяжелым профилем пути, требующим реализации максимальных тяговых усилий для обеспечения провозной способности, часто наблюдается срыв сцепления и, как следствие, боксование колесных пар.

В настоящее время стремятся полностью использовать силу тяги локомотива при его движении с максимально возможной массой состава. При этом значение коэффициента сцепления находится на пределе, что порождает ряд проблем, связанных с износом поверхности катания колеса и рельса, в том числе неравномерного и волнообразного характера.

Зависимость относительного коэффициента сцепления можно записать как

$$\psi = \frac{F_{сц}}{P}, \quad (2)$$

где  $F_{сц}$  — сила сцепления колеса с рельсом, кН;

$P$  — номинальная нагрузка колесной пары, кН.

С учетом того что вертикальная нагрузка на колесную пару в режиме движения может меняться в диапазоне  $\pm 5\%$ , относительный коэффициент сцепления также подвержен изменениям. В [2] профессор Г. В. Самме «условно» разделяет коэффициент сцепления на: реализуемый (который достигается в процессе эксплуатации локомотива) и потенциальный (возможный, предельный), соответствующий полной силе трения покоя для конкретных условий взаимодействия пары «колесо — рельс». Согласно [2], при развитии процесса боксования с увеличением скорости скольжения колесной пары коэффициент сцепления после некоторого снижения начинает расти (рис. 4) и в какой-то момент превышает предельную (потенциальную) величину.

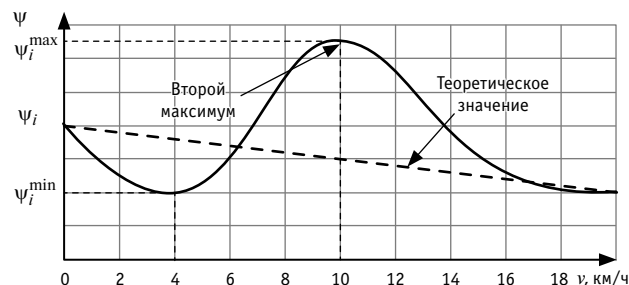


Рис. 4. Зависимость относительного коэффициента сцепления от скорости скольжения колесной пары

Важным показателем в теории трения является устойчивость системы в процессе движения колесно-моторных блоков при качении со скольжением колесной пары. Под устойчивостью понимается свойство системы возвращаться к состоянию установившегося равновесия после устранения возмущения, нарушившего равновесие [3].



Рассмотрим «устойчивость» системы через следующую зависимость:

$$\psi_i = f_i(v), \dots, f_n(v), \quad (3)$$

где  $v$  — скорость скольжения колесной пары, км/ч (при  $v = v_0$  — режим движения без боксования).

Изменив начальные условия и дав им незначительные приращения  $\sigma$ , получим некоторое возмущенное движение:

$$\psi_i = f_i(v_0) + \sigma_i, \dots, f_n(v) + \sigma_n. \quad (4)$$

Если обозначить возмущенное движение как  $\psi_i(v)$ , а невозмущенное движение как  $f_i(v)$ , тогда их вариацию можно записать следующим образом:

$$x_i = \psi_i(v) - f_i(v). \quad (5)$$

Условие устойчивого невозмущенного движения, представляющего собой стремление системы возвращаться к состоянию установившегося равновесия после некоторого возмущения, будет соблюдаться при

$$\lim_{v \rightarrow \infty} \sum x_i^2(v) = 0. \quad (6)$$

При устойчивом движении локомотива и некотором незначительном возмущении разницу между траекторией невозмущенного и возмущенного движения стремятся сократить. Таким образом, при небольших значениях скорости скольжения (отклонения от ее минимального значения) колесной пары система имеет стабилизирующий характер. В данном случае можно принять, что критерием устойчивости невозмущенного движения колесно-моторного блока локомотива в равновесном режиме, согласно второй теореме Ляпунова об асимптотической устойчивости [4], может служить неравенство

$$\left( \frac{\partial F_m}{\partial v} - \frac{\partial F_{\text{сц}}}{\partial v} \right) > 0, \quad (7)$$

где  $F_m$  — сила сцепления, обусловленная крутящим моментом тягового двигателя.

Один из основных показателей, характеризующих коэффициент сцепления, — тип тягового привода. Как показывает опыт эксплуатации, наиболее предпочтительным для реализации максимальных потенциальных тяговых свойств по сцеплению колеса и рельса является применение асинхронного тягового привода с жесткой тяговой характеристикой силы сцепления, при которой соблюдается зависимость

$$\frac{\partial F_m}{\partial v} \geq \frac{\partial F_{\text{сц}}}{\partial v}. \quad (8)$$

Из формулы (8) следует, что локомотивы с жесткой тяговой характеристикой нередко эксплуатируются на пределе реализации коэффициента сцепления, что может вызвать

кратковременное превышение его номинального значения и, как следствие, переход колесной пары в режим боксования. При этом исходя из условий осевой нагрузки диапазон изменения силы сцепления имеет вид

$$F_{\text{сц}}(\psi) - \delta \leq F_{\text{сц}}(\psi) \leq F_{\text{сц}}(\psi) + \delta, \quad (9)$$

где  $\delta$  — некоторое отклонение от номинального значения силы сцепления.

Наглядно это условие представлено на рис. 5.

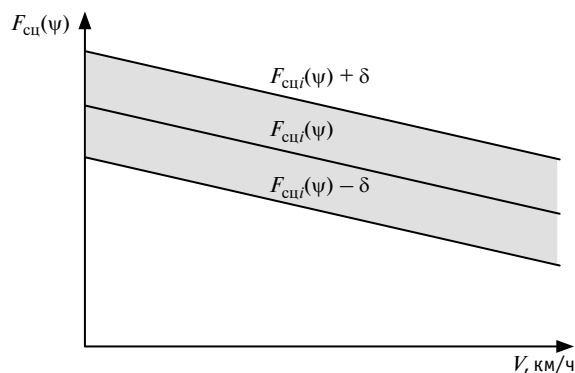


Рис. 5. Диапазоны изменения силы сцепления относительно номинального значения

С учетом стремления системы к возврату в положение устойчивого движения любое отклонение от номинального значения можно охарактеризовать как асимптотически устойчивое. Таким образом, можно утверждать, что данное положение системы стремится к своему равновесному состоянию:

$$\lim_{\delta \rightarrow 0} \delta(\psi) = 0. \quad (10)$$

Однако на практике для получения наибольших тяговых усилий при заданных параметрах локомотива стремятся перейти на верхний диапазон характеристики сцепления  $[F_{\text{сц}}(\psi) + \delta$  на рис. 5] путем искусственного завышения коэффициента сцепления. Этот функционал удается достигнуть за счет реализации тонких настроек системы управления асинхронным тяговым приводом, основанных на вышеописанной теории.

Характер установленной зависимости коэффициента сцепления  $\psi(v)$  следующий. После срыва сцепления (начало процесса боксования) при  $v > v_0$  коэффициент сцепления снижается экспоненциально относительно роста скорости скольжения до значений, сопоставимых с математическим ожиданием  $v = 4$  км/ч. При увеличении скорости скольжения до 10 км/ч коэффициент сцепления растет и начинает превышать свое теоретическое значение. Дальнейшее развитие боксования снижает коэффициент сцепления до минимальных значений. Таким образом, по данной характеристике можно увидеть, что имеет место второй максимум на кривой зависимости  $\psi(v)$ .

Следовательно, в процессе эксплуатации локомотивов с асинхронным тяговым приводом при использовании максимальных его тяговых свойств [5, 6] необходимо управлять

характеристикой сцепления боксующей колесной пары. Такое управление можно осуществить за счет разработки соответствующего алгоритма и обеспечить верхний диапазон характеристики сцепления. При этом возникают самозатухающие процессы боксования, вызывающие значительное увеличение потенциального коэффициента сцепления [2].

Рассмотренные механизмы управления асинхронным тяговым приводом, с одной стороны, способствуют повышению провозной способности и максимальному использованию потенциала локомотива. С другой стороны, движение с постоянными кратковременными переходами в режим боксования каждой колесной парой по отдельности провоцирует возникновение на поверхности рельсов различных (в зависимости

от скорости движения, скорости скольжения колеса по рельсу и нагрузки со стороны экипажной части локомотива) по длине и глубине волн.

Чтобы оценить, в какой степени отклонения коэффициента сцепления от его номинальной (теоретической) величины влияют на взаимодействие колеса и рельса при скольжении колесной пары, целесообразно выполнить математическое моделирование тягового привода с привязкой к системе управления, а также определить параметры воздействия колеса на рельс в точке второго максимума коэффициента сцепления. Это позволит на стадии разработки асинхронного тягового привода проанализировать устойчивость системы и спрогнозировать вероятность возникновения волнообразного износа рельсов.

## Литература

1. Основы статистического анализа. Практикум по статистическим методам и исследованию операций с использованием пакетов STATISTICA и EXCEL : учеб. пособие ; 2-е изд. М. : ФОРУМ, 2008. 464 с.
2. Самме Г. В. Фрикционное взаимодействие колесных пар локомотива с рельсами. Теория и практика сцепления локомотива : моногр. М. : УМЦ ЖДТ, 2014. 104 с.
3. Минов Д. К. Повышение тяговых свойств электровозов и тепловозов с электрической передачей. М. : Транспорт, 1965. 267 с.
4. Демидович Б. П. Лекции по математической теории устойчивости. М. : Наука, 1967. С. 240–246.
5. Антропов С. Н., Буйносов А. П. О концепции развития универсальной платформы для локомотивов нового поколения // Научно-технический вестник Поволжья. 2018. № 3. С. 22–24. ISSN 2079–5920.
6. Наговицын В. С., Буйносов А. П., Антропов С. Н. Выбор технологии восстановления работоспособности узлов подвижного состава с учетом минимума затрат при условии обеспечения требуемого уровня надежности // Научно-технический вестник Поволжья. 2019. № 1. С. 59–61. ISSN 2079–5920.

## References

1. Fundamentals of statistical analysis. Educational aid on statistical methods and operations research using the packages STATISTICA and EXCEL [Osnovy statisticheskogo analiza. Praktikum po statisticheskim metodam i issledovaniyu operatsiy s ispol'zovaniem paketov STATISTICA i EXCEL] : textbook ; 2<sup>nd</sup> ed. Moscow : FORUM, 2008. 464 p.
2. Samme G. V. Friction interaction of locomotive wheelsets with rails. Theory and practice of locomotive friction [Friksionnoe vzaimodeystvie kolesnykh par lokomotiva s rel'sami. Teoriya i praktika stsepleniya lokomotiva] : monograph. Moscow : UMTs ZhDT, 2014. 104 p.
3. Minov D. K. Increase of haulage performance of electric locomotives and diesel locomotives with electric transmission [Povyshenie tyagovykh svoystv elektrovozov i teplovozov s elektricheskoy peredachey]. Moscow : Transport, 1965. 267 p.
4. Demidovich B. P. Lectures on mathematical theory of stability [Leksii po matematicheskoy teorii ustoychivosti]. Moscow : Science, 1967. С. 240–246.
5. Antropov S. N., Buinosov A. P. On the development of universal platforms for new generation locomotives [O kontseptsii razvitiya universal'noy platformy dlya lokomotivov novogo pokoleniya] // Scientific and Technical Volga region Bulletin. 2018. No. 3. Pp. 22–24. ISSN 2079–5920.
6. Nagovitsyn V. S., Buinosov A. P., Antropov S. N. The choice of technology for restoration of knots of rolling stock taking into account the minimum cost while ensuring the required level of reliability [Vybory tekhnologii vosstanovleniya rabotosposobnosti uzlov podvizhnogo sostava s uchetom minimuma zatrat pri uslovii obespecheniya trebuemogo urovnya nadezhnosti] // Scientific and Technical Volga region Bulletin. 2019. No 1. Pp. 59–61. ISSN 2079–5920.

Объем статьи 0,43 авторских листа

УДК 621.316.12:621.332.3

Андрей Борисович Батрашов, аспирант кафедры «Электроснабжение транспорта»

Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,

Александр Викторович Паранин, 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

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРОТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В КОНТАКТНОЙ ПОДВЕСКЕ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Andrey Borisovich Batrashov, postgraduate student, Transport Power Supply Department,

Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,

Alexander Viktorovich Pararin, 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

## Improvement of mathematical model for calculation of electrothermal processes in a DC catenary suspension

### Аннотация

Задача электротеплового расчета состоит в том, чтобы обеспечить выполнение требований по нагреву проводов в режимах транзита тягового тока и прохода токоприемника. В статье рассмотрена математическая модель электротеплового расчета контактной подвески постоянного тока, позволяющая учитывать неравномерный по длине износ провода, арматуру контактной сети, пространственную геометрию соединения проводов, а также нагрев провода от токоприемника.

Предлагаемая модель может быть использована при обосновывающих расчетах пропуска поездов повышенной массы, выявлении узких мест в контактной подвеске постоянного тока по нагреву, а также повышении качества ее тепловизионной диагностики.

**Ключевые слова:** токораспределение, контактная подвеска, постоянный ток, метод конечных элементов, средняя анкеровка, распределение температуры.

### Summary

The task of electrothermal calculation is to ensure that the requirements for heating of wires in the modes of transit of traction current and passing of current collector are met. The paper considers a mathematical model for electrothermal calculation of a DC catenary suspension, which makes it possible to take into account the wear of a contact wire that is uneven per length, the contact system armature, the spatial geometry of wire connection and the heating of the contact wire from the current collector.

The model proposed can be used in justifying calculations of freight trains with increased weight pass, identification of bottlenecks in the DC catenary suspension in terms of heating, as well as in improvement of thermal imaging diagnostics quality.

**Keywords:** current distribution, catenary suspension, direct current, finite element method, midpoint anchoring, temperature distribution.

DOI: 10.20291/1815-9400-2019-1-90-96

Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 г. [1] предусматривает расширение полигона обращения тяжеловесных поездов. При модернизации существующих путей или строительстве новых учитывают сложившуюся систему электроснабжения железных дорог. В период интенсивной электрификации система электроснабжения постоянного тока получила наибольшее распространение в крупнейших агломерациях страны. Так, в настоящее время в шести из десяти агломераций электроснабжение осуществляется по системе постоянного тока, при этом пять агломераций из шести являются крупнейшими в России.

Отличительная особенность системы постоянного тока — относительно низкий уровень напряжения в контактной сети (3 кВ), что приводит к высоким токовым нагрузкам. Например, ток одного грузового электровазона ЗЭС10 может достигать 4300 А. При этом допустимый транзитный ток для контактной подвески М-95+2МФ-100+2А-185 составляет от 2430 до 2750 А в зависимости от износа контактного провода. Следует полагать, что с развитием тяжеловесного движения токовые нагрузки будут увеличиваться.

Возрастающие токовые нагрузки вызывают необходимость не только увеличивать сечение контактной подвески, но и совершенствовать расчеты то-

кораспределения и нагрева проводов. Увеличение сечения контактной подвески на существующих участках возможно за счет использования проводов большего сечения или добавления усиливающих проводов. При этом обоснована возможность перехода с двойного контактного провода 2МФ-100 на одинарный БрФ-150 [2]. Как показывает практика, на Свердловской железной дороге на участках тяжеловесного движения наблюдается повышенный электромеханический износ звеньевых струн, усовиков фиксаторов и токоведущих зажимов (особенно зажимов ПАМ [3]). Из этого следует, что совершенствование электротепловых расчетов контактных подвесок постоянного тока является актуальной задачей.

В [4, 5] рассмотрены возможности применения метода конечных элементов для расчета токораспределения и нагрева проводов контактной сети. В работе [6] приведен сравнительный анализ семи известных моделей токораспределения в контактной подвеске постоянного тока, результаты которого позволяют сделать вывод, что использование конечно-элементных моделей — это наиболее перспективное направление.

При разработке модели электротеплового расчета контактной сети постоянного тока необходим учет следующих факторов:

топологии соединения проводов и геометрии контактной сети;

стационарных и нестационарных режимов нагрева проводов контактной сети (расчет нагрева для случаев транзита тягового тока, токосъема, режимов перегрузки по [7] и короткого замыкания);

параметров окружающей среды (солнечная радиация, скорость ветра, температура окружающего воздуха);

арматуры контактной сети;

нагрева контактного провода от токосъемных пластин токоприемника;

расположения расчетного анкерного участка на межподстанционной зоне.

Для построения конечно-элементной модели электротеплового расчета контактной подвески постоянного тока нами использован программный комплекс COMSOL Multiphysics, позволяющий численно решать дифференциальные уравнения в частных производных для од-

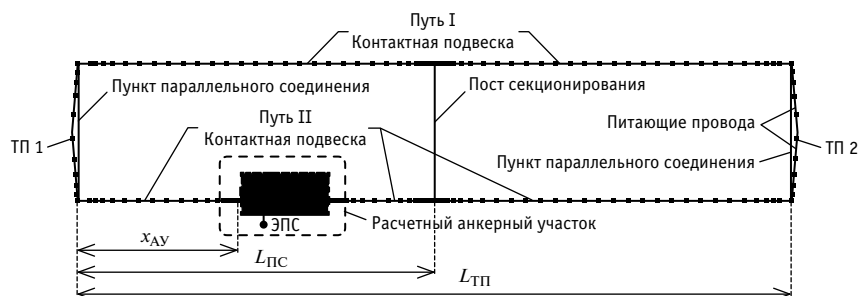
номерных объектов. Таким образом, все элементы контактной сети представлены линейными объектами, для которых искомые функции — значения температуры  $T$  и электрического потенциала  $V$  в зависимости от координаты и времени (при расчетах в нестационарных режимах).

На рис. 1 представлена геометрия межподстанционной зоны с расчетным анкерным участком. Геометрия контактной подвески пути I и части пути II, не относящейся к участку, показана упрощенно для экономии вычислительных ресурсов. Это упрощение не влияет на токораспределение между тяговыми подстан-

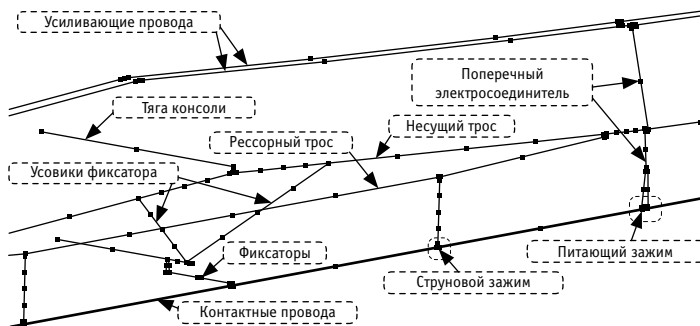
циями, так как электрические параметры подвесок пути I и части пути II полностью эквивалентны параметрам контактной подвески расчетного анкерного участка.

На рис. 2 изображен участок геометрии расчетного анкерного участка контактной сети М-95+2МФ-100+2А-185 с учетом зажимов и поддерживающей арматуры.

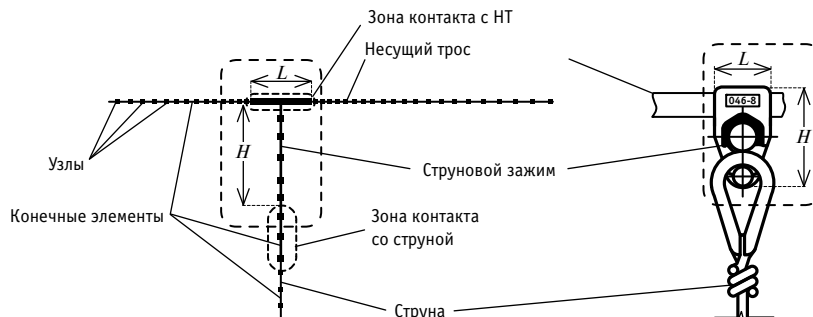
Арматура контактной сети описывается отдельными линейными участками. Рассмотрим расчетную геометрию зажимов на примере струнового и питающего, выделенных на рис. 2 и более подробно представленных на рис. 3 и 4 соответственно.



**Рис. 1. Упрощенная геометрия с расчетной конечно-элементной сеткой межподстанционной зоны для расчета контактной подвески в режиме токосъема при двустороннем питании:** ТП1 — тяговая подстанция 1; ТП2 — тяговая подстанция 2;  $x_{AY}$  — расстояние от ТП1 до расчетного участка;  $L_{PC}$  — расстояние от ТП1 до поста секционирования;  $L_{TP}$  — длина межподстанционной зоны



**Рис. 2. Геометрия контактной подвески постоянного тока с разбиением на линейные конечные элементы**



**Рис. 3. Расчетная геометрия струнового зажима:**  $L$  и  $H$  — длина и высота зажима; НТ — несущий трос

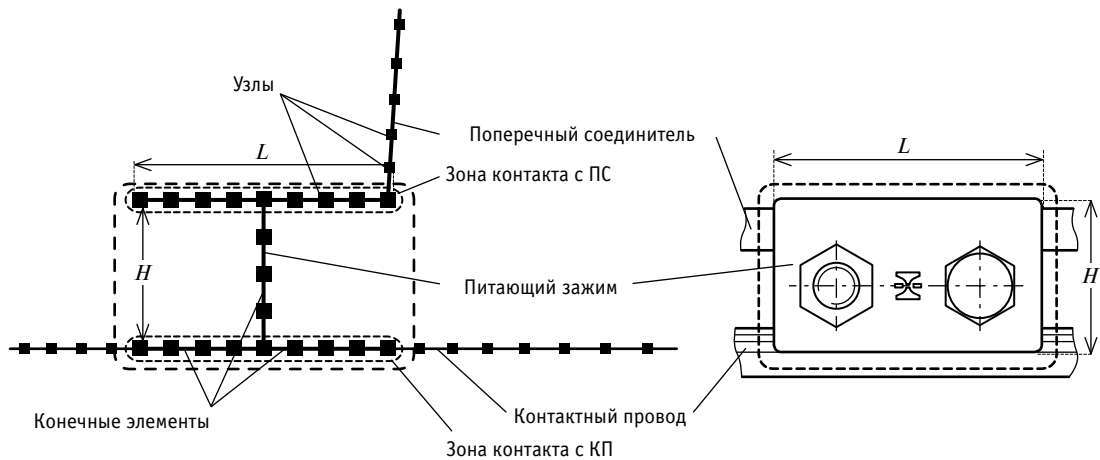


Рис. 4. Расчетная геометрия питающего зажима:

$L$  и  $H$  — длина и высота зажима; КП — контактный провод; ПС — поперечный электросоединитель

Как видно из рис. 3 и 4, в расчете используется Т- и Н-образное представление зажимов с характерными зонами контакта и самим телом зажима.

Расчетные дифференциальные уравнения для проводов, зажимов, участков их соединения, а также контакта КП с токосъемными пластинами основываются на уравнении непрерывности электрического тока и нестационарном уравнении теплового баланса.

При электротепловом расчете для проводов используется система дифференциальных уравнений

$$\begin{cases} \frac{1}{r_{\text{ПГ}}^{\text{ПР}}(T_{\text{ПР}})} \cdot \nabla^2 V_{\text{ПР}} = f_I^{\text{ЗЖМ}} - f_I^{\text{ПОЛ}}; \\ c_{\text{ПГ}}^{\text{ПР}}(T_{\text{ПР}}) \cdot \frac{\partial T_{\text{ПР}}}{\partial t} - k_{\text{ПГ}}^{\text{ПР}}(T_{\text{ПР}}) \cdot \nabla^2 T_{\text{ПР}} = \\ = q_{\text{РЕЗ}}^{\text{ПР}} + q_{\text{СЛ}}^{\text{ПР}} - q_{\text{КН}}^{\text{ПР}} - q_{\text{ЛЧ}}^{\text{ПР}} - f_Q^{\text{ЗЖМ}} + f_Q^{\text{ПОЛ}}, \end{cases} \quad (1)$$

где  $r_{\text{ПГ}}^{\text{ПР}}(T_{\text{ПР}})$  — погонное сопротивление провода в зависимости от температуры, Ом/м;

$T_{\text{ПР}}$  — температура провода, К;

$V_{\text{ПР}}$  — электрический потенциал провода, В;

$f_I^{\text{ЗЖМ}}$  — погонный источник тока на участке соединения провода и зажима, А/м;

$f_I^{\text{ПОЛ}}$  — погонный источник тока в контакте КП и токосъемных пластин, А/м;

$c_{\text{ПГ}}^{\text{ПР}}(T_{\text{ПР}})$  — погонная теплоемкость провода в зависимости от температуры, Дж/(м·К);

$k_{\text{ПГ}}^{\text{ПР}}(T_{\text{ПР}})$  — погонная теплопроводность провода в зависимости от температуры, Вт·м/(К);

$q_{\text{РЕЗ}}^{\text{ПР}}$  — погонный резистивный поток тепла в проводе, Вт/м;

$q_{\text{СЛ}}^{\text{ПР}}$  — погонный поток солнечной радиации, воздействующей на провод, Вт/м;

$q_{\text{КН}}^{\text{ПР}}$  — погонный конвективный поток тепла с поверхности провода, Вт/м;

$q_{\text{ЛЧ}}^{\text{ПР}}$  — погонный лучистый поток тепла с поверхности провода, Вт/м;

$f_Q^{\text{ЗЖМ}}$  — погонный источник тепла на участке соединения провода и зажима, Вт/м;

$f_Q^{\text{ПОЛ}}$  — погонный источник тепла в контакте «контактный провод — токосъемные пластины», Вт/м.

Расчет для зажимов выполняется на основе системы дифференциальных уравнений

$$\begin{cases} \frac{1}{r_{\text{ПГ}}^{\text{ЗЖМ}}(T_{\text{ЗЖМ}})} \cdot \nabla^2 V_{\text{ЗЖМ}} = -f_I^{\text{ЗЖМ}}; \\ c_{\text{ПГ}}^{\text{ЗЖМ}}(T_{\text{ЗЖМ}}) \cdot \frac{\partial T_{\text{ЗЖМ}}}{\partial t} - k_{\text{ПГ}}^{\text{ЗЖМ}}(T_{\text{ЗЖМ}}) \cdot \nabla^2 T_{\text{ЗЖМ}} = \\ = q_{\text{РЕЗ}}^{\text{ЗЖМ}} + q_{\text{СЛ}}^{\text{ЗЖМ}} - q_{\text{КН}}^{\text{ЗЖМ}} - q_{\text{ЛЧ}}^{\text{ЗЖМ}} + f_Q^{\text{ЗЖМ}}, \end{cases} \quad (2)$$

где  $r_{\text{ПГ}}^{\text{ЗЖМ}}(T_{\text{ЗЖМ}})$  — погонное сопротивление зажима в зависимости от температуры, Ом/м;

$T_{\text{ЗЖМ}}$  — температура зажима, К;

$V_{\text{ЗЖМ}}$  — электрический потенциал зажима, В;

$c_{\text{ПГ}}^{\text{ЗЖМ}}(T_{\text{ЗЖМ}})$  — погонная теплоемкость зажима в зависимости от температуры, Дж/(м·К);

$k_{\text{ПГ}}^{\text{ЗЖМ}}(T_{\text{ЗЖМ}})$  — погонная теплопроводность зажима в зависимости от температуры, Вт·м/(К);

$q_{\text{РЕЗ}}^{\text{ЗЖМ}}$  — погонный резистивный поток тепла в зажиме, Вт/м;

$q_{\text{СЛ}}^{\text{ЗЖМ}}$  — погонный поток солнечной радиации, воздействующей на зажим, Вт/м;

$q_{\text{КН}}^{\text{ЗЖМ}}$  — погонный конвективный поток тепла с поверхности зажима, Вт/м;

$q_{\text{ЛЧ}}^{\text{ЗЖМ}}$  — погонный лучистый поток тепла с поверхности зажима, Вт/м.

Для участков соединения проводов и зажимов применяются уравнения теплового и электрического контакта, описываемые системой

$$\begin{cases} \frac{V_{\text{ПР}} - V_{\text{ЗЖМ}}}{R_{\text{П}} \cdot l_{\text{ЗЖМ}}} = f_I^{\text{ЗЖМ}}, \\ \frac{h_{\text{С}} \cdot S_{\text{ЗЖМ}}}{l_{\text{ЗЖМ}}} \cdot (T_{\text{ПР}} - T_{\text{ЗЖМ}}) = f_Q^{\text{ЗЖМ}}, \end{cases} \quad (3)$$

где  $R_{\text{П}}$  — переходное сопротивление между проводом и зажимом, Ом;

$l_{\text{ЗЖМ}}$  — длина соединения провода и зажима, м;

$h_{\text{С}}$  — контактная теплопроводность между проводом и зажимом, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$S_{\text{ЗЖМ}}$  — кажущаяся площадь контакта провода и зажима, м<sup>2</sup>.

Расчет нагрева токосъемных пластин в режиме движения электроподвижного состава (ЭПС) по расчетному анкерному участку, а также тепловой контакт токосъемных пластин с КП описывается системой уравнений

$$\begin{cases} c_{\text{ПОЛ}}(T_{\text{ПОЛ}}) \cdot \frac{\partial T_{\text{ПОЛ}}}{\partial t} = (Q_{\text{РЕЗ}} + Q_{\text{ТР}}) \cdot p_{\text{ПОЛ}} + \\ + Q_{\text{РЕЗ}}^{\text{ПОЛ}} + Q_{\text{СЛ}}^{\text{ПОЛ}} - Q_{\text{КП}}^{\text{ПОЛ}} - Q_{\text{КН}}^{\text{ПОЛ}} - Q_{\text{ЛЧ}}^{\text{ПОЛ}}, \\ \frac{h_{\text{С}}^{\text{ПОЛ}} \cdot S_{\text{ПОЛ}}}{h_{\text{ПОЛ}}} \cdot (T_{\text{ПОЛ}} - T_{\text{ПР}}) = f_Q^{\text{ПОЛ}}, \end{cases} \quad (4)$$

где  $c_{\text{ПОЛ}}(T_{\text{ПОЛ}})$  — теплоемкость полоза токоприемника в зависимости от температуры, Дж/(кг·К);

$T_{\text{ПОЛ}}$  — температура токосъемных пластин, К;

$Q_{\text{РЕЗ}}$  — резистивный поток тепла в контакте «контактный провод — токосъемные пластины», Вт;

$Q_{\text{ТР}}$  — поток тепла от трения в контакте «контактный провод — токосъемные пластины», Вт;

$p_{\text{ПОЛ}}$  — доля тепла, выделяющегося в контакте «контактный провод — токосъемные пластины», приходящаяся на токосъемные пластины;

$Q_{\text{РЕЗ}}^{\text{ПОЛ}}$  — резистивный поток тепла, выделяющийся в токосъемных пластинах, Вт;

$Q_{\text{СЛ}}^{\text{ПОЛ}}$  — поток тепла солнечной радиации, воздействующий на токосъемные пластины, Вт;

$Q_{\text{КП}}^{\text{ПОЛ}}$  — поток тепла, передающийся в КП, Вт;

$Q_{\text{КН}}^{\text{ПОЛ}}$  — конвективный поток тепла от токосъемных пластин, Вт;

$Q_{\text{ЛЧ}}^{\text{ПОЛ}}$  — лучистый поток тепла с поверхности токосъемных пластин, Вт;

$h_{\text{С}}^{\text{ПОЛ}}$  — контактная теплопроводность между контактным проводом и токосъемными пластинами, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$S_{\text{ПОЛ}}$  — кажущаяся площадь контакта между контактным проводом и токосъемными пластинами, м<sup>2</sup>;

$h_{\text{ПОЛ}}$  — расчетная ширина токосъемных пластин, м.

Расчет резистивного тепловыделения, нагрева солнечной радиацией, лучистого и конвективного охлаждения элементов контактной сети выполняется в соответствии с [8].

Резистивное тепловыделение определяется согласно закону Джоуля — Ленца по формуле

$$q_{\text{РЕЗ}}^i = r_{\text{ПГ}}^i(T_i) I_i^2, \quad (5)$$

где  $i$  — индекс, относящийся к проводу (ПР) или зажиму (ЗЖМ);

$I_i$  — ток, протекающий через провод или зажим, А.

Ток рассчитывается по уравнению

$$I_i = \frac{\sqrt{\left(\frac{\partial V_i}{\partial x} + \frac{\partial V_i}{\partial y} + \frac{\partial V_i}{\partial z}\right)^2}}{r_{\text{ПГ}}^i(T_i)}. \quad (6)$$

Нагрев солнечной радиацией проводов контактной сети определяется по формуле

$$q_{\text{СЛ}} = \alpha \cdot D \cdot N_{\text{СЛ}}, \quad (7)$$

где  $\alpha$  — коэффициент поглощения солнечного излучения;

$D$  — расчетный диаметр провода, м;

$N_{\text{СЛ}}$  — поток тепла солнечной радиации, Вт/м<sup>2</sup>.

Расчет охлаждения лучеиспусканием выполняется согласно закону Стефана — Больцмана по формуле

$$q_{\text{СЛ}} = \sigma \cdot \varepsilon \cdot D \cdot \pi \cdot (T_i^4 - T_{\text{ВОЗД}}^4), \quad (8)$$

где  $\sigma$  — постоянная Стефана — Больцмана, Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>);

$\varepsilon$  — коэффициент черноты поверхности;

$T_{\text{ВОЗД}}$  — температура окружающего воздуха, К.

Конвективное охлаждение определяется следующим образом:

$$q_{\text{КН}} = \pi \cdot \lambda \cdot Nu \cdot (T - T_{\text{ВОЗД}}), \quad (9)$$

где  $\lambda$  — теплопроводность воздуха, Вт/(м·К);

$Nu$  — число Нуссельта,

$$Nu = 0,65 \cdot Re^{0,2} + 0,23 \cdot Re^{0,61}, \quad (10)$$

где  $Re$  — число Рейнольдса,

$$Re = \frac{V_{\text{ВОЗД}} \cdot D \cdot \gamma}{\eta}, \quad (11)$$

где  $V_{\text{ВОЗД}}$  — скорость окружающего воздуха, м/с;

$\gamma$  — плотность окружающего воздуха, кг/м<sup>3</sup>;

$\eta$  — динамическая вязкость окружающего воздуха, Н·с/м<sup>2</sup>.

Уравнения (7)–(11) относятся к расчету теплового потока от солнечной радиации, лучистого и конвективного теплообмена

для проводов контактной сети, поперечное сечение которых представляется в виде круга. Аналогичные величины при расчете зажимов приводятся к длине линий, которыми они описаны (см. рис. 3 и 4), с учетом того, что поперечное сечение зажимов представляется в виде квадрата. Так, расчет числа Нуссельта при  $500 \leq Re \leq 5000$  для зажимов контактной сети производится по формуле

$$Nu = 0,335 \cdot Re^{0,532} + Pr^{1/3}, \quad (12)$$

где  $Pr$  — число Прандтля,

$$Pr = \frac{\eta \cdot c_p}{\lambda}, \quad (13)$$

где  $c_p$  — удельная теплоемкость окружающего воздуха, Дж/(кг·К).

Формулы (9)–(13) относятся к вынужденному охлаждению проводов. Расчет при свободной или смешанной конвекции выполняется согласно [9, 10].

При расчете контактов проводов и зажимов, а также контакта между КП и токосъемными пластинами делается допущение, что тела являются твердыми и изотропными и в результате их взаимодействия возникают только упругие деформации [11]. Таким образом, контактная теплопроводность определяется по формулам:

$$h_c = 1,54 \cdot k_{\text{КОНТ}} \cdot \frac{m_{\text{asp}}}{\sigma_{\text{asp}}} \cdot \left( \frac{\sqrt{2} \cdot P}{m_{\text{asp}} \cdot E_{\text{КОНТ}}} \right)^{0,94}; \quad (14)$$

$$\frac{1}{E_{\text{КОНТ}}} = \frac{1 - \nu_1^2(T_1)}{E_1(T_1)} + \frac{1 - \nu_2^2(T_2)}{E_2(T_2)}; \quad (15)$$

$$k_{\text{КОНТ}} = \frac{2 \cdot k_1(T_1) \cdot k_2(T_2)}{k_1(T_2) + k_2(T_2)}, \quad (16)$$

где  $P$  — контактное давление, Па;

$E_{\text{КОНТ}}$  — эффективный модуль Юнга, Па;

$k_{\text{КОНТ}}$  — эффективная контактная теплопроводность, Вт/(м·К);

$m_{\text{asp}}$  — средний уклон шероховатости контактирующих поверхностей;

$\sigma_{\text{asp}}$  — средняя высота шероховатости контактирующих поверхностей, м;

$E_1, E_2$  — модули Юнга контактирующих поверхностей, Па;

$T_1, T_2$  — температуры контактирующих поверхностей, К;

$\nu_1, \nu_2$  — коэффициенты Пуассона контактирующих поверхностей;

$k_1, k_2$  — теплопроводность материалов контактирующих поверхностей, Вт/(м·К).

Переходное электрическое сопротивление контактов определяется по формуле, аналогичной формуле (14), но вместо эффективной контактной теплопроводности используется эффективная контактная электрическая проводимость:

$$r_{\text{КОНТ}} = 1,54 \cdot \sigma_{\text{КОНТ}} \cdot \frac{m_{\text{asp}}}{\sigma_{\text{asp}}} \cdot \left( \frac{\sqrt{2} \cdot P}{m_{\text{asp}} \cdot E_{\text{КОНТ}}} \right)^{0,94}, \quad (17)$$

где  $\sigma_{\text{КОНТ}}$  — эффективная контактная электрическая проводимость, С/м<sup>2</sup>,

$$\sigma_{\text{КОНТ}} = \frac{2 \cdot \sigma_1(T_1) \cdot \sigma_2(T_2)}{\sigma_1(T_1) + \sigma_2(T_2)}, \quad (18)$$

где  $\sigma_1, \sigma_2$  — электрическая проводимость материалов контактирующих поверхностей, С/м.

Как видно из рис. 5, на котором визуализированы результаты расчета нагрева проводов контактной сети в режиме токосъема (цветными линиями показана температура проводов, стрелками — направление протекающего на участке провода тока), в звеньях струн наблюдается повышенный нагрев вследствие переходного сопротивления в контакте. В местах соединения проводов и зажимов температура проводов снижается, так как зажимы выступают в роли радиаторов.

На рис. 6 представлен график зависимости температуры несущего троса (НТ), контактного (КП) и усиливающего (УП) проводов контактной сети от длины при протекании транзитного тягового тока. К линиям, отображающим геометрию контактной сети, применена цветовая шкала, соответствующая температуре проводов.

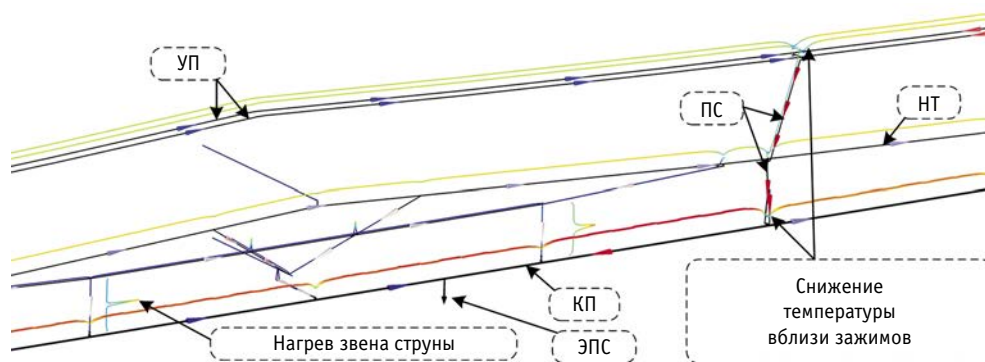


Рис. 5. Эпюры температуры проводов и направление электрического тока:

УП — усиливающий провод; ЭПС — месторасположение токоприемника электроподвижного состава

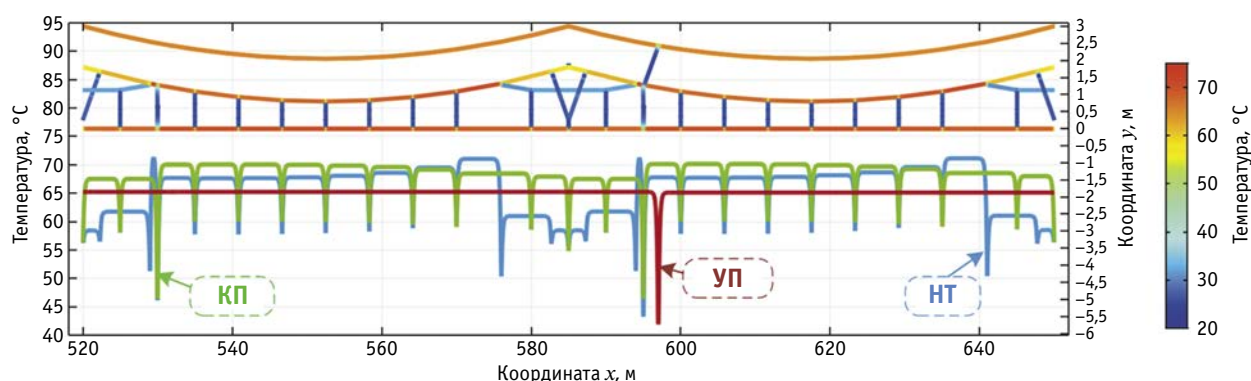


Рис. 6. Зависимость температуры проводов от длины

Таким образом, рассмотренная в статье усовершенствованная математическая модель позволяет выполнять обосновывающие расчеты:

при пропуске тяжеловесных поездов и поездов повышенной массы по существующим участкам контактной сети;

при разработке этапов ремонта, профилактики и модернизации контактных подвесок;

при разработке новых конструкций контактных подвесок.

При помощи модели можно исследовать контактные подвески на наличие мест неравномерного распределения токовой и тепловой нагрузки, а также разрабатывать и проверять технические решения по их устранению.

К числу приоритетных направлений научно-технического развития холдинга «РЖД» [12] относится развитие систем диагностики инфраструктуры железнодорожного транспорта. Один из наиболее перспективных способов — тепловизионная диагностика, которую можно проводить бесконтактно и без снятия напряжения. Предложенная математическая модель позволяет разработать методику выявления дефектных элементов при тепловизионной диагностике путем сравнения измеренных и расчетных данных для любых элементов контактной сети.

## Литература

1. Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года : утв. распоряжением Правительства Рос. Федерации от 17.06.2008 г. № 877-р // Собрание законодательства Российской Федерации. 21.07.2008. № 29. Ч. II. Ст. 3537.
2. Паранин А. В., Батрашов А. Б. Обоснование допустимости применения одинарного контактного провода взамен двойного для контактной подвески постоянного тока на основании теплового расчета // Вестник РГУПС. 2017. № 1 (65). С. 109–114. ISSN 0201–727X.
3. Григорьев В. Л., Теплякова Н. В. Исследование состояния зажимов электрических соединений контактной сети // Вестник СамГАС. 2005. № 3. С. 26–30. ISSN 2079–6099.
4. Паранин А. В. Расчет распределения тока и температуры в контактной подвеске постоянного тока на основе метода конечных элементов // Вестник ВНИИЖТ. 2015. № 6. С. 33–38. ISSN 2223–9731.
5. Паранин А. В. Совершенствование аэродинамических и тепловых расчетов проводов контактной сети на основе метода конечных элементов : дис. ... канд. техн. наук. Екатеринбург, 2011. 158 с.
6. Батрашов А. Б. Сравнение моделей токораспределения в контактных подвесках постоянного тока // Известия Транссиба. 2017. № 4 (32). С. 54–67. ISSN 2220–4245.
7. ЦЭ-868. Правила устройства и технической эксплуатации контактной сети электрифицированных железных дорог. М. : Транспорт, 2002. 184 с.

## References

1. Strategy for the development of railway transport in the Russian Federation until 2030 [Strategiya razvitiya zheleznodorozhnogo transporta v Rossiyskoy Federatsii do 2030 goda] : approved by the Order of the Government of the Russian Federation of 17.06.2008 No. 877-r // Collection of Legislative Acts of the Russian Federation. 21.07.2008. No. 29. Part. II. Paper 3537.
2. Parani A. V., Batrashov A. B. Rationale of applying a single contact wire instead of a double contact wire based on the electrical and the thermal calculations for the DC-catenary [Obosnovanie dopustimosti primeniya odinarnogo kontaktnogo provoda vzamen dvoynogo dlya kontaktnoy podveski postoyannogo toka na osnovanii teplovogo rascheta] // Vestnik RGUPS. 2017. No. 1 (65). Pp. 109–114. ISSN 0201–727X.
3. Grigoryev V. L., Teplyakova N. V. Research of catenary suspension clamps conditions [Issledovanie sostoyaniya zazhimov elektricheskikh soedineniy kontaktnoy seti] // Vestnik SamGAPS. 2005. No. 3. Pp. 26–30. ISSN 2079–6099.
4. Parani A. V. Finite-element model based distribution calculations of current and temperature within a DC overhead catenary [Raschet raspredeleniya toka i temperatury v kontaktnoy podveske postoyannogo toka na osnove metoda konechnykh elementov] // Vestnik VNIIZhT. 2015. No. 6. Pp. 33–38. ISSN 2223–9731.
5. Parani A. V. Improvement of aerodynamic and thermal calculations of catenary wires on the basis of finite element method [Sovershenstvovanie aerodinamicheskikh i teplovykh raschetov provodov kontaktnoy seti na osnove metoda konechnykh elementov] : PhD in Engineering Thesis. Ekaterinburg, 2011. 158 p.
6. Batrashov A. B. Comparison of models of current distribution in DC contact lines [Sravnenie modeley tokoraspredeleniya v kontaktnykh podveskakh postoyannogo toka] // Journal of Transsib Railway Studies. 2017. No. 4 (32). Pp. 54–67. ISSN 2220–4245.



8. IEC/TR 61597:1995. Overhead electrical conductors — Calculation methods for stranded bare conductors [Электронный ресурс]. URL: [https://www.saiglobal.com/PDFTemp/Previews/OSH/iec/iec61000/61500/iec61597\\_%7Bed1.0\\_%7Den\\_d.img.pdf](https://www.saiglobal.com/PDFTemp/Previews/OSH/iec/iec61000/61500/iec61597_%7Bed1.0_%7Den_d.img.pdf) (дата обращения: 28.09.2018).
9. Fundamentals of heat and mass transfer / F. P. Incropera, D. P. Dewitt, T. L. Bergman, A. S. Lavine; 6<sup>th</sup> ed. New York : John Wiley & Sons Ltd., 2006. 1000 p.
10. Ли В. Н., Игнатенко И. В., Слободенюк А. С. Моделирование процесса нагрева и теплоотдачи соединительных элементов тяговой сети // Вестник ВНИИЖТ. 2010. № 4. С. 24–29. ISSN 2223–9731.
11. Mikic B. B. Thermal contact conductance; theoretical considerations // International Journal of Heat and Mass Transfer. 1974. Vol. 17. Pp. 205–214.
12. Стратегия научно-технического развития холдинга «Российские железные дороги» на период до 2020 года и перспективу до 2025 года («Белая книга») [Электронный ресурс]. URL: [http://www.rzd-expo.ru/innovation/sait\\_WB.pdf](http://www.rzd-expo.ru/innovation/sait_WB.pdf) (дата обращения: 28.09.2018).
7. TsE-868. Rules of the device and technical operation of a contact line of the electric railway [Pravila ustroystva i tekhnicheskoy ekspluatatsii kontaktnoy seti elektrifitsirovannykh zheleznnykh dorog]. Moscow : Transport, 2002. 184 p.
8. IEC/TR 61597:1995. Overhead electrical conductors — Calculation methods for stranded bare conductors [Electronic resource]. URL: [https://www.saiglobal.com/PDFTemp/Previews/OSH/iec/iec61000/61500/iec61597\\_%7Bed1.0\\_%7Den\\_d.img.pdf](https://www.saiglobal.com/PDFTemp/Previews/OSH/iec/iec61000/61500/iec61597_%7Bed1.0_%7Den_d.img.pdf) (access date: 28.09.2018).
9. Fundamentals of heat and mass transfer / F. P. Incropera, D. P. Dewitt, T. L. Bergman, A. S. Lavine; 6<sup>th</sup> ed. New York : John Wiley & Sons Ltd., 2006. 1000 p.
10. Li V. N., Ignatenko I. V., Slobodenyuk A. S. Modelling of heating and heat transfer processes at connecting elements of traction circuit [Modelirovanie protsessa nagreva i teplootdachi soedinitel'nykh elementov tyagovoy seti] // Vestnik VNIIZhT. 2010. No. 4. Pp. 24–29. ISSN 2223–9731.
11. Mikic B. B. Thermal contact conductance; theoretical considerations // International Journal of Heat and Mass Transfer. 1974. Vol. 17. Pp. 205–214.
12. Strategy of scientific and technological development of JSC Russian Railways for the period up to 2020 and outlook up to 2025 (White Paper) [Strategiya nauchno-tekhnicheskogo razvitiya kholdinga «Rossiyskie zheleznye dorogi» na period do 2020 goda i perspektivu do 2025 goda («Belaya kniga»)]. [Electronic resource]. URL: [http://www.rzd-expo.ru/innovation/sait\\_WB.pdf](http://www.rzd-expo.ru/innovation/sait_WB.pdf) (access date: 28.09.2018).

Объем статьи 0,69 авторских листа

УДК 621.331:621.311.4:629.42:621.314

Евгений Юрьевич Салита, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта» Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), Омск, Россия,

Татьяна Владимировна Ковалева, кандидат технических наук, доцент кафедры «Теоретическая электротехника» Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), Омск, Россия,

Андрей Викторович Никонов, аспирант кафедры «Подвижной состав электрических железных дорог» Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), Омск, Россия

## РЕЗУЛЬТАТЫ ДИАГНОСТИКИ СИЛОВЫХ ВЕНТИЛЕЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НА ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЯХ

Evgeniy Yuryevich Salita, PhD in Engineering, Associate Professor, Electric Supply of Railway Transport Department, Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, Russia,

Tatyana Vladimirovna Kovaleva, PhD in Engineering, Associate Professor, Theoretical Electrical Engineering Department, Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, Russia,

Andrey Viktorovich Nikonov, postgraduate student, Electric Rolling Stock Department, Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, Russia

## Diagnostics results of converter power rectifiers at traction substations

### Аннотация

Надежная работа преобразователей на тяговых подстанциях невозможна без качественной и своевременной диагностики силовых вентилей. Один из наиболее точных методов, позволяющих определить не только исправность вентилей, но и дать прогноз срока их службы, — диагностирование по повторяющемуся импульсному обратному току, лежащий в основе принципа действия приборов ПОИТ и «Крона». В статье приведен анализ результатов диагностики силовых вентилей преобразователей на тяговых подстанциях Западно-Сибирской железной дороги, обоснована необходимость применения силовых таблеточных вентилей лавинного типа для повышения надежности работы и динамической устойчивости вентильных конструкций.

**Ключевые слова:** преобразователь, железнодорожный транспорт, силовые полупроводниковые вентили, диагностика, приборы, импульсный повторяющийся обратный ток, анализ результатов измерений.

### Summary

Reliable operation of railway transport converters is impossible without high-quality and timely diagnostics of the power rectifiers. One of the most accurate methods not only to determine the serviceability of rectifiers, but also to give a forecast for their service life, is the method of repetitive reverse pulse current diagnosis which is the basis of the operation principle of the reverse pulse current instrument — POIT and the one «Crown». The paper presents the power rectifiers diagnostics analysis of the West-Siberian Railway converters, the necessity of application of the avalanche type power tablet rectifiers for increasing both their work reliability and the dynamic stability of their designs is proved.

**Keywords:** power rectifiers, electric railways, power semiconductor diodes, diagnostics, devices, recurrent peak backward current, analysis of measurement results.

DOI: 10.20291/1815-9400-2019-1-97-100

К приоритетным направлениям развития электросетевого комплекса холдинга ОАО «РЖД» относятся энергоэффективность процесса преобразования, передачи и потребления электрической энергии, создание новых методик измерений и их приборного обеспечения, оценка качества и диагностики систем электроснабжения. В частности, модернизация преобразователей тягового электроснабжения постоянного тока с заменой в них штыревых вентилей на лавинные таблеточного типа является одним из путей повышения надежности этих устройств [1, 2].

В составе преобразователей используются вентильные конструкции на основе силовых полупроводниковых вентилей (диодов и тиристоров) различных типов и классов. Например, на 1 января 2018 г. в Российской Федерации на тяговых подстанциях постоянного тока электрических железных дорог эксплуатировалось 2055 выпрямителей, а также 70 инверторов и выпрямительно-инверторных преобразователей.

Общее количество полупроводниковых преобразователей, установленных на тяговых подстанциях постоянного тока Западно-Сибирской железной дороги (ЗСЖД), в 2018 г. составило 349, из них 338 — выпрямительных и 11 — выпрямительно-инверторных. Основные схемы выпрямления — 12-пульсовые, составляющие 66,9 % от общего числа (226 преобразователей). По 6-пульсовым схемам работают 112 выпрямителей, в том числе по сложной нулевой схеме параллельного типа — 50, по мостовой — 62. Один преобразователь с 24-пульсовой схемой выпрямления установлен на тяговой подстанции Омск. Вентильные конструкции на диодах штыревого типа используются в 168, а на диодах таблеточного типа — в 170 выпрямителях.

Устаревшие штыревые диоды ВЛ200, которые характеризуются высокими потерями электроэнергии, в настоящее время не выпускаются, однако именно на них выполнена почти половина преобразователей, эксплуатируемых на тяговых подстанциях.

Замена преобразователей на штыревых вентилях происходит медленно, и это привело к тому, что 93,5 % таких преобразователей вышли на третий нормативный срок эксплуатации (нормативный срок — 15 лет). Преобразователи на таблеточных вентилях стареют медленнее, но все же 70 % из них превысили нормативный срок эксплуатации (25 лет).

На ЗСЖД из числа преобразователей на штыревых вентилях срок службы 30 и более лет имеют 157 (93,5 %), от 15 до 30 лет — 9 (5,3 %), до 15 лет — 2 (1,2 %). Среди преобразователей на таблеточных вентилях у 123 (72,4 %) срок службы составляет от 25 до 50 лет, у 47 (27,6 %) — до 25 лет.

Вентильные конструкции 44 преобразователей, эксплуатируемых на ЗСЖД (13 % от общего количества), в течение последних 17 лет были модернизированы — штыревые вентили заменены таблеточными.

Кроме того, на ЗСЖД эксплуатируется 11 выпрямительно-инверторных преобразователей, из которых 8 — на штыревых вентилях старого типа (ВИПЭ-1 и ВИПЭ-2) и 3 — на таблеточных нового типа (И-ПТП и И-ПМП). При этом срок службы 30 и более лет имеют 4 (36,4 %) преобразователя, от 15 до 30 лет — 4 (36,4 %) и до 15 лет — 3 (21,2 %).

Основное преимущество лавинных вентиляй, используемых в вентильных конструкциях типа ТПЕД и В-ТПЕД, перед нелавинными состоит в большей устойчивости к перенапряжениям. Для предотвращения поверхностного пробоя, который обычно переходит в тепловой с разрушением полупроводниковой структуры, лавинные вентили имеют охранный (защитное) кольцо [3].

Виды и методики диагностики силовых вентиляй регламентируются государственными стандартами, отраслевыми правилами и инструкциями. Так, в соответствии с правилами [4], штыревые и таблеточные вентили должны проверяться по импульсному обратному току  $I_{RRM}$ , а штыревые — также и по тепловому сопротивлению. В то же время, согласно ГОСТ 24461–80 [5], проверке по току  $I_{RRM}$  подлежат все силовые вентили без разделения на штыревые и таблеточные.

Импульсный повторяющийся обратный ток  $I_{RRM}$  является, согласно [4, 5], одним из основных параметров — критериев годности таблеточных вентиляй. Импульсный обратный ток — это значение импульсного повторяющегося обратного тока в момент времени, который соответствует амплитуде максимально допустимого импульсного повторяющегося обратного напряжения.

Следует отметить, что виды и методики диагностических проверок (проверка распределения обратного напряжения между последовательно соединенными вентилями и тока между параллельными ветвями диодов или тиристоров), которые используются в настоящее время, не дают прогноз надежной работы вентиляй полупроводниковых преобразователей тяговых подстанций [6–9].

Увеличение переработки электроэнергии преобразователями тяговых подстанций, обусловленное внедрением совре-

менного подвижного состава, а также динамикой потребляемого им тока, влияет на долговечность преобразователей и их надежность. Штыревые диоды выходят из строя из-за теплового старения (перегрева). Поскольку их тепловое сопротивление увеличивается после 5–6 лет использования, измерять его необходимо. Однако предназначенные для этих целей приборы типа ИТСВ-1 производства Московского электромеханического завода в настоящее время уже не выпускаются, многие из них устарели и вышли из строя, кроме того, отсутствует методика их поверки. На ЗСЖД, например, из 11 приборов ИТСВ-1, имеющихся в наличии, 5 не работают, а 6 не проходили поверку.

Московский электромеханический завод выпускал также прибор для определения дефектных вентиляй ПДВ, который позволяет измерять обратные напряжения на вентилях, соединенных последовательно, и токи в ветвях диодов или тиристоров, соединенных параллельно. Но производство приборов ПДВ тоже прекращено, а единичные неповторяющиеся экземпляры не дают возможности проводить достоверную диагностику состояния вентиляй.

Для диагностики диодов и тиристоров в соответствии с ГОСТ 24461–80 в настоящее время научно-производственным комплексом «Крона» (Пенза) выпускаются стенды «Крона-902.01» и «Крона-902.02». С их помощью можно определять класс полупроводникового вентиля, осуществлять контроль повторяющегося импульсного тока в закрытом состоянии, обратного тока и постоянного напряжения управления. Однако тестирование вентиляй на стендах приводит к большим энергозатратам, кроме того, для работы стендам требуется неискаженное синусоидальное напряжение, следовательно, наличие дополнительного инвертора.

Дорожной электротехнической лабораторией (ДЭЛ) ЗСЖД совместно с ОмГУПС разработаны и изготовлены на основе использования современных микроселектронных элементов приборы измерения импульсных обратных токов (ПОИТ), предназначенные для диагностики силовых вентиляй. Эти приборы просты в применении, имеют низкую себестоимость и высокую точность диагностики. Их использование на тяговых подстанциях ЗСЖД позволило выявить и заменить неисправные диоды, у которых значение импульсного обратного тока превышало нормируемое, а вентили с положительной динамикой импульсного обратного тока взять под контроль.

В 2016 г. на Куйбышевской железной дороге с помощью приборов ПОИТ и «Крона-902.02» были проведены сравнительные измерения импульсных обратных токов вентиляй выпрямительного агрегата, выполненного на диодах Д553–2000–32–1,48УХЛ2. В результате обоими приборами было отбраковано 8 диодов из 48, значение импульсного обратного тока которых превысило 5 мА.

В 2018 г. на ЗСЖД с помощью приборов ПОИТ, ИТСВ и ПДВ проведена диагностика 420 вентиляй штыревой конструкции (диоды ВЛ200 с 10-го по 14-й класс) преобразователя ПВКЕ-2. При диагностике прибором ПОИТ было установлено, что у 9 вентиляй импульсный обратный ток превышает нормируемое значение 2 мА. Внутреннее тепловое сопротивление, измеренное прибором ИТСВ, показало превышение нор-

мированного значения ( $0,45\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$ ) у 15 вентилях, не входивших в число отбракованных ПОИТ. При диагностике прибором ПДВ было отбраковано 3 вентиля и один поставлен на контроль. Сопоставление данных, полученных при измерениях приборами ПОИТ и ПДВ, показало, что 6 неисправных вентилях из 9, отбракованных прибором ПОИТ, не диагностированы прибором ПДВ.

С помощью приборов ПОИТ в период с 2006 по 2018 г. на ЗСЖД было проверено 51660 диодов. В результате отбраковано 1242 (2,4 %), поставлено на контроль 297 (0,6 %). Как показали результаты испытаний по току  $I_{RRM}$ , наибольшее количество неисправностей имеют конструкции с нелавинными вентилями Д453–2000 и отсутствием RC-цепей, подключаемых к выводам вторичных обмоток преобразовательного трансформатора (рис. 1). Причем, в отличие от лавинных диодов, нелавинные могут быть повреждены даже кратковременными импульсами перенапряжений.

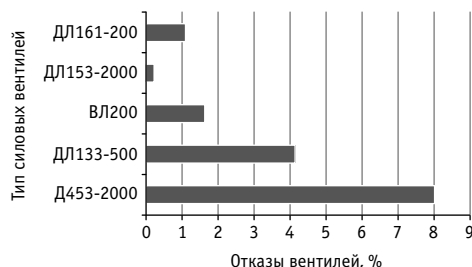


Рис. 1. Отказы в зависимости от типа вентиля

При воздействии ударных токов короткого замыкания преобразователи, созданные с использованием таблеточных вентилях, из-за отсутствия гибких выводов и пайки имеют более высокую динамическую и термическую устойчивость по сравнению с преобразователями на штыревых вентилях.

Это преимущество подтверждает, например, такой случай, который произошел в 2017 г. на одной из тяговых подстанций Куйбышевской железной дороги. Из-за пожара на подстанции был допущен сбой в графике движения поездов. Причиной возникновения пожара послужил пробой диодов на выпрямителе ПВ-2. В результате возникшего короткого замыкания произошло отгорание гибких связей, последующее замыкание на корпус шкафа и образование электрической дуги. Расчетный ток короткого замыкания составил 27 кА. Быстродействующий выключатель обратного действия БАОД ПВ-2 не отключил ток короткого замыкания по причине сваривания контактов между собой. Из-за особенностей подключения не сработала земляная защита, что стало причиной дальнейшего повреждения оборудования и возникновения пожара в помещениях ЗРУ-3,3 кВ и щитовой. Следует отметить, что аналогичный случай ранее был зафиксирован на ЗСЖД — тогда выгорел выпрямитель ПВ3-5.

Чтобы оценить динамическую устойчивость выпрямителя типа ТПЕД-3150, реализованного на диодах ДЛ133–500, и отключающую способность выключателей БАОД, на тяговых подстанциях ЗСЖД проведены экспериментальные исследования глухих коротких замыканий на выходах выпрямителей. Реальные значения ударного и установившегося токов короткого замыкания для 12-пульсовых выпрямителей последовательного и параллельного типов двух тяговых подстанций приведены на рис. 2а и 2б соответственно.

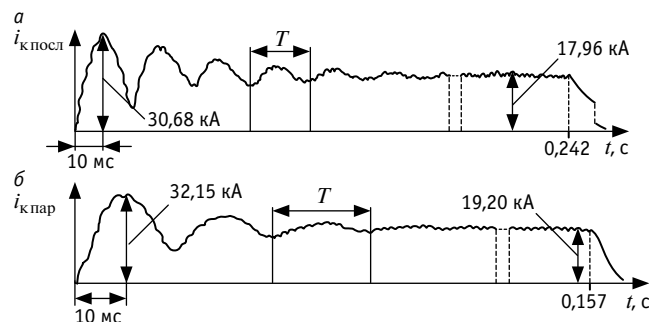


Рис. 2. Кривые токов короткого замыкания для 12-пульсовых выпрямителей последовательного (а) и параллельного (б) типов

В ходе экспериментальных исследований вентильные конструкции, созданные с использованием таблеточных вентилях, показали высокую степень динамической устойчивости, что подтвердило преимущества таблеточных вентилях перед штыревыми. У быстродействующих выключателей БАОД во время эксперимента сварились контакты, и выпрямители были отключены выключателем со стороны 10 кВ из-за превышения тока уставки максимальной токовой защиты.

Таким образом, для комплексной оценки работоспособности и срока службы силовых вентилях преобразователей тяговых подстанций необходимо применение приборов ПОИТ и «Крона», в основу которых заложен метод диагностирования по импульсному повторяющемуся обратному току, а также приборов типа ИТСВ и ПДВ, которых в настоящее время недостаточно для проведения широкомасштабного диагностирования.

В составе вентильных конструкций для повышения надежности работы и динамической устойчивости преобразователей целесообразно использовать таблеточные лавинные вентилях. При полном переходе на таблеточные вентилях необходимость диагностики теплового сопротивления отпадет, а следовательно, исчезнет потребность в приборах ИТСВ, кроме того, снизятся эксплуатационные расходы на обслуживании преобразователей.

С целью повышения эффективности системы тягового электроснабжения и минимизации капитальных вложений необходима разработка блоков на базе лавинных диодов, подобных блокам БСЕ, выпуск которых в настоящее время прекращен.

## Литература

1. Энергетическая стратегия холдинга «Российские железные дороги» на период до 2020 г. и перспективу до 2030 г. : утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 14.12.2016 г. № 2537р. М., 2016. 76 с.
2. Гапанович В. А., Епифанцев С. Н., Овсейчук В. А. Энергетическая стратегия и электрификация российских железных дорог / Под ред. Г. П. Кутового. М. : Эко-Пресс, 2012. 196 с.
3. Силовые преобразователи тяговых подстанций и электроподвижного состава : учеб. пособие / Е. Ю. Салита, Г. С. Магай, Т. В. Комякова, Т. В. Ковалева ; ОмГУПС. Омск, 2013. 131 с.
4. Об утверждении и вводе в действие Правил содержания тяговых подстанций, трансформаторных подстанций и линейных устройств системы тягового электроснабжения : распоряжение ОАО «РЖД» от 05.08.2016 г. № 1587р.
5. ГОСТ 24461–80. Приборы полупроводниковые силовые. Методы измерений и испытаний. М. : Изд-во стандартов, 1990. 64 с.
6. Салита Е. Ю., Ковалева Т. В., Никонов А. В. Диагностирование силовых вентилях преобразователей железнодорожного транспорта // Технологическое обеспечение ремонта и повышение динамических качеств железнодорожного подвижного состава : матер. III всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием. Ч. 1 / ОмГУПС. Омск, 2015. С. 49–56.
7. Салита Е. Ю., Ковалева Т. В., Никонов А. В. Диагностирование силовых вентилях преобразователей тяговых подстанций // Известия Транссиба. 2015. № 3 (23). С. 79–85. ISSN 2220–4245.
8. Прибор для диагностирования силовых вентилях преобразователей тяговых подстанций / Е. Ю. Салита, Т. В. Ковалева, Н. В. Редчиц и др. // Приборы и методы измерений, контроля качества и диагностики в промышленности и на транспорте : матер. всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием / ОмГУПС. Омск, 2013. С. 69–75.
9. Анализ технического состояния вентилях конструкций преобразователей тяговых подстанций Западно-Сибирской железной дороги / Е. Ю. Салита, Т. В. Ковалева, А. В. Никонов, А. А. Михейцев // Электроснабжение железных дорог : сб. науч. тр. / ОмГУПС. Омск, 2016. С. 27–31.

## References

1. The energy strategy of the holding Russian Railways for the period until 2020 and for the future until 2030 [Energeticheskaya strategiya kholdinga «Rossiyskie zheleznyye dorogi» na period do 2020 goda i na perspektivu do 2030 goda] : approved by Order of JSC Russian Railways dated 14.12.2016 No. 2537r. Moscow, 2016. 76 p.
2. Gapanovich V. A., Epifantsev S. N., Ovseychuk V. A. The energy strategy and electrification of Russian railways [Energeticheskaya strategiya i elektrifikatsiya rossiyskikh zheleznykh dorog] / Ed. by G. P. Kutovoy. Moscow : Eco-Press, 2012. 196 p.
3. Power converters of electric traction substations and of electric rolling stock [Silovye preobrazovateli tyagovykh podstantsiy i elektropodvizhnogo sostava] : textbook / E. Yu. Salita, G. S. Magay, T. V. Komyakova, T. V. Kovaleva ; OSTU. Omsk, 2013. 131 p.
4. On approval and introduction of Rules of traction substations, converter substations and linear facilities of traction power supply system maintenance [Ob utverzhenii i vvede v deystvie Pravil soderzhaniya tyagovykh podstantsiy, transformatornykh podstantsiy i lineynykh ustroystv sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya] : Order of JSC Russian Railways dated 05.08.2016 No. 1587r.
5. GOST 24461–80. Power semiconductor devices. Test and measurement methods [Pribory poluprovodnikovye silovye. Metody izmereniy i ispytaniy]. Moscow : Publishing House of Standards, 1990. 64 p.
6. Salita E. Yu., Kovaleva T. V., Nikonov A. V. Diagnostics of railway transport power rectifiers converters [Dagnostirovanie silovykh ventiley preobrazovateley zheleznodorozhnogo transporta] // Technological support of repair and improvement of dynamic qualities of railway rolling stock : proceedings of III All-Russian scientific and technical conference with international participation. Part 1 / OSTU. Omsk, 2015. Pp. 49–56.
7. Salita E. Yu., Kovaleva T. V., Nikonov A. V. The diagnostics of traction substations power rectifiers converters [Dagnostirovanie silovykh ventiley preobrazovateley tyagovykh podstantsiy] // Journal of Transsib Railway Studies. 2015. No. 3 (23). Pp. 79–85. ISSN 2220–4245.
8. Device for diagnostics of traction substation power rectifiers converters [Pribor dlya diagnostirovaniya silovykh ventiley preobrazovateley tyagovykh podstantsiy] / E. Yu. Salita, T. V. Kovaleva, N. V. Redchits, et al. // Devices and methods of measurements, quality control and diagnostics in industry and transport : proceedings of All-Russian scientific and technical conference with international participation / OSTU. Omsk, 2013. Pp. 69–75.
9. Technical analysis of valve designs converters in traction substations of the West-Siberian Railway [Analiz tekhnicheskogo sostoyaniya ventilykh konstruktsey preobrazovateley tyagovykh podstantsiy Zapadno-Sibirskoy zheleznoy dorogi] / E. Yu. Salita, T. V. Kovaleva, A. V. Nikonov, A. A. Mikheyteyev // Electric supply of railways : proceedings / OSTU. Omsk, 2016. Pp. 27–31.

Объем статьи 0,52 авторских листа

УДК 621.314.214.332

Борис Алексеевич Аржанников, доктор технических наук, профессор кафедры «Электроснабжение транспорта» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,

Тимофей Сергеевич Тарасовский, ассистент кафедры «Электроснабжение транспорта» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,

## МЕТОДИКА РАСЧЕТА НАПРЯЖЕНИЙ И ТОКОВ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ТРАНСФОРМАТОРА С ТИРИСТОРНО-РЕАКТОРНЫМ ПЕРЕКЛЮЧАЮЩИМ УСТРОЙСТВОМ ПРИ ПОФАЗНОМ РЕГУЛИРОВАНИИ НАПРЯЖЕНИЯ

Boris Alexeyevich Arzhannikov, DSc in Engineering, Professor, Transport Power Supply Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,

Timofey Sergeyevich Tarasovskiy, Assistant Lecturer, Transport Power Supply Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia

### Method of calculating voltages and currents of converter transformer with thyristor-reactor switching device (TRSD) for phase-by-phase voltage control

#### Аннотация

В статье дано описание работы 12-пульсового преобразовательного агрегата с тиристорно-реакторным переключательным устройством (ТРПУ) при пофазном регулировании напряжения под нагрузкой. Рассмотрены схемы подключения ТРПУ к первичной обмотке преобразовательного трансформатора в двух несимметричных режимах работы преобразовательного агрегата.

На основе проведенных теоретических исследований разработана методика расчета линейных напряжений и нагрузочных токов фаз вентильных обмоток преобразовательного трансформатора с ТРПУ в несимметричных режимах работы.

**Ключевые слова:** тяговое электроснабжение, регулирование напряжения под нагрузкой, тиристорно-реакторное переключательное устройство, пофазное регулирование, несимметричные режимы, линейные напряжения вентильных обмоток, фазные токи вентильных обмоток.

#### Summary

The paper describes the operation of a 12-pulse converter unit with a thyristor-reactor switching device for phase-by-phase on-load tap-change. The authors considered the schemes of thyristor-reactor switching device connection to the primary winding of the converter transformer in two asymmetric operating modes of the converter unit.

On the basis of theoretical studies the authors developed a method for calculating the line-to-line voltages and load currents of the valveside windings phases of the converter transformer with thyristor-reactor switching device in asymmetric operating modes.

**Keywords:** traction power supply, on-load tap-change, thyristor-reactor switching device, phase-by-phase voltage control, asymmetric modes, line-to-line voltages of valveside windings, phase currents of valveside windings.

DOI: 10.20291/1815-9400-2019-1-101-107

На Свердловской железной дороге для усиления системы тягового электроснабжения широко применяется бесконтактное автоматическое регулирование напряжения (БАРН), основанное на теории и принципе работы управляемых электромагнитных (реакторных) устройств [1]. Реакторное устройство регулирования напряжения под нагрузкой (РПН) обеспечивает плавное регулирование выпрямленного напряжения преобразовательного агрегата, что соответствует требованиям электрической тяги [2]. К недостаткам реакторных устройств РПН стоит отнести высокую стоимость, связанную с использованием электротехнической меди и стали, увеличение потребления реактивной мощности и, главное, значительные потери электроэнергии в реакторах.

С целью повышения технико-энергетических характеристик устройства РПН преобразовательного трансформатора предложена схема тиристорно-реакторного переключательного устройства (ТРПУ), а для обеспечения возможности плавного изменения значения выпрямленного напряжения используется пофазный способ регулирования.

Для проектирования преобразовательных трансформаторов с ТРПУ при пофазном регулировании напряжения разработана методика расчета линейных напряжений и нагрузочных токов фаз вентильных обмоток (ВО).

Первичная обмотка трансформатора состоит из последовательно соединенных сетевой обмотки (СО) с числом витков  $w_\beta$  и регулировочной обмотки (РО) с числом витков  $w_\alpha$  [1–3]. Начало СО подсоединено к питающей сети. К отводу первичной обмотки (в месте соединения СО и РО) подсоединен тиристорный ключ (ТК). Неуправляемый реактор (НР) соединен с концом

Р0. Концы тиристорного ключа и неуправляемого реактора объединены в одном узле и образуют нейтраль  $N$  с другими фазами трансформатора. На рис. 1 представлена электрическая схема 12-пульсового преобразовательного агрегата с ТРПУ, включающего в себя преобразовательный трансформатор, ТРПУ и 12-пульсовый выпрямитель.

В зависимости от состояния тиристорных ключей преобразовательный агрегат с ТРПУ может работать в двух симметричных режимах:

1) в каждой фазе тиристорные ключи открыты. На С0 подается фазное напряжение питающей сети, напряжение на нагрузке наибольшее. В контуре «Р0 — открытый тиристорный ключ — НР» протекает циркулирующий ток  $I_{\text{ир}}$  ограниченный сопротивлениями НР и Р0;

2) в каждой фазе тиристорные ключи закрыты. Напряжение питающей сети приложено к НР и к обмоткам С0 и Р0 трансформатора. В этом случае напряжение на нагрузке минимальное.

Подробное описание и основные соотношения симметричных режимов работы трехфазного трансформатора с ТРПУ представлены в [1, 3] и в дальнейшем рассматриваться не будут.

Пофазный способ регулирования позволяет снизить напряжение ступени регулирования в 3 раза при неизменном количестве ответвлений трансформатора [2], поэтому к двум симрежимам работы преобразовательного трансформатора с ТРПУ добавляются два несимметричных.

Несимметричные режимы работы преобразовательного трансформатора возникают при открытом тиристорном ключе в одной фазе (любой) или открытых тиристорных ключах одновременно в двух фазах (любых). Принципиальные электрические схемы соединений первичных обмоток трехфазного трансформатора представлены на рис. 2.

Рассмотрим методику расчета линейных напряжений и нагрузочных токов фаз вентильных обмоток в несимметричном режиме, когда открыт один тиристорный ключ, например, в фазе  $A$ , а в фазах  $B$  и  $C$  тиристорные ключи закрыты. Причем в первой части методики рассматривается расчет линейных напряжений вентильных обмоток, а во второй — расчет нагрузочных токов фаз вентильных обмоток.

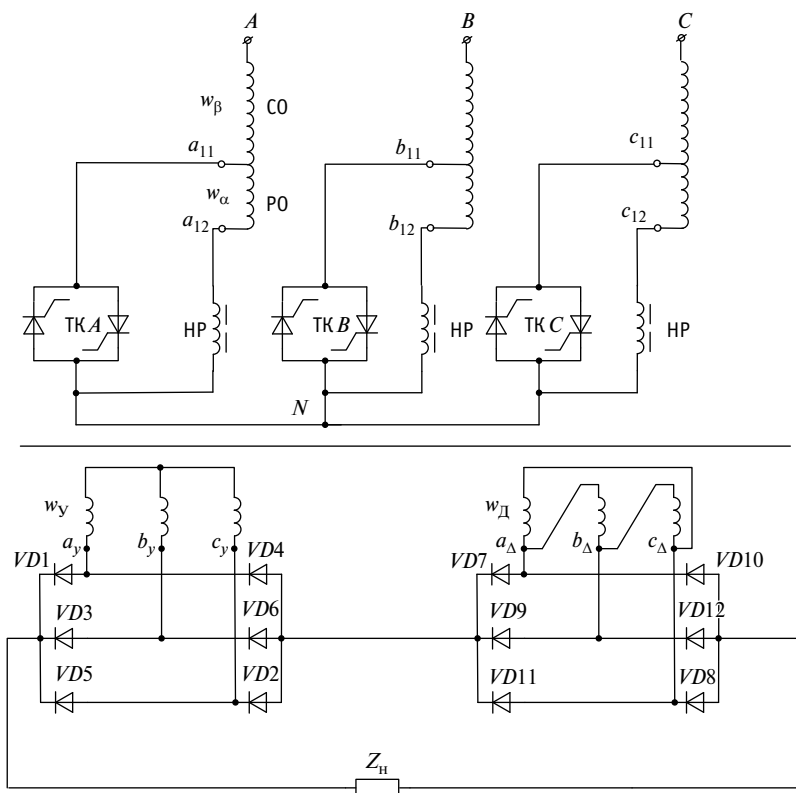


Рис. 1. Электрическая схема 12-пульсового преобразовательного агрегата с ТРПУ

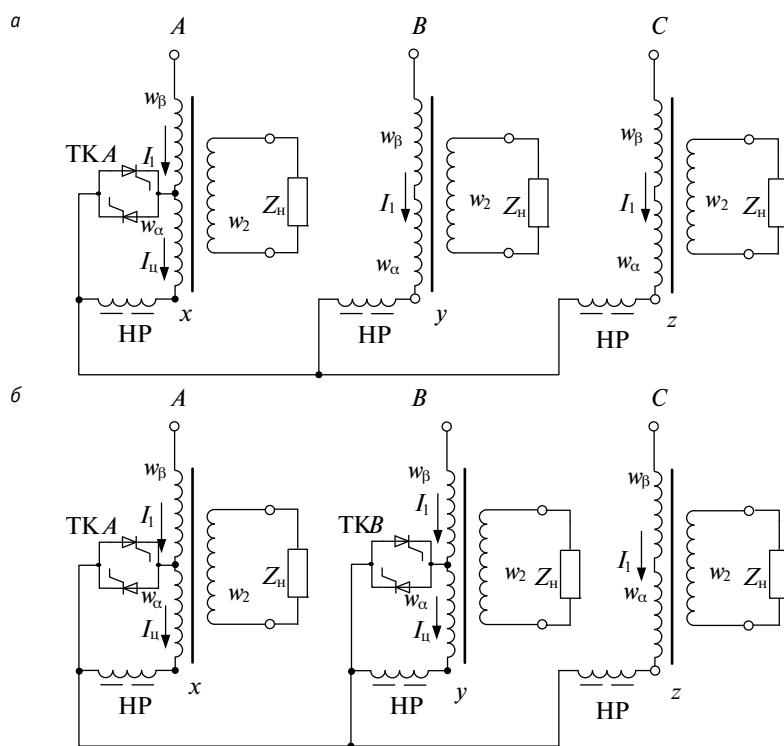


Рис. 2. Принципиальная электрическая схема соединений первичных обмоток:

а — при одном открытом тиристорном ключе (ТКА);  
б — при двух открытых тиристорных ключах (ТКА и ТКВ)

В несимметричном режиме, когда открыт один тиристорный ключ в фазе  $A$ , число витков этой фазы меньше числа витков в фазах  $B$  и  $C$ , соответственно ток ее нагрузки  $I_{1A}$  протекает через  $CO$  и тиристорный ключ, а в контуре « $PO$  — открытый тиристорный ключ фазы  $A$  —  $HP$ » протекает циркулирующий ток  $I_{II}$ . В фазах  $B$  и  $C$  (с одинаковым числом витков) ток нагрузки  $I_1$  протекает через  $CO$ ,  $PO$  трансформатора и  $HP$ .

В рассматриваемой методике сопротивление вентилей 12-пульсового выпрямителя не учитывается.

В преобразовательном трансформаторе со схемой соединения первичной обмотки «звезда» и вентильных обмоток «звезда» и «треугольник» в  $CO$  отсутствует ток и магнитный поток нулевой последовательности, в связи с чем нарушаются симметрия рабочего магнитного потока в стержнях магнитопровода, а также симметрия токов и напряжений.

Электрические схемы замещения одной фазы преобразовательного трансформатора с ТРПУ при открытом и закрытом тиристорном ключе представлены на рис. 3.

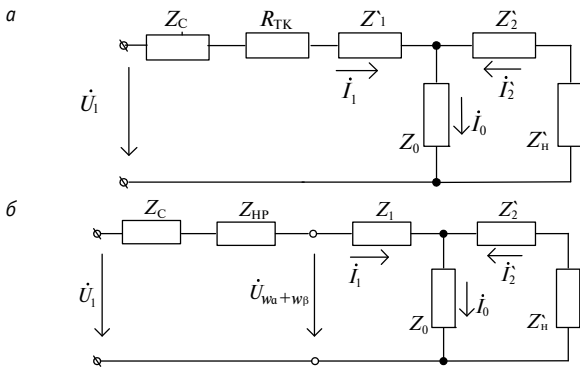


Рис. 3. Схема замещения одной фазы преобразовательного трансформатора с ТРПУ для случаев, когда тиристорный ключ в фазе открыт (а) и закрыт (б)

В соответствии с рис. 3, пренебрегая сопротивлением холостого хода трансформатора  $Z_0$ , сопротивление фазы преобразовательного трансформатора с ТРПУ рассчитываем следующим образом:

при открытом ТК (рис. 3а)

$$Z_{ПТ-ТК} = Z_C + Z_1 \frac{w_\beta}{w_1} + R_{TK} + Z_2 K_p^2 + Z_N K_p^2; \quad (1)$$

при закрытом ТК (рис. 3б)

$$Z_{ПТ-НР} = Z_C + Z_K + Z_{HP} + Z_N K_p^2, \quad (2)$$

где  $Z_C$  — полное сопротивление питающей электрической системы, Ом;

$Z_K$  — полное сопротивление короткого замыкания преобразовательного трансформатора, Ом;

$Z_1, Z_2$  — полные сопротивления первичной и вторичной обмоток преобразовательного трансформатора, Ом;

$Z_{HP}$  — полное сопротивление  $HP$ , Ом;

$Z_N$  — полное сопротивление нагрузки, Ом;

$R_{TK}$  — активное сопротивление тиристорного ключа  $TK$ , Ом;  
 $w_1, w_2$  — число витков первичной и вторичной обмоток;

$$K_p = K_\beta + \rho K_\alpha; \quad K_\beta = \frac{w_\beta}{w_2}; \quad K_\alpha = \frac{w_\alpha}{w_2}; \quad \rho = \frac{R_{TK}}{Z_\alpha + Z_{HP} + R_{TK}}.$$

Полные сопротивления фаз преобразовательного трансформатора с ТРПУ  $Z_{ПТ-ТК}, Z_{ПТ-НР}$  не равны друг другу, что обусловлено различными контурами протекания тока нагрузки в первичной обмотке преобразовательного трансформатора.

С учетом полных сопротивлений фаз преобразовательного трансформатора с ТРПУ  $Z_{ПТ-ТК}, Z_{ПТ-НР}$  расчет линейных напряжений  $U_0$  в несимметричных режимах работы преобразовательного трансформатора с ТРПУ осуществляется в три этапа.

1. На основании метода двух узлов для несимметричной трехфазной цепи, имеющей схему соединения «звезда» [4], определяются фазные напряжения  $U_1$  и фазные токи  $I_1$  с учетом несимметрии полных сопротивлений  $Z_{ПТ-ТК}, Z_{ПТ-НР}$  фаз  $A, B, C$  преобразовательного трансформатора с ТРПУ:

$$\dot{U}_N = \frac{\frac{\dot{U}_A}{Z_{ПТ-ТКА}} + \frac{\dot{U}_B}{Z_{ПТ-НРВ}} + \frac{\dot{U}_C}{Z_{ПТ-НРС}}}{\frac{1}{Z_{ПТ-ТКА}} + \frac{1}{Z_{ПТ-НРВ}} + \frac{1}{Z_{ПТ-НРС}}}; \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{1A} &= \dot{U}_A - \dot{U}_N; \quad \dot{I}_{1A} = \frac{\dot{U}_{1A}}{Z_{ПТ-ТКА}} \\ \dot{U}_{1B} &= \dot{U}_B - \dot{U}_N; \quad \dot{I}_{1B} = \frac{\dot{U}_{1B}}{Z_{ПТ-НРВ}} \\ \dot{U}_{1C} &= \dot{U}_C - \dot{U}_N; \quad \dot{I}_{1C} = \frac{\dot{U}_{1C}}{Z_{ПТ-НРС}} \end{aligned} \right\}, \quad (4)$$

где  $U_A, U_B, U_C$  — напряжения питающей сети фаз  $A, B, C, B$ ;

$U_1$  — фазное напряжение, приложенное к виткам обмоток  $w_\alpha + w_\beta$  преобразовательного трансформатора и  $HP, B$ ;

$I_1, I_2$  — фазные токи, протекающие в первичной и вторичной обмотках трансформатора,  $A$ .

2. Вычисляются фазные напряжения  $\dot{U}_{w_\alpha + w_\beta A}$  и соответствующие им линейные напряжения с учетом несимметрии полных сопротивлений  $Z_{ПТ-ТК}, Z_{ПТ-НР}$  фаз  $A, B, C$  преобразовательного трансформатора с ТРПУ:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{w_\alpha + w_\beta A} &= \dot{U}_{1A} - \dot{I}_{1A} \cdot (Z_{1A} \cdot \frac{w_\beta}{w_1} + R_{TK}) \\ \dot{U}_{w_\alpha + w_\beta B} &= \dot{U}_{1B} - \dot{I}_{1B} \cdot Z_{HP} \\ \dot{U}_{w_\alpha + w_\beta C} &= \dot{U}_{1C} - \dot{I}_{1C} \cdot Z_{HP} \end{aligned} \right\}, \quad (5)$$

где  $\dot{U}_{w_\alpha + w_\beta}$  — фазное напряжение, приложенное к виткам обмоток  $w_\alpha + w_\beta$  преобразовательного трансформатора с учетом несимметрии полных сопротивлений первичных обмоток фаз,  $B$ ,



$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{w_{\alpha}+w_{\beta}AB} &= \dot{U}_{w_{\alpha}+w_{\beta}A} - \dot{U}_{w_{\alpha}+w_{\beta}B} \\ \dot{U}_{w_{\alpha}+w_{\beta}BC} &= \dot{U}_{w_{\alpha}+w_{\beta}B} - \dot{U}_{w_{\alpha}+w_{\beta}C} \\ \dot{U}_{w_{\alpha}+w_{\beta}CA} &= \dot{U}_{w_{\alpha}+w_{\beta}C} - \dot{U}_{w_{\alpha}+w_{\beta}A} \end{aligned} \right\}. \quad (6)$$

3. Определяются линейные напряжения ВО преобразовательного трансформатора с учетом степени неравенства числа витков фаз первичной обмотки и полных сопротивлений  $Z_{ПТ-ТК}$ ,  $Z_{ПТ-НР}$  фаз  $A$ ,  $B$ ,  $C$  [5]:  
линейные напряжения ВО «звезда»

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{2abY} &= \frac{\dot{U}_{w_{\alpha}+w_{\beta}AB} \cdot w_Y \cdot q}{w_{\beta} \cdot (1+d)} \\ \dot{U}_{2bcY} &= \frac{\dot{U}_{w_{\alpha}+w_{\beta}BC} \cdot w_Y}{w_{\beta} \cdot (1+d)} \\ \dot{U}_{2caY} &= \frac{\dot{U}_{w_{\alpha}+w_{\beta}CA} \cdot w_Y \cdot q}{w_{\beta} \cdot (1+d)} \end{aligned} \right\}, \quad (7)$$

где  $d = \frac{w_{\alpha}}{w_{\beta}}$  — диапазон регулирования;

$q = \sqrt{1+d + \frac{d^2}{3}}$  — коэффициент регулирования;

линейные напряжения ВО «треугольник»

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{2ab\Delta} &= \frac{\dot{U}_{w_{\alpha}+w_{\beta}AB} \cdot w_{\Delta} \cdot q}{w_{\beta} \cdot (1+d)} \\ \dot{U}_{2bc\Delta} &= \frac{\dot{U}_{w_{\alpha}+w_{\beta}BC} \cdot w_{\Delta} \cdot q}{w_{\beta} \cdot (1+d)} \\ \dot{U}_{2ca\Delta} &= \frac{\dot{U}_{w_{\alpha}+w_{\beta}CA} \cdot w_{\Delta}}{w_{\beta}} \end{aligned} \right\}. \quad (8)$$

С использованием описанной выше методики расчета линейных напряжений ВО преобразовательного трансформатора с ТРПУ в несимметричном режиме с одним открытым тиристорным ключом в фазе  $A$  линейные напряжения ВО в несимметричном режиме с двумя открытыми тиристорными ключами в фазах  $A$  и  $B$  рассчитываются следующим образом:

линейные напряжения ВО «звезда»

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{2abY} &= \frac{\dot{U}_{w_{\alpha}+w_{\beta}AB} \cdot w_Y}{w_{\beta}} \\ \dot{U}_{2bcY} &= \frac{\dot{U}_{w_{\alpha}+w_{\beta}BC} \cdot w_Y \cdot q}{w_{\beta} \cdot (1+d)} \\ \dot{U}_{2caY} &= \frac{\dot{U}_{w_{\alpha}+w_{\beta}CA} \cdot w_Y \cdot q}{w_{\beta} \cdot (1+d)} \end{aligned} \right\}; \quad (9)$$

линейные напряжения ВО «треугольник»

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{2ab\Delta} &= \frac{\dot{U}_{w_{\alpha}+w_{\beta}AB} \cdot w_{\Delta}}{w_{\beta}} \\ \dot{U}_{2bc\Delta} &= \frac{\dot{U}_{w_{\alpha}+w_{\beta}BC} \cdot w_{\Delta}}{w_{\beta}} \\ \dot{U}_{2ca\Delta} &= \frac{\dot{U}_{w_{\alpha}+w_{\beta}CA} \cdot w_{\Delta}}{w_{\beta}} \end{aligned} \right\}. \quad (10)$$

Во второй части методики рассмотрим расчет токов ВО преобразовательного трансформатора со схемами соединения «звезда» и «треугольник» в несимметричном режиме работы ТРПУ в интервале периода  $T_{\text{в}}$  кривой выпрямленного напряжения  $U_{\text{д}}$ , который составляет половину периода кривой питающего напряжения  $T_{\text{п}}$ . Временные диаграммы выпрямленного напряжения, напряжений и токов ВО для несимметричного режима работы преобразовательного агрегата с ТРПУ с одним открытым тиристорным ключом в фазе  $A$  представлены на рис. 4, где  $i_2$  — мгновенные значения токов вентильной обмотки,  $A$ ;  $\omega t$  — текущее значение времени, рад;  $\gamma$  — угол коммутации вентилей выпрямителя, рад;  $\delta$  — угол начала короткого замыкания фаз ВО преобразовательного трансформатора, рад.

Для расчета токов ВО преобразовательного трансформатора с ТРПУ в несимметричном режиме работы необходимо привести параметры СО преобразовательного трансформатора и НР к ВО, соединенной в «звезду» и в «треугольник», по частичным коэффициентам трансформации.

Частичные коэффициенты трансформации обмоток, соединенных по схемам «звезда/звезда» и «звезда/треугольник», соответственно равны [6]:

$$K_{\rho 1} = K_{\beta 1} + \rho \cdot K_{\alpha 1}; \quad K_{\rho 2} = K_{\beta 2} + \rho \cdot K_{\alpha 2}, \quad (11)$$

где  $K_{\beta 1} = \frac{w_{\beta}}{w_{21}}$ ;  $K_{\alpha 1} = \frac{w_{\alpha}}{w_{21}}$ ;  $K_{\beta 2} = \frac{w_{\beta}}{w_{22}}$ ;  $K_{\alpha 2} = \frac{w_{\alpha}}{w_{22}}$ ;

$w_{21}$  — число витков ВО «звезда»;

$w_{22}$  — число витков ВО «треугольник».

Частичные полные сопротивления  $Z_{11}$  и  $Z_{12}$  короткого замыкания обмоток преобразовательного трансформатора и НР приведем к числу витков соответствующих ВО трансформатора по соотношениям:

$$\begin{aligned} Z_{11} &= \frac{[Z_1 + \rho Z_{\text{НР}} + R_{\text{ТК}} \cdot (1-\rho)]}{K_{\rho 1}^2} + Z_{21} \\ Z_{12} &= \frac{[Z_1 + \rho Z_{\text{НР}} + R_{\text{ТК}} \cdot (1-\rho)]}{K_{\rho 2}^2} + Z_{22}, \end{aligned} \quad (12)$$

где  $Z_{21}$  и  $Z_{22}$  — полное сопротивление короткого замыкания ВО «звезда» и ВО «треугольник» соответственно, Ом.

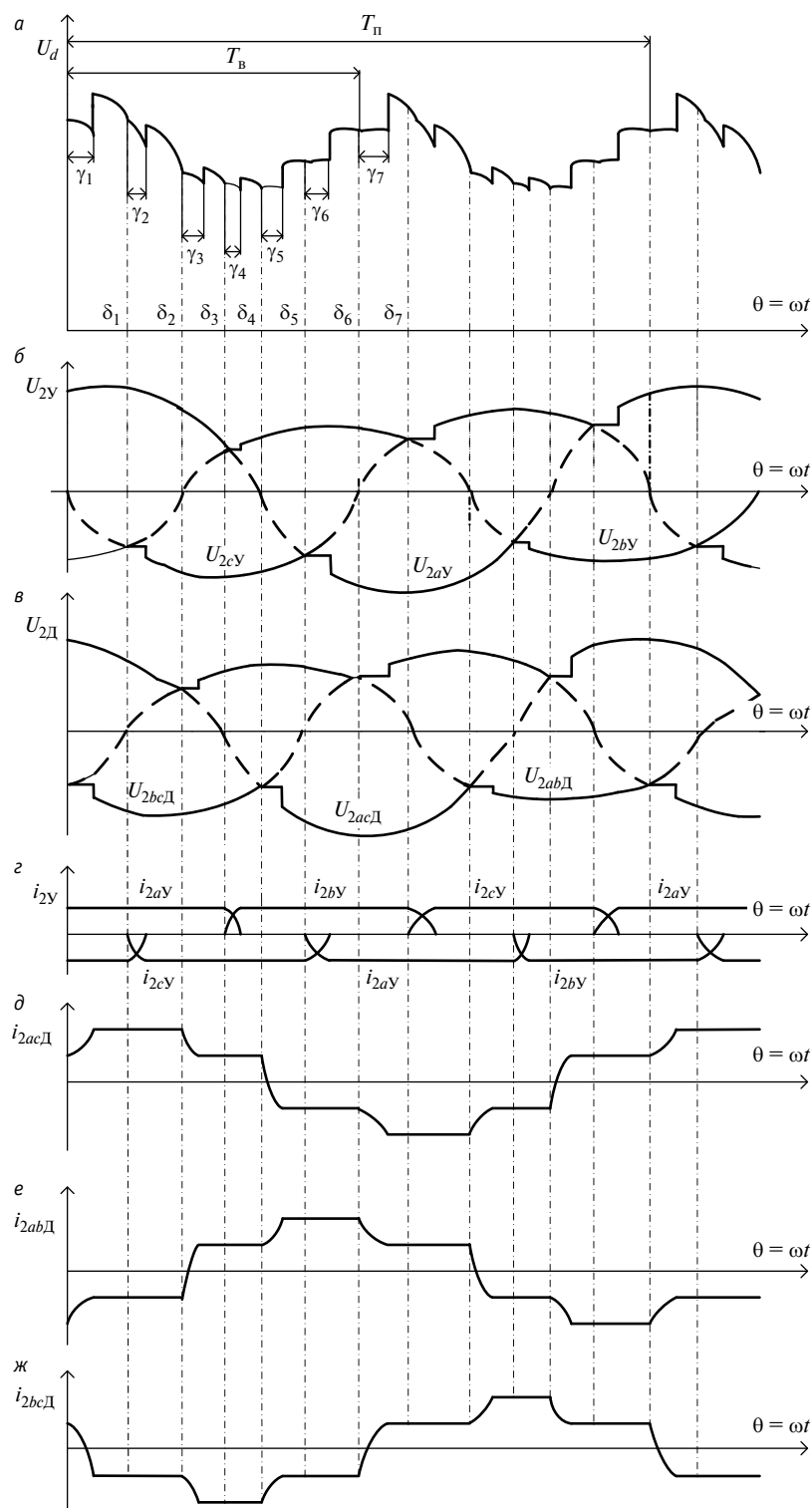


Рис. 4. Временные диаграммы выпрямленного напряжения, напряжений и токов В0 для несимметричного режима работы преобразовательного трансформатора с ТРПУ с одним открытым тиристорным ключом в фазе А:

а — форма кривой выпрямленного напряжения преобразовательного агрегата;  
б — фазные напряжения В0 «звезда»; в — линейные (фазные) напряжения В0 «треугольник»;  
г — нагрузочные токи фаз В0 «звезда»; д — нагрузочный ток фазы ас В0 «треугольник»;  
е — нагрузочный ток фазы аб В0 «треугольник»; ж — нагрузочный ток фазы bc В0 «треугольник»

После приведения параметров С0 преобразовательного трансформатора и НР к В0, соединенной в «звезду» и в «треугольник», по частичным коэффициентам трансформации электрическая схема преобразовательного агрегата преобразуется в электрическую схему замещения (рис. 5) [7].

Из кривой выпрямленного напряжения (см. рис. 4а) видно, что в момент времени  $\omega t = 0$  открывается вентиль  $VD8$  и фаза  $bc$  В0 «треугольник» оказывается замкнутой накоротко вследствие коммутации вентиля  $VD8$  и  $VD12$ .

В соответствии с [7] в интервале коммутации вентиля фаз В0 «треугольник» имеем:

$$\begin{aligned} i_d &= i_o + i_k = i_{2abД} + i_{2caД}; \\ i_p &= i_{2caД} - i_{2abД}, \end{aligned} \quad (13)$$

где  $i_d$  — выпрямленный ток коммутационного промежутка, А;

$i_p$  — разностный ток, А;

$i_o$  и  $i_k$  — ток в отключающемся и вступающем в работу (коммутирующих) тиристорах, А.

В соответствии с (13) и согласно методике, использованной в [7, 8], уравнения для мгновенных фазных нагрузочных токов В0 «треугольник» в интервале времени  $0 \div \gamma_1$ :

$$\left. \begin{aligned} i_{2caД} &= i_d + \int_0^{\gamma_1} \frac{u_{2abД} + u_{2caД}}{Z_{12ab} + Z_{12ca}} d\theta \\ i_{2abД} &= \int_0^{\gamma_1} \frac{u_{2abД} + u_{2caД}}{Z_{12ab} + Z_{12ca}} d\theta \\ i_{2bcД} &= i_d \frac{Z_{12ab} + u_{2bcД}}{\Sigma Z} + \frac{u_{2bcД}}{Z_{12bc}} \end{aligned} \right\}, \quad (14)$$

где  $\Sigma Z = Z_{12ca} + Z_{12ab} + Z_{12bc}$  — сумма полных сопротивлений короткого замыкания фаз  $ca$ ,  $ab$ ,  $bc$  преобразовательного трансформатора, приведенные к В0 «треугольник», Ом.

В В0 «звезда» в рассматриваемом интервале коммутация не происходит, ток проходит через вентили  $VD6$  и  $VD1$ , соответственно фазные токи будут равны

$$\left. \begin{aligned} i_{2aY} &= i_d \\ i_{2bY} &= -i_d \\ i_{2cY} &= 0 \end{aligned} \right\}. \quad (15)$$

Второй интервал  $\gamma_1 \div \delta_1$  — внекоммутационный. Вентиль  $VD12$  запирается, и фазные токи В0 «треугольник» равны

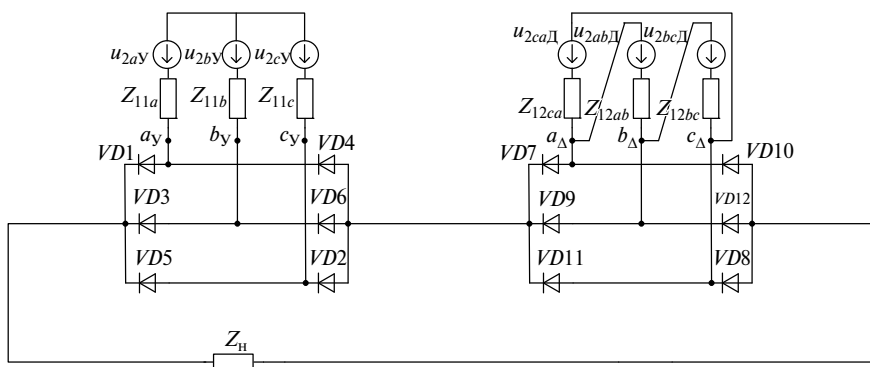


Рис. 5. Электрическая схема замещения 12-пульсового преобразовательного агрегата с ТПУ

$$\left. \begin{aligned} i_{2abD} = i_{2bcD} = -i_d \cdot \frac{Z_{12ca}}{\sum Z} \\ i_{2caD} = i_d \cdot \frac{(Z_{12ab} + Z_{12bc})}{\sum Z} \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

Фазные токи ВО «звезда» в интервале  $\gamma_1 \div \delta_1$  соответствуют системе уравнений (15).

Третий интервал времени  $\delta_1 \div \gamma_2$  соответствует коммутации тока в ВО «звезда», где фазные токи определяются по законам Кирхгофа согласно системе уравнений

$$\left. \begin{aligned} i_{2aY} = i_d \\ i_{2bY} = -i_d + \frac{(U_{2abY} + U_{2caY})}{Z_{11b} + Z_{11c}} \\ i_{2cY} = -\frac{(U_{2abY} + U_{2caY})}{Z_{11b} + Z_{11c}} \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

Фазные токи ВО «треугольник» в рассматриваемом интервале соответствуют уравнениям (16).

Интервал времени  $\gamma_2 \div \delta_2$  является внекоммутационным. Фазные токи ВО «треугольник» равны

$$i_{2acD} = i_d \cdot \frac{(Z_{12ab} + Z_{12bc})}{\sum Z} \quad (18)$$

$$i_{2abD} = i_{2bcD} = -\frac{i_d \cdot Z_{12ac}}{\sum Z}$$

Фазные токи ВО «звезда» определяются в соответствии с системой уравнений

$$\left. \begin{aligned} i_{2aY} = i_d \\ i_{2bY} = 0 \\ i_{2cY} = -i_d \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

Значения фазных токов оставшихся интервалов периода  $T_B$  определяются аналогично и приведены в табл. 1.

Таким образом, предложенная методика расчета напряжений и токов вентильных обмоток «звезда» и «треугольник» применима для проектирования преобразовательных трансформаторов с ТПУ при пофазном регулировании напряжения, в частности преобразовательных трансформаторов тяговых подстанций железных дорог постоянного тока.

Таблица 1

Значения нагрузочных токов фаз ВО в интервалах периода  $T_B$

Интервал	$i_{2caD}$	$i_{2abD}$	$i_{2bcD}$	$i_{2aY}$	$i_{2bY}$	$i_{2cY}$
$\delta_2 \div \gamma_3$	$i_d + \int_{\delta_2}^{\gamma_3} \frac{u_{2caD} + u_{2bcD}}{Z_{12bc} + Z_{12ca}} d\theta$	$-i_d \cdot \frac{Z_{12ac}}{\sum Z} + \frac{u_{2abD}}{Z_{12ab}}$	$\int_{\delta_2}^{\gamma_3} \frac{u_{2caD} + u_{2bcD}}{Z_{12bc} + Z_{12ca}} d\theta$	$i_d$	—	$-i_d$
$\gamma_3 \div \delta_3$	$\frac{i_d \cdot Z_{12bc}}{\sum Z}$	$\frac{i_d \cdot Z_{12bc}}{\sum Z}$	$\frac{-i_d \cdot (Z_{12ab} + Z_{12ca})}{\sum Z}$	$i_d$	—	$-i_d$
$\delta_3 \div \gamma_4$	$\frac{i_d \cdot Z_{12bc}}{\sum Z}$	$\frac{i_d \cdot Z_{12bc}}{\sum Z}$	$\frac{-i_d \cdot (Z_{12ab} + Z_{12ca})}{\sum Z}$	$i_d - \frac{(u_{2acY} + u_{2bcY})}{Z_{11b} + Z_{11a}}$	$\frac{(u_{2acY} + u_{2bcY})}{Z_{11b} + Z_{11a}}$	$-i_d$
$\gamma_4 \div \delta_4$	$\frac{i_d \cdot Z_{12bc}}{\sum Z}$	$\frac{i_d \cdot Z_{12bc}}{\sum Z}$	$\frac{-i_d \cdot (Z_{12ab} + Z_{12ca})}{\sum Z}$	—	$i_d$	$-i_d$
$\delta_4 \div \gamma_5$	$i_d \cdot \frac{Z_{12bc}}{\sum Z} + \frac{u_{2caD}}{Z_{12ca}}$	$i_d + \int_{\delta_4}^{\gamma_5} \frac{u_{2bcD} + u_{2abD}}{Z_{12bc} + Z_{12ab}} d\theta$	$\int_{\delta_4}^{\gamma_5} \frac{u_{2bcD} + u_{2abD}}{Z_{12bc} + Z_{12ab}} d\theta$	—	$i_d$	$-i_d$
$\gamma_5 \div \delta_5$	$-\frac{i_d \cdot Z_{12ab}}{\sum Z}$	$i_d \cdot \frac{(Z_{12bc} + Z_{12ca})}{\sum Z}$	$-\frac{i_d \cdot Z_{12ab}}{\sum Z}$	—	$i_d$	$-i_d$
$\delta_5 \div \gamma_6$	$-\frac{i_d \cdot Z_{ab}}{\sum Z}$	$i_d \cdot \frac{(Z_{12bc} + Z_{12ca})}{\sum Z}$	$-\frac{i_d \cdot Z_{12ab}}{\sum Z}$	$-\frac{(u_{2abY} + u_{2bcY})}{Z_{11c} + Z_{11a}}$	$i_d$	$-i_d + \frac{(u_{2abY} + u_{2bcY})}{Z_{11c} + Z_{11a}}$
$\gamma_6 \div \delta_6$	$-\frac{i_d \cdot Z_{12ab}}{\sum Z}$	$i_d \cdot \frac{(Z_{12bc} + Z_{12ca})}{\sum Z}$	$-\frac{i_d \cdot Z_{12ab}}{\sum Z}$	$-i_d$	$i_d$	—
$\delta_6 \div \gamma_7$	$\int_{\delta_6}^{\gamma_7} \frac{u_{2caD} + u_{2abD}}{Z_{12bc} + Z_{12ca}} d\theta$	$i_d + \int_{\delta_6}^{\gamma_7} \frac{u_{2caD} + u_{2abD}}{Z_{12bc} + Z_{12ca}} d\theta$	$-i_d \cdot \frac{Z_{12ab}}{\sum Z} + \frac{u_{2bcD}}{Z_{12bc}}$	$-i_d$	$i_d$	—

## Литература

1. Аржанников Б. А. Устройства регулирования напряжения преобразовательных трансформаторов под нагрузкой : учеб. пособие. Екатеринбург : Изд-во УрГУПС, 2017. 101 с.
2. Фишлер Я. Л., Урманов Р. Н., Пестряева Л. М. Трансформаторное оборудование для преобразовательных установок. М. : Энергоатомиздат, 1989. 320 с.
3. Тарасовский Т. С. Тиристорно-реакторное устройство регулирования напряжения под нагрузкой РПН преобразовательного трансформатора ТРСЗП-12500/10 ЖУ1 // Транспорт Урала. 2017. № 3 (54). С. 87–91. DOI: 10.20291/1815-9400-2017-3-87-91. ISSN 1815–9400.
4. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники : учеб. М. : Высшая школа, 1986. 263 с.
5. Аржанников Б. А., Фролов Л. А., Штин А. Н. Расчет среднего значения выпрямленного напряжения холостого хода 12-пульсового преобразовательного агрегата с пофазным РПН трансформатора // Транспорт Урала. 2016. № 1 (48). С. 88–92. DOI: 10.20291/1815-9400-2016-1-88-92. ISSN 1815–9400.
6. Урманов Р. Н. Теория преобразователей при конечных сопротивлениях схем. Екатеринбург : Изд-во УрГУПС, 2003. 154 с.
7. Толстов Ю. Г., Мосткова Г. П., Ковалев Ф. И. Трехфазные силовые полупроводниковые выпрямители. М. : Энергия, 1974. 245 с.
8. Пестряева Л. М. Расчет токов в преобразовательном трансформаторе при пофазном регулировании напряжения // Электротехника. 1976. № 4. ISSN 0013–5860.

## References

1. Arzhannikov B. A. Devices for voltage regulation of transforming transformers under load [Ustroystva regulirovaniya napryazheniya preobrazovatel'nykh transformatorov pod nagruzkoy] : textbook. Ekaterinburg : Publishing House of USURT, 2017. 101 p.
2. Fischler Ya. L., Urmanov R. N., Pestryaeva L. M. Transformer equipment for conversion units [Transformatornoe oborudovanie dlya preobrazovatel'nykh ustanovok]. Moscow : Energoatomizdat, 1989. 320 p.
3. Tarasovskiy T. S. Thyristor-reactor voltage regulation device under load of RPN converter transformer TRSZP-12500/10 ZhU 1 [Tiristorno-reaktornoe ustroystvo regulirovaniya napryazheniya pod nagruzkoy RPN preobrazovatel'nogo transformatora TRSZP-12500/10 ZhU 1] // Transport of the Urals. 2017. No. 3 (54). Pp. 87–91. DOI: 10.20291/1815-9400-2017-3-87-91. ISSN 1815–9400.
4. Bessonov L. A. Theoretical bases of electrical engineering [Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki] : textbook. Moscow : High School, 1986. 263 p.
5. Arzhannikov B. A., Frolov L. A., Shtin A. N. Calculating the average rectified no-load voltage of 12-pulse converter unit with single-phase transformer OLTC [Raschet srednego znacheniya vypryamlenogo napryazheniya kholostogo khoda 12-pul'sovogo preobrazovatel'nogo agregata s pofaznym RPN transformatora] // Transport of the Urals. 2016. No. 1 (48). Pp. 88–92. DOI: 10.20291/1815-9400-2016-1-88-92. ISSN 1815–9400.
6. Urmanov R. N. Theory of converters for finite circuit impedances [Teoriya preobrazovateley pri konechnykh soprotivleniyakh skhem]. Ekaterinburg : Publishing House of USURT, 2003. 154 p.
7. Tolstov Yu. G., Mostkova G. P., Kovalev F. I. Three-phase power semiconductor rectifiers [Trehfaznye silovye poluprovodnikovye vypryamiteli]. Moscow : Energy, 1974. 245 p.
8. Pestryaeva L. M. Calculation of currents in the converter transformer with phase-by-phase voltage regulation [Raschet tokov v preobrazovatel'nom transformatore pri pofaznom regulirovanii napryazheniya] // Electrical Engineering. 1976. No. 4. ISSN 0013–5860.

Объем статьи 0,64 авторских листа

УДК 629.42

**Александр Викторович Галицкий**, ассистент кафедры «Управление транспортным бизнесом и интеллектуальные системы» Российского университета транспорта (МИИТ), Москва, Россия,

**Лев Анатольевич Каштанов**, старший преподаватель кафедры «Управление эксплуатационной работой и безопасностью на транспорте» Российского университета транспорта (МИИТ), Москва, Россия

## ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЧАСТНЫХ ЛОКОМОТИВОВ НА СЕТИ РЖД

**Alexander Viktorovich Galitskiy**, Assistant Lecturer, Transport Business Department, Russian University of Transport (RUT-MIIT), Moscow, Russia,

**Lev Anatolyevich Kashtanov**, Senior Lecturer, Transport Operation and Safety Management on Transport Department, Russian University of Transport (RUT-MIIT), Moscow, Russia

### Prospects for the use of private locomotives on the JSC Russian Railways network

#### Аннотация

Несмотря на предусмотренную целевой моделью рынка железнодорожных грузовых перевозок возможность создания института частных перевозчиков и развития приватной тяги, вопрос эксплуатации частных локомотивов на сети РЖД до настоящего времени окончательно не решен.

Основная дискуссия о работе частных локомотивов на инфраструктуре общего пользования сводится к выбору наиболее рационального варианта модели конкуренции «за маршрут» или «на маршруте».

Если особенности конкурирования по указанным выше моделям исследованы достаточно полно, то идея специализации и приобретения в частные руки локомотивных депо по конкретным направлениям полигонов до конца не изучена. Последствия внедрения такой системы эксплуатации локомотивов рассмотрены в данной статье на примере станции Челябинск-Главный. При этом выполнено графическое моделирование условной подвязки локомотивов под поезд при работе общим парком локомотивов и при закреплении локомотивов за определенным депо.

Результаты моделирования показывают значительное (на 35–40 %) увеличение продолжительности простоев вагонов на станции в ожидании локомотива либо также значительный (на 20 %) рост потребного парка локомотивов при передаче тягового подвижного состава в частную собственность.

**Ключевые слова:** локомотив, частный перевозчик, конкуренция, маршрут, приватный парк локомотивов.

#### Summary

Despite the possibility to create an institution of private carriers and to develop private traction envisaged by the target model of the rail freight market, the issue of private locomotives operation on the JSC Russian Railways network hasn't been finally resolved.

The main discussion about the operation of private locomotives on infrastructure of public traffic is reduced to selection of the most rational variant of the competition model «for the route» or «on the route».

If the competition peculiarities of the above models are rather well studied, the idea of specialization and acquisition into private ownership of locomotive depots in specific railway ranges are not fully understood. The consequences of introduction of such a system of locomotives operation are considered in the paper on the example of Chelyabinsk-Glavny station. Thus, the authors carried out graphical modeling of locomotives conditional coupling when operating a common fleet of locomotives and attaching locomotives to a certain depot.

The results of modeling show a significant (by 35–40 %) increase in the duration of cars idle time at the station waiting for the locomotive or also a significant (by 20 %) increase in the required fleet of locomotives in the conditions of transfer of traction rolling stock into private ownership.

**Keywords:** locomotive, private carrier, competition, route, private fleet of locomotives.

DOI: 10.20291/1815-9400-2019-1-108-112

**Н**а расширенном итоговом заседании правления президент ОАО «Российские железные дороги» О. В. Белозеров отметил положительные тенденции роста погрузки грузов и увеличения грузооборота, системного совершенствования эксплуатационной работы с учетом развития полигонных технологий.

Распоряжением Правительства Российской Федерации от 30.09.2018 г. № 2101-р был утвержден Комплексный план модернизации и расширения магистральной инфраструктуры на период до 2024 г. [1].

Однако до настоящего времени не решен вопрос о дальнейшем развитии подвижного состава для перевозки грузов по магистральной инфраструктуре общего пользования. Если перспективы развития парка грузовых вагонов (универсальных и специализированных) постепенно определяются собственниками, то по локомотивам пока требуется серьезная проработка.

Еще в ноябре 2006 г. бывший в то время министром транспорта И. Е. Левитин, выступая с докладом на заседании правительства, признал, что одна из главных задач завершившегося этапа реформы железнодорожного транспорта — «создание условий для приобретения компаниями-операторами магистральных локомотивов» — не решена. Во многом это было связано с определением объема тяговой составляющей в тарифе на перевозку.

В октябре 2013 г. по итогам совещания в Тобольске президент РФ В. В. Путин поручил правительству и РЖД оценить целесообразность эксплуатации частных локомотивов на инфраструктуре общего пользования [2].

Решить эту проблему предлагали в то время и частные перевозчики. Например, за возможность использовать для перевозки грузов принадлежавшие им локомотивы они были готовы профинансировать закупку нового подвижного состава. И сегодня собственными локомотивами располагают такие операторы, как Globaltrans, «НефтеТрансСервис», «Трансойл», ОТЭКО, «Трансгрант», «Газпромтранс», Первая Грузовая Компания. Как правило, частные перевозчики сдают свой парк локомотивов в аренду РЖД либо формируют собственные поезда, выполняя только маршрутные отправки по выделенным направлениям.

Целевой моделью рынка грузовых железнодорожных перевозок на период начиная с 2015 г. [3] была предусмотрена реализация пилотных проектов создания института частных перевозчиков по принципу конкуренции «за маршрут» и «на маршруте».

Конкуренция «за маршрут» предполагала, что на отдельных участках инфраструктуры общего пользования по результатам государственного конкурсного отбора исключительное право выполнять все грузовые перевозки передается локальному перевозчику на срок 5–10 лет. Конкуренция «на маршруте» подразумевала, что на отдельных участках и маршрутах сети российских железных дорог параллельно с ОАО «РЖД» будут работать несколько локальных грузовых перевозчиков. При этом ОАО «РЖД» продолжит свою деятельность на данном участке как общесетевой перевозчик [4].

Частные операторы хотели работать только на наиболее рентабельных маршрутах, что неизбежно могло привести к па-

дению прибыли компании (по подсчетам РЖД, примерно на 28 %) и снижению пропускной способности инфраструктуры.

Несколько лет тому назад ОАО «РЖД» предлагало провести эксперимент и допустить частных перевозчиков на отдельные участки по принципу конкуренции «за маршрут» (когда операторы выясняют через конкурс, кто будет ездить по тому или иному маршруту). Частные перевозчики выступали за альтернативный вариант — конкуренцию «на маршруте» (когда операторы конкурируют между собой и РЖД). В настоящее время этот вопрос так и остается открытым.

При решении задачи выбора вариантов конкуренции «на маршруте» или «за маршрут» можно на основе метода процессного подхода сделать некоторые сравнения расширенного использования частных локомотивов с уже имеющимся опытом эксплуатации частных вагонов.

По ряду напряженных направлений, особенно на подступах к портам и международным транспортным коридорам, пропускные способности сети близки к исчерпанию, не хватает емкости, подъездные и приемоотправочные пути на припортовых станциях просто не рассчитаны на появившееся в последние годы огромное количество частных вагонов.

Компания ОАО «РЖД» последовательно отстаивает позицию, которая заключается в том, что на первоначальном этапе необходимо реализовать пилотный проект по модели конкуренции «за маршрут». И лишь на основании его результатов вернуться к обсуждению вопроса о целесообразности и условиях реализации пилотного проекта по модели конкуренции «на маршруте».

Для частного бизнеса наибольший интерес представляют направления массовых грузоперевозок, где отдельные участки близки к исчерпанию пропускной способности. В этих обстоятельствах вероятным последствием могут быть постоянные сбои в графике движения грузовых поездов на полигонах, примыкающих к станциям и узлам с предельной нагрузкой. Результатом может стать потеря контроля за перевозочным процессом на протяженных, стратегически важных для государства и отрасли полигонах.

Развитие конкуренции в железнодорожной перевозочной деятельности, как показывает мировой опыт, возможно только при профиците инфраструктурных мощностей, чего пока в нашей стране в обозримой перспективе не предвидится.

В сложившихся условиях важно соблюдать принцип равной доступности железнодорожного транспорта для грузовладельцев из разных регионов и отраслей экономики. В его основе лежит формирование тарифов по среднесетевой методологии, в которую эксперимент по созданию института локальных перевозчиков совсем не укладывается.

По мнению большинства экспертов транспортной сферы, в рыночной среде для железнодорожного транспорта России характерен выраженный эффект синергии в виде экономии совокупных издержек на транспортировку грузов. Если естественную монополию делить, то суммарные издержки демонопользированной отрасли существенно возрастут. Поэтому предполагаемое введение множества частных локальных перевозчиков может значительно ухудшить эффективность сложившейся системы российского железнодорожного транспорта.

Сейчас на сеть РЖД регулярно выходит порядка 200 магистральных локомотивов сторонних компаний. Этот парк формирует круг таких операторов, как, например, «НефтеТранс-Сервис», Globaltrans, «ТМХС-Лизинг» и др.

Хотя понятие частной тяги в ОАО «РЖД» не в ходу, однако существует целый свод документов, который регулирует использование собственных поездных формирований. В дореформенную эпоху действовали инструкции МПС, которые позволяли локомотивам промышленных предприятий выходить на пути общего пользования. Есть также правила перевозок грузов в поездах, сформированных из локомотивов и вагонов, принадлежащих лицам, не являющимся перевозчиками.

Операторы полагают, что существующая система взаимоотношений требует совершенствования. По поводу дальнейших преобразований можно рассматривать разные варианты. Их, собственно, два. Первый — вернуться к идеям, заложенным в целевой модели рынка, где был предусмотрен допуск на сеть локальных перевозчиков в рамках пилотных проектов. Как полагают эксперты, такое решение могло бы стимулировать приобретение частных локомотивов под конкретные маршруты.

Второй вариант основан на том, что в существующей модели взаимодействие ОАО «РЖД» с владельцами частных локомотивов достаточно хорошо структурировано. Собственникам частной тяги необязательно становиться железнодорожными перевозчиками. Они могут успешно функционировать и в статусе операторов локомотивной тяги.

Идеи вариантов «за маршрут» и «на маршруте» изучены достаточно подробно, и в результате споров специалисты пришли к мнению, что при сложившемся дефиците пропускных способностей серьезных изменений в развитии частного парка локомотивов в ближайшее время не предвидится.

Вместе с тем идея специализации и приобретения в частные руки локомотивных депо по конкретным направлениям полигонов управления до конца еще не рассмотрена. При этом возможны и варианты изменения схем обращения локомотивов.

Например, модель обращения своих локомотивов на примыкающих к узловой станции Ч (Челябинск-Главный) направлениям предполагает смену локомотивов и пропуск их на следующие направления (рис. 1).

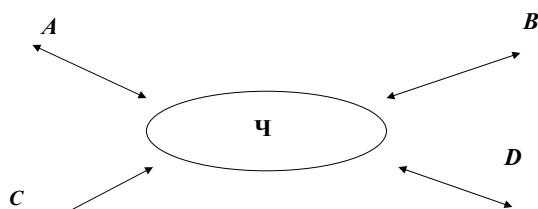


Рис. 1. Узловая станция с примыканиями направлений

При планировании работы локомотивов парка РЖД учитываются:

- подбор под имеющийся вес поезда;
- закрепление локомотива за полигоном обращения;
- наличие у бригады обкатки на полигоне;
- пробег локомотива от Т0-2;

— пробег локомотива от ТР-1;

— необходимость содержания технологического резерва.

На базе этих данных происходит закрепление локомотива за поездом на разрешенный полигон обращения:

- локомотив отправляется резервом;
- локомотив отправляется на Т0-2;
- локомотив отправляется на ТР-1;
- локомотив держится на станции как резерв.

Соответственно при планировании работы частных локомотивов необходимо учитывать:

- какие локомотивы предлагаются к использованию на данный момент;
- где они находятся и когда поступят на станцию отправления;
- на какую массу поезда они подготовлены;
- закрепление локомотива за полигоном обращения;
- наличие у бригады обкатки на полигоне и наличие бригад собственника локомотива далее по маршруту;
- каков пробег локомотива от Т0-2;
- каков пробег локомотива от ТР-1;
- можно ли поставить локомотив в технологический резерв;

— участвует ли владелец локомотива в пуле с какими-либо другими владельцами тягового подвижного состава (ТПС) и на каких условиях (по эксплуатации ТПС и использованию локомотивных бригад).

Только при получении этой информации можно планировать использование локомотива:

- закрепить за поездом на разрешенный полигон обращения;
- отправить резервом;
- отправить на Т0-2 или ТР-1;
- держать на станции как резерв;
- держать на станции в ожидании поезда нужного веса и назначения.

Рассмотрим результаты моделирования условной подвязки локомотивов, выполненного на примере данных по станции Челябинск-Главный по двум вариантам:

фактическое закрепление — локомотивы любого из 4 депо приписки (Уфа, Кинель, Златоуст и Пенза-3), которые обслуживают эту станцию на правах общего парка, могут следовать на любое примыкающее к станции направление (рис. 2);

прогнозное закрепление — имеется всего 4 участника, каждый из которых владеет локомотивами, закрепленными за одним из указанных депо, и обслуживает только свое направление, не работая с общим парком (рис. 3).

На рис. 2 и 3 цветом выделены локомотивы разных депо. Фрагменты графиков поступления локомотивов с поездами взяты по фактическим данным за период с 0 до 12 ч.

Как показало моделирование, при наличии ТПС в собственности РЖД суммарный простой локомотивов составил 50 локомотиво-часов (л-ч), в том числе 20 л-ч локомотивы находились под Т0-2. При наличии ТПС в собственности всего 4 частных владельцев суммарный простой локомотивов составил 83 л-ч, в том числе 21 л-ч локомотивы находились под Т0-2. Кроме того, на 10 % увеличилась потребность в путях отстоя локомотивов

и появился дополнительный простой вагонов (строка ОП) из-за ожидания составом своего локомотива (более 670 вагоно-часов практически за одну смену).

Таким образом, передача тягового подвижного состава в частную собственность с потерей универсальности его использования приведет к замедлению продвижения вагонопото-

ка из-за увеличения продолжительности простоев на станции в ожидании локомотива на 35–40 % либо потребует расширения парка локомотивов как минимум на 20 %. Кроме того, потребуется увеличить емкость путей на станции для отстоя локомотивов в ожидании поезда своего назначения или второго локомотива (для ведения «тяжелого» поезда).

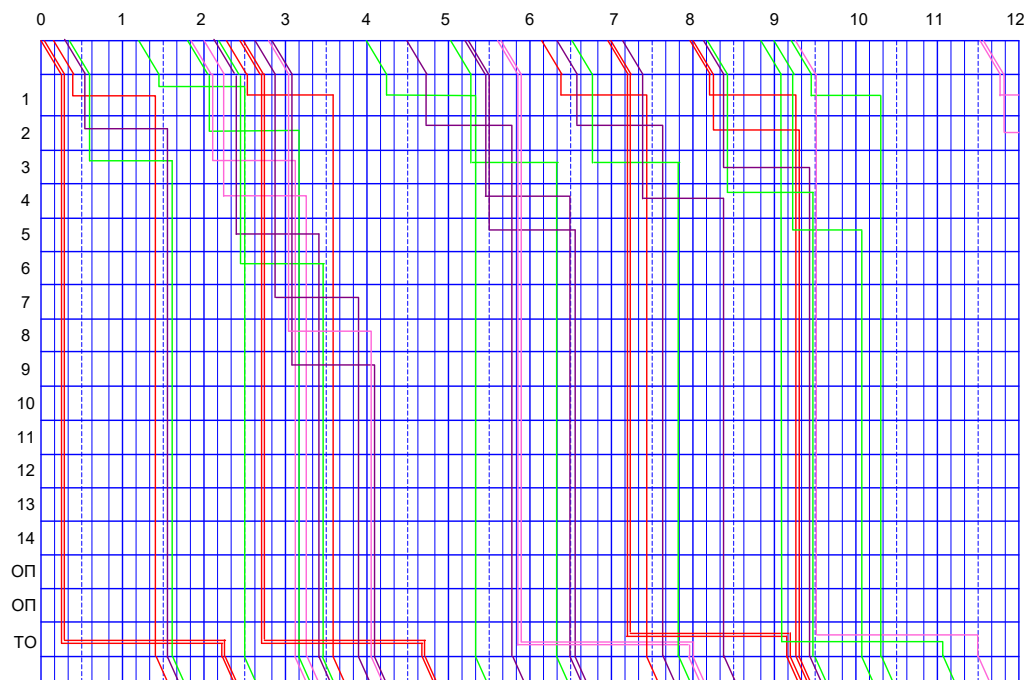


Рис. 2. Фрагмент графика подвязки локомотивов при ТПС в собственности РЖД

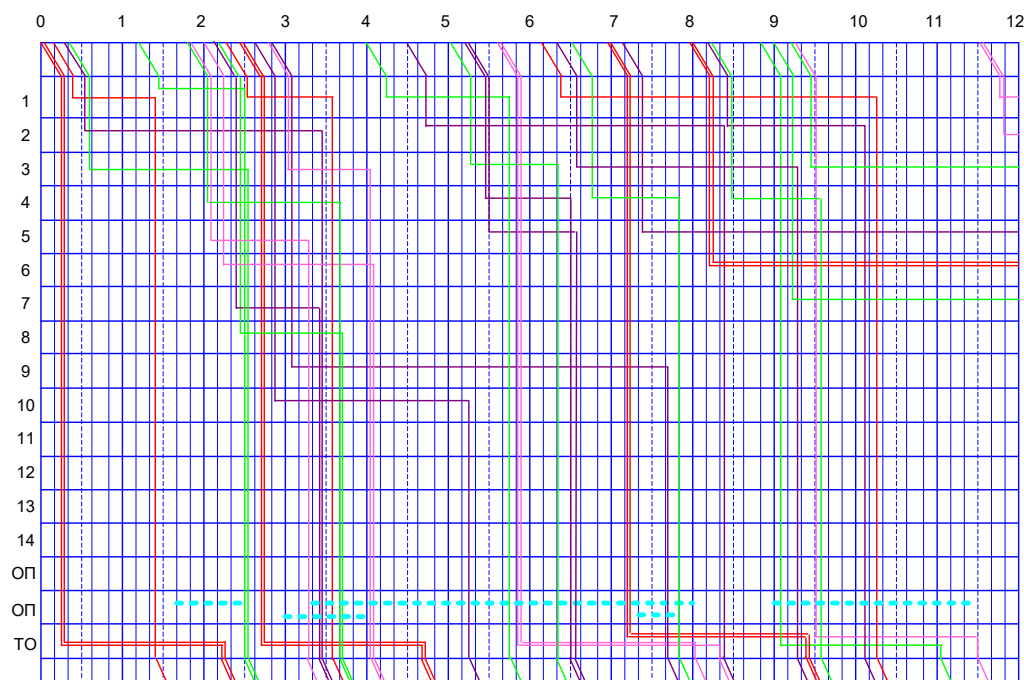


Рис. 3. Фрагмент графика подвязки локомотивов при ТПС в частной собственности



## Литература

1. Комплексный план модернизации и расширения магистральной инфраструктуры на период до 2024 года : утв. распоряжением Правительства Рос. Федерации от 30.09.2018 г. № 2101-р [Электронный ресурс]. URL: <http://static.government.ru/media/files/MUNhgWFddP3Uff9RJASDW9VxP8zwcB 4Y.pdf> (дата обращения: 28.01.2019).
2. Галлямова Ю. Локомотив на частной тяге // РБК daily. 2013. 16 окт.
3. Давыдов Г. Е. Целевая модель 2020 — третья попытка завершить реформы без реформирования? // Бюллетень транспортной информации. 2016. № 2 (248). С. 3–13. ISSN 2072–8115.
4. Кобзев С. А., Шаров В. А. О резервах производственных мощностей в условиях множественности операторов подвижного состава // Железнодорожный транспорт. 2013. № 8. С. 16–22. ISSN 0044–4448.

Объем статьи 0,51 авторских листа

## References

1. Complex plan of mainline infrastructure modernization and expansion for the period up to 2024 [Kompleksnyy plan modernizatsii i rasshireniya magistral'noy infrastruktury na period do 2024 goda] : approved by the Order of the Government of the Russian Federation dated 30.09.2018 No. 2101-r [Electronic resource]. URL: <http://static.government.ru/media/files/MUNhgWFddP3Uff9RJASDW9VxP8zwcB 4Y.pdf> (access date: 28.01.2019).
2. Gallyamova Yu. Locomotive on private traction [Lokomotiv na chastnoy tyage] // RBC daily. 2013. October, 16.
3. Davydov G. E. The target model of 2020 — the third attempt to complete the reform without reforming? [Tselevaya model' 2020 — tret'ya popytka zavershit' reformy bez reformirovaniya?] // Bulletin of Transport Information. 2016. No. 2 (248). Pp. 3–13. ISSN 2072–8115.
4. Kobzev S. A., Sharov V. A. On reserves of capacity in conditions of rolling stock operators plurality [O rezervakh proizvodstvennykh moshhnostey v usloviyakh mnozhestvennosti operatorov podvizhnogo sostava] // Railway Transport. 2013. No. 8. Pp. 16–22. ISSN 0044–4448.

УДК 621.331:621.316.925

Андрей Викторович Никонов, аспирант кафедры «Подвижной состав электрических железных дорог» Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), Омск, Россия

## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ СТАТКОМ НА РАБОТУ ФАЗОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЗАЩИТ КОНТАКТНОЙ СЕТИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Andrey Viktorovich Nikonov, postgraduate student, Electric Rolling Stock Department, Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, Russia

### Assessment of STATCOM voltage convertors influence on operation of alternating current catenary phase-sensitive protection

#### Аннотация

В статье дан анализ влияния СТАТКОМ на фазочувствительные защиты контактной сети переменного тока, в частности на дистанционные направленные защиты фидеров тяговых подстанций и постов секционирования. Для участков Западно-Сибирской железной дороги в программном комплексе «КОРТЭС» выполнены расчеты изменения вектора сопротивления тяговой сети при коротком замыкании. Рассмотрены различные расчетные схемы защит и режимы работы системы тягового электроснабжения при отключенном и включенном СТАТКОМ. По результатам расчетов сделаны выводы о целесообразности корректировки уставок для каждой из ступеней защит. Построены зависимости изменения фазы сопротивления от расстояния до места короткого замыкания для защит, на которые влияет СТАТКОМ. Предложены мероприятия по обеспечению селективной работы защит в случаях, когда СТАТКОМ оказывает на них негативное влияние.

**Ключевые слова:** регулируемые устройства компенсации реактивной мощности, фазочувствительные защиты, направленная дистанционная защита, статический генератор реактивной мощности, преобразователь напряжения.

#### Summary

The paper presents the analysis of STATCOM influence on phase-sensitive protection of alternating current catenary, particularly on directed distance protection of traction substations feeders and feeder pillars. The author carried out calculations of change of traction power system resistance vector during a short circuit in program complex CORTES for sections of West-Siberian Railway. In the paper the author also considered different calculation schemes of protection and modes of traction power supply operation when STATCOM is enabled and disabled. The results of calculation enabled to make conclusions on the feasibility of adjusting the settings for each of the protection stages. Finally, the paper shows the dependencies of resistance phase change on distance to the location of short circuit for protection affected by STATCOM and proposes measures to ensure the selective operation of protection in cases when STATCOM has a negative impact on it.

**Keywords:** adjustable reactive power compensation devices, phase-sensitive protection, directed distance protection, static generator of reactive power, voltage converter.

На электрифицированных участках переменного тока Западно-Сибирской и Северной железных дорог на постах секционирования (ПС) для обеспечения пропускной способности применяются регулируемые устройства компенсации реактивной мощности — статические генераторы на базе преобразователей напряжения СТАТКОМ [1–4].

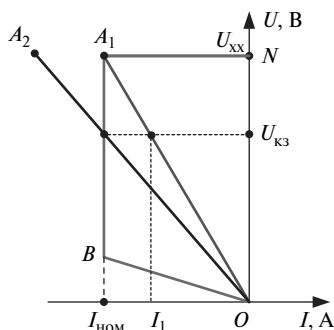
Принципы работы СТАТКОМ и устройств поперечной компенсации (КУ) отличаются. Ток КУ снижается пропорционально напряжению, а мощность — пропорционально квадрату напряжения. Регулирование тока СТАТКОМ осуществляется посредством широтно-импульсной модуляции. Этот ток не зависит от приложенного напряжения, при значительных просадках напряжения стабилизируется (моменты времени, когда ток равен либо больше номинального), и его влияние в аварийных режимах работы будет более существенным. Поэтому целесообразно рассмотреть именно влияние СТАТКОМ на фазочувствительные защиты контактной сети [1].

Аналитические расчеты уставок защит контактной сети трудозатратны, громоздки и требуют много времени. Значительно упростить их позволяет программный комплекс «КОРТЭС», разработанный во ВНИИЖТ. Однако электрические расчеты выполняются в «КОРТЭС» только с учетом нерегулируемых КУ. Вольтамперная характеристика (ВАХ) таких устройств представлена на рис. 1 (отрезок  $A_1O$ ). Согласно ВАХ, как уже упоминалось, ток КУ снижается пропорционально напряжению.

Ток СТАТКОМ в аналогичной ситуации в соответствии с внешней характеристикой (кривая  $NA_0BO$ ) стабилизируется (отрезок  $A_1B$  на рис. 1) [5–9].

При расчете режимов короткого замыкания (КЗ) в «КОРТЭС» для СТАТКОМ его мощность задается таким образом, чтобы в аварийном режиме ток оставался равным номинальному. В этом случае рабочая характеристика СТАТКОМ в «КОРТЭС» будет соответствовать отрезку  $A_2O$  (см. рис. 1).

DOI: 10.20291/1815-9400-2019-1-113-118



**Рис. 1. Рабочие характеристики типовых устройств поперечной компенсации и СТАТКОМ:**

$I_{НОМ}$  — номинальный ток СТАТКОМ;  $I_1$  — ток типового КУ при напряжении  $U_{KЗ}$ ;  $U_{XX}$  — напряжение на шине ПС при отсутствии нагрузки (напряжение холостого хода);  $U_{KЗ}$  — напряжение при коротком замыкании на шине ПС

Для пересчета мощности СТАТКОМ выведена следующая формула:

$$Q_{пр} = \frac{1}{\frac{U_{\min, КЗ}^2}{U_N \cdot Q_N} + x_c}, \quad (1)$$

где  $Q_{пр}$  — мощность СТАТКОМ, пересчитанная для возможности оценки его влияния на защиты контактной сети в «КОРТЭС», квар;

$U_{\min, КЗ}$  — минимальное напряжение в точке включения СТАТКОМ при коротком замыкании в контактной сети, В;

$U_N$  — номинальное напряжение в контактной сети, В;

$Q_N$  — номинальная мощность СТАТКОМ, квар;

$x_c$  — предвключенное сопротивление системы тягового электроснабжения, Ом.

На фидерах тяговых подстанций (ТПС) обычно используется трехступенчатая направленная дистанционная защита (ДЗ), дополненная токовой отсечкой (ТО). В качестве основной применяется вторая ступень дистанционной защиты (ДЗ2). Резервной является третья ступень (ДЗ3), а дополнительными — ТО и первая ступень дистанционной защиты (ДЗ1). На постах секционирования, как правило, используются ДЗ1, ДЗ2 и ТО.

В работе [10] был выполнен расчет векторов сопротивления тяговой сети при отключенном и включенном СТАТКОМ для ДЗ3 фидеров контактной сети ТПС. Однако переходное сопротивление в точке короткого замыкания (КЗ) не учитывалось, что значительно повлияло на результаты расчета и выводы.

В настоящей статье представлены результаты расчета сопротивления тяговой сети для всех фазочувствительных защит фидеров ТПС и ПС трех участков Западно-Сибирской железной дороги в соответствии с [11].

Угловые характеристики ДЗ1, ДЗ2 и ДЗ3 должны обеспечивать селективность действия и чувствительность в межподстанционной зоне. Ни одна из угловых характеристик не должна касаться области нагрузки или заходить за нее. Угловые характеристики для всех ступеней ДЗ различны, их типовые формы на комплексной плоскости сопротивлений представлены на рис. 2.

В соответствии с [11] угловая характеристика ДЗ1 обычно выполняется в виде сектора, правый радиус которого направлен вдоль оси активных сопротивлений  $R$  на комплексной плоскости или повернут относительно этой оси на угол до  $5^\circ$ , а левый радиус должен быть установлен к ней под углом от  $110$  до  $120^\circ$ . Значения обоих радиусов зависят от выбранной уставки. Такую форму угловой характеристики применяют, если выполняется условие

$$Z_{y, ДЗ1} \leq \frac{Z_{H, \min}}{K_3 \cdot K_B}, \quad (2)$$

где  $Z_{y, ДЗ1}$  — уставка первой ступени дистанционной защиты, равная радиусу сектора ДЗ1, Ом;

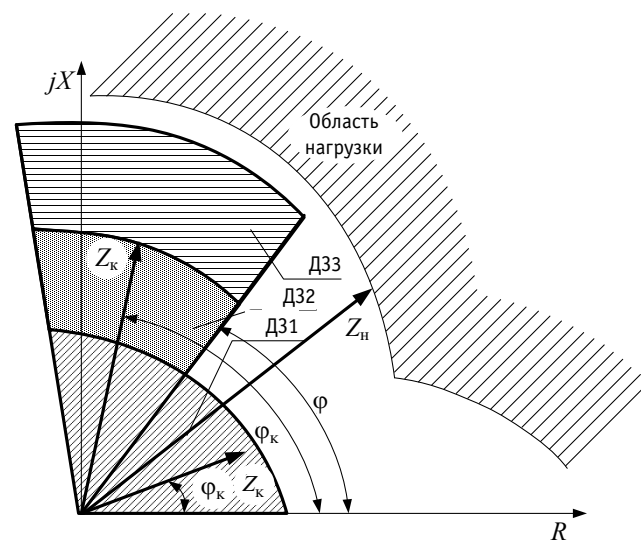
$Z_{H, \min}$  — наименьшее значение сопротивления, измеряемого защитой при максимальной нагрузке нормального режима, Ом;

$K_3, K_B$  — коэффициенты запаса и возврата ( $K_3 > 1, K_B \geq 1$ ).

Если это условие не выполняется, то правый радиус угловой характеристики ДЗ1 поворачивают против часовой стрелки на угол  $\varphi$ , значения которого принимают от  $50$  до  $55^\circ$ .

Угловые характеристики ДЗ2 и ДЗ3 выполняют в виде секторов. Длина их радиусов зависит от выбранной уставки соответствующих ступеней. Левый радиус должен быть установлен под углом от  $110$  до  $120^\circ$  к оси активных сопротивлений  $R$ . Угол  $\varphi$  правого радиуса каждой из указанных угловых характеристик отдельно принимают от  $45$  до  $53^\circ$ .

Чтобы обеспечить отстройку от нормальных режимов работы, при которой фазовый угол нагрузки находится в диапазоне от  $20$  до  $40^\circ$ , в соответствии с [11] для ДЗ2 принимают более высокие значения угла  $\varphi$  — от  $50$  до  $53^\circ$ .

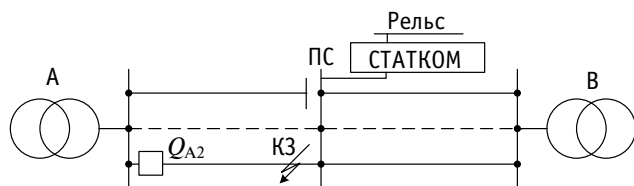


**Рис. 2. Угловые характеристики на комплексной плоскости сопротивлений для направленной дистанционной защиты:**

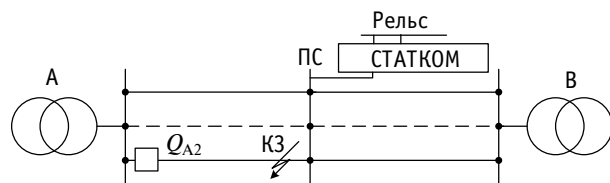
$Z_K$  — вектор сопротивления тяговой сети;  $Z_H$  — вектор сопротивления тяговой нагрузки;  $\varphi_K$  — угол вектора сопротивления тяговой сети;  $\varphi$  — угол характеристики;  $jX$  — ось реактивных сопротивлений на комплексной плоскости;  $R$  — ось активных сопротивлений на комплексной плоскости

Для ДЗЗ значение угла  $\varphi$  угловой характеристики принимают наибольшим в диапазоне от  $45^\circ$  до  $53^\circ$  при условии  $\varphi_k < \varphi$ .

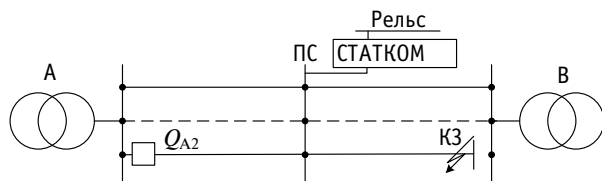
Схемы расчета дистанционной направленной защиты тяговой подстанции при отключенном и включенном СТАТКОМ представлены соответственно на рис. 3–5.



**Рис. 3. Расчетная схема ДЗ1 фидеров ТПС:**  
 $Q_{A2}$  — выключатель фидера тяговой подстанции А, питающий второй путь

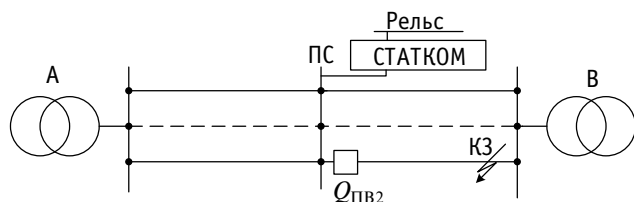


**Рис. 4. Расчетная схема ДЗ2 фидеров ТПС**



**Рис. 5. Расчетная схема ДЗ3 фидеров ТПС**

Расчетная схема ДЗ1 и ДЗ2 фидеров поста секционирования показана на рис. 6.



**Рис. 6. Расчетная схема ДЗ1 и ДЗ2 фидеров поста секционирования:**  
 $Q_{PB2}$  — выключатель фидера поста секционирования со стороны тяговой подстанции В, питающий второй путь

Расчет сопротивления тяговой сети для ДЗ1 выполнен в режиме максимума системы внешнего электроснабжения, для ДЗ2 — в режиме минимума. При расчете ДЗ2 учтено падение напряжения в дуге (500 В).

Данные расчета ДЗ1 и ДЗ2 фидеров поста секционирования рассматриваемых участков приведены в табл. 1.

Как видно из табл. 1, СТАТКОМ не влияет на вектор сопротивления тяговой сети для расчетных схем ДЗ1 и ДЗ2 фидеров поста секционирования, следовательно, корректировка уставок не требуется.

Таблица 1

Результаты расчета вектора сопротивления тяговой сети ДЗ1 и ДЗ2 поста секционирования при отключенном и включенном СТАТКОМ

№ ступени дистанционной защиты	ПС	Присоединение	СТАТКОМ откл.		СТАТКОМ вкл.	
			$Z_k, \text{Ом}$	$\varphi_k, ^\circ$	$Z_k, \text{Ом}$	$\varphi_k, ^\circ$
1	Панкрушиха	С1	13,3	67,1	13,7	66,9
		С2	11,7	66,8	11,9	66,5
		С3	10,6	64,8	10,9	64,7
		С4	9,0	63,9	9,5	63,6
	Тараданово	С1	10,1	64,0	10,6	63,4
		С2	7,5	62,0	7,7	61,5
		С3	21,5	64,3	21,8	63,4
		С4	17,2	63,4	17,8	62,5
	Заринская	С1	32,3	63,9	29,6	65,7
		С2	28,0	64,0	27,2	65,2
		С3	21,8	64,6	22,1	65,2
		С4	20,6	65	21,8	65,1
2	Панкрушиха	С1	13,9	64,8	14,2	65,0
		С2	12,5	64,3	12,7	64,8
		С3	11,0	62,6	11,2	62,8
		С4	9,5	61,4	9,7	61,7
	Тараданово	С1	10,5	62,0	10,9	62,3
		С2	7,9	59,2	8,4	59,5
		С3	21,4	63,1	21,8	63,3
		С4	17,6	61,8	17,8	62,6
	Заринская	С1	30,4	63,6	29,0	64,6
		С2	27,1	63,1	27,0	64,0
		С3	20,9	63,1	21,1	64,2
		С4	20,5	63,0	20,1	64,3

Данные расчета сопротивления тяговой сети дистанционных защит фидеров ТПС рассматриваемых участков при различных режимах работы СТАТКОМ сведены в табл. 2.

Данные табл. 2 показывают, что СТАТКОМ не влияет на ДЗ1 и ДЗ2 фидеров ТПС, т.е. корректировка уставок не требуется. Однако СТАТКОМ приводит к снижению индуктивной составляющей сопротивления тяговой сети, поэтому его вектор отклоняется в сторону оси активного сопротивления, что оказывает влияние на ДЗ3. Из рис. 7, на котором представлены зависимости фазы сопротивления тяговой сети от места КЗ при отключенном (рис. 7а) и включенном (рис. 7б) СТАТКОМ на посту секционирования Тараданово, видно, что фаза сопротивления тяговой сети смещается в область нагрузки. В таком случае КЗ в любой точке межподстанционной зоны будет восприниматься ДЗ3 как режим тяговой нагрузки. Дальнее резервирование ДЗ3 фидеров ТПС осуществляться не будет.

Кроме того, при включенном СТАТКОМ с увеличением расстояния от места установки измерительных трансформаторов до точки КЗ увеличивается и модуль сопротивления тяговой сети (рис. 8).

Таблица 2 а

Результаты расчета вектора суммарного сопротивления тяговой сети для дистанционных защит фидеров тяговой подстанции при отключенном и включенном СТАТКОМ

ДЗ	ТПС	Присоединение	СТАТКОМ откл.		СТАТКОМ вкл.	
			$Z_{\Sigma}$ Ом	$\varphi_{\Sigma}$ °	$Z_{\Sigma}$ Ом	$\varphi_{\Sigma}$ °
1	Урываево	Ф4	12,2	67,1	12,2	67,1
		Ф5	12	67,1	12	67,1
	Световская	Ф1	12,2	68,1	12,3	68
		Ф2	12,2	68,1	12,2	68,1
	Плотинная	Ф4	11,9	69,3	11,9	69,3
		Ф5	12,2	69,3	12,2	69,3
	Сузун	Ф1	15,2	67,1	15,2	67,1
		Ф2	15,1	67,1	15,1	67,1
	Шпагино	Ф3	15,9	66,1	15,9	66,1
		Ф4	15,9	66,1	15,9	66,1
2	Смазнево	Ф1	11,9	66,1	11,9	66,1
		Ф2	11,9	66,1	11,9	66,1
	Урываево	Ф4	14,6	66,3	14,6	66,3
		Ф5	14,6	66,4	14,6	66,4
	Световская	Ф1	17,3	68,1	17,3	68,1
		Ф2	17,3	68,1	17,3	68,1
	Плотинная	Ф4	16,5	68,9	16,5	68,9
		Ф5	16,5	68,9	16,5	68,9
	Сузун	Ф1	19,7	67,2	19,7	67,2
		Ф2	19,7	67,2	19,7	67,2
3	Шпагино	Ф3	20,1	67,2	20,1	67,2
		Ф4	19,8	67,1	19,8	67,1
	Смазнево	Ф1	15	68,7	15	68,7
		Ф2	14,8	68,6	14,8	68,6
	Урываево	Ф4	74,5	49	82,7	39,9
		Ф5	74,2	49	82,3	39,9
	Световская	Ф1	64,3	50,3	71,5	41,6
		Ф2	64,4	50,3	71,3	41,7
	Плотинная	Ф4	74,8	52,9	87,1	41,7
		Ф5	74,7	52,9	87,3	41,7
3	Сузун	Ф1	75,6	49,1	82,6	40,3
		Ф2	75,2	49,0	82,8	39,8
	Шпагино	Ф3	86,4	51,3	98,6	41,9
		Ф4	87,3	51,5	97,9	41,8
	Смазнево	Ф1	88,0	54,8	104,8	43,3
		Ф2	87,9	54,8	105,5	43,3

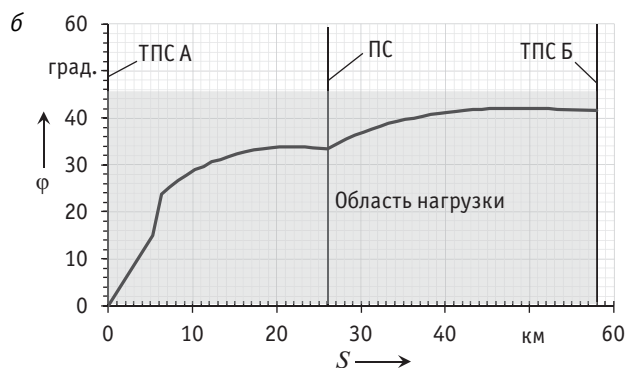
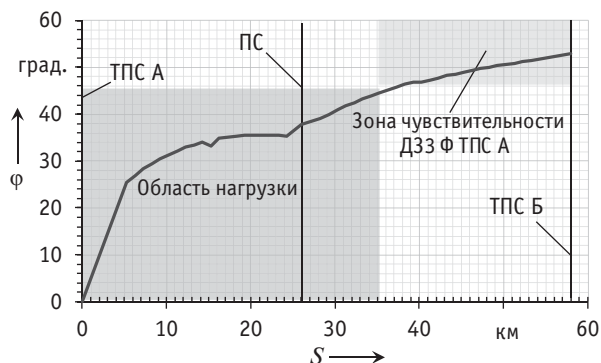


Рис. 7. Фаза сопротивления тяговой сети в зависимости от места короткого замыкания при отключенном (а) и включенном (б) СТАТКОМ

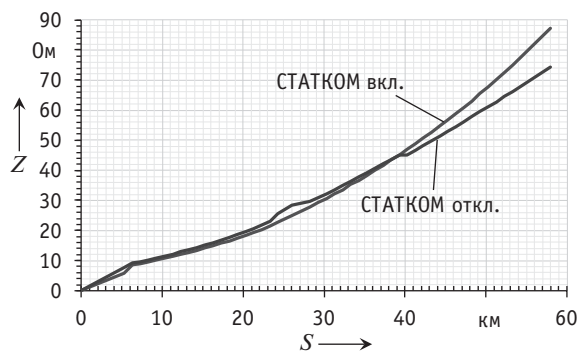


Рис. 8. Модуль вектора суммарного сопротивления тяговой сети в зависимости от места короткого замыкания при разных режимах работы СТАТКОМ

На рис. 9 представлена потенциальная диаграмма зон действия ДЗЗ фидеров тяговых подстанций А и Б.

Для отстройки от нагрузочных режимов предлагается ввести дополнительно защиту ( $P_{3\max}$ ), работающую на отключение СТАТКОМ при максимальном напряжении в случаях возникновения аварий (КЗ). Она должна быть реализована таким образом, чтобы при снижении напряжения ниже максимального при удаленных КЗ (горизонтальная линия на рис. 9) устройство автоматически отключалось. При этом, чтобы не допустить излишних отключений выключателей СТАТКОМ, а следовательно, увеличения ресурса их работы, необходимо отстроиться от действия основных защит. Поскольку выдержка времени

ДЗЗ составляет 600 мс, выдержку  $P_{\max}$  предполагается выбирать около 300 мс. Такое решение обусловлено минимальным шагом селективности. Однако по возможности необходимо стремиться к уменьшению значения выдержки, так как селективная работа ДЗЗ при КЗ будет обеспечена только после отключения СТАТКОМ. Таким образом, к выдержке времени ДЗЗ прибавляется выдержка  $P_{\max}$  и ДЗЗ отреагирует только по истечении 900 мс.

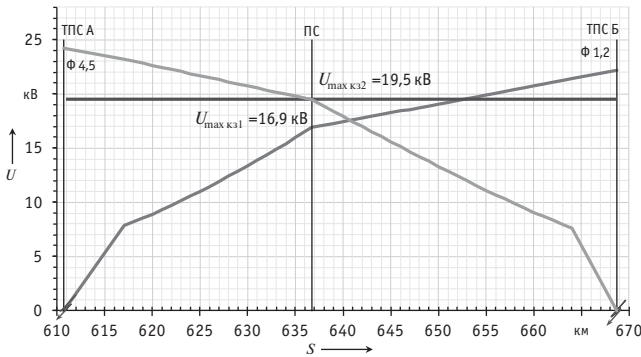


Рис. 9. Потенциальная диаграмма зон действия ДЗЗ фидеров тяговых подстанций А и Б:

$U_{\max \text{ кз1}}, U_{\max \text{ кз2}}$  — максимальные напряжения на посту секционирования при коротком замыкании у ТПС А и ТПС Б соответственно

Условия работы защиты на отключение СТАТКОМ:

$$U_y \leq \frac{U_{\max, \text{кз}}}{K_3}, \quad (3)$$

где  $U_y$  — напряжение уставки отключения СТАТКОМ, кВ;

$K_3$  принимается равным от 1,1 до 1,3;

$U_{\max, \text{кз}}$  — наибольшее напряжение на посту секционирования при удаленном коротком замыкании, кВ.

$U_{\max, \text{кз}}$  определяется из следующих выражений:

$$R_{\text{тсА}} = (r_{\text{фА}} \cdot l_{\text{фА}} + r_{\text{к}} \cdot l_1) / n_1 + r_{\text{р}} \cdot l_{\text{АВ}}; \quad (4)$$

$$R_{\text{тсВ}} = (r_{\text{фВ}} \cdot l_{\text{фВ}} + r_{\text{к}} \cdot l_2) / (n_2 - 1); \quad (5)$$

$$R_{\text{тсАВ}} = r_{\text{фВ}} \cdot l_{\text{фВ}} + r_{\text{к}} \cdot l_2; \quad (6)$$

$$U_{\max, \text{кз}} = U_{\text{рас}} \cdot \frac{r_{\text{к}} \cdot l_2 + r_{\text{фВ}} \cdot l_{\text{фВ}} + R_{\text{тсЗ}} + \frac{R_{\text{пВ}} + R_{\text{тсВ}}}{\frac{R_{\text{пА}} + R_{\text{тсА}} + R_{\text{пВ}} + R_{\text{тсВ}}}{(R_{\text{пА}} + R_{\text{тсА}}) \cdot (R_{\text{пВ}} + R_{\text{тсВ}})} + \frac{R_{\text{пА}} + R_{\text{тсА}} + R_{\text{пВ}} + R_{\text{тсВ}}}{r_{\text{к}} \cdot l_2 + r_{\text{фВ}} \cdot l_{\text{фВ}} + R_{\text{тсЗ}}}}, \quad (7)$$

где  $R_{\text{тсА}}, R_{\text{тсВ}}, R_{\text{тсАВ}}$  — эквивалентные результирующие сопротивления схемы замещения тяговой сети в межподстанционной зоне  $l_{\text{АВ}}$ , Ом;

$R_{\text{пА}}, R_{\text{пВ}}$  — внутренние сопротивления подстанций А и В, Ом;

$R_{\text{тсЗ}}$  — сопротивление троса группового заземления, Ом;

$U_{\text{рас}}$  — расчетное напряжение тяговой подстанции в режиме максимума нагрузки, В;

$r_{\text{фА}}, r_{\text{фВ}}$  — активное погонное сопротивление фидеров тяговых подстанций, Ом/км;

$r_{\text{к}}$  — сопротивление 1 км контактной сети одного пути, Ом/км;

$r_{\text{р}}$  — сопротивление 1 км рельсовой цепи всех путей, Ом/км;

$l_{\text{фА}}, l_{\text{фВ}}$  — длина питающих фидеров соответственно на тяговых подстанциях А и В, км;

$l_1, l_2$  — длина участков от места присоединения питающих фидеров до поста секционирования, км;

$n_1, n_2$  — число путей соответственно на участках  $l_1$  и  $l_2$ .

## ВЫВОДЫ

Результаты расчета и их анализ свидетельствуют об отсутствии влияния СТАТКОМ на первую и вторую ступени дистанционных защит всех присоединений. Однако СТАТКОМ оказывает влияние на работу третьей ступени дистанционной защиты фидеров тяговых подстанций. При его включении вектор сопротивления тяговой сети смещается в область тяговой нагрузки, и третья ступень защиты при возникновении короткого замыкания не будет реагировать. Следовательно, дальнейшее резервирование третьей ступени защиты фидеров тяговых подстанций осуществляться не будет. Чтобы обеспечить селективность работы третьей ступени, предложено ввести дополнительную защиту  $P_{\max}$ , работающую на отключение СТАТКОМ при коротком замыкании в границах межподстанционной зоны.

## Литература

1. Черемисин В. Т., Никонов А. В. Сравнение энергетических показателей регулируемых устройств поперечной компенсации реактивной мощности в условиях эксплуатации на постах секционирования // Транспорт Урала. 2018. № 1 (56). С. 98–104. DOI: 10.20291/1815-9400-2018-1-98-104. ISSN 1815-9400.
2. Никонов А. В. Эффективность регулируемых устройств поперечной компенсации реактивной мощности электрифицированных железных дорог // Приборы и методы измерений, контроля качества и диагностики в промышленности и на транспорте : матер. второй всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием / ОмГУПС. Омск, 2016. С. 241–248.

## References

1. Cheremisin V. T., Nikonov A. V. Comparison of energy indices of regulated devices for reactive shunt compensation in conditions of operation in section switch boxes [Svrnenie energeticheskikh pokazateley reguliruemyykh ustroystv poperechnoy kompensatsii reaktivnoy moshhnosti v usloviyakh ekspluatatsii na postakh seksionirovaniya] // Transport of the Urals. 2018. No. 1 (56). Pp. 98–104. DOI: 10.20291/1815-9400-2018-1-98-104. ISSN 1815-9400.
2. Nikonov A. V. Efficiency of adjustable devices for reactive shunt compensation on the electrified railways [Effektivnost' reguliruemyykh ustroystv poperechnoy kompensatsii reaktivnoy moshhnosti elektrifitsirovannykh zheleznnykh dorog] // Instruments and methods of measurement, quality control and diagnostics in industry and transport : proceedings of 2<sup>nd</sup>

3. Черемисин В. Т., Никонов А. В. Эффективность работы статического генератора реактивной мощности // Вестник РГУПС. 2016. № 2 (62). С. 128–135. ISSN 0201–727X.
4. Кремлев И. А., Никонов А. В., Квашук В. А. Эффективность применения устройств FACTS в системе электроснабжения железных дорог // Энергетическая безопасность : матер. междунар. молодеж. конгр. / ЮЗГУ. Курск, 2017. С. 160–163.
5. Статические компенсаторы для регулирования реактивной мощности. М. : Энергоатомиздат, 1987. 160 с.
6. Статические компенсаторы реактивной мощности в электрических системах / Под ред. И. И. Карташева. М. : Энергоатомиздат, 1998. 174 с.
7. Hingorani N. G., Gyugyi L. Understanding FACTS: concepts and technology of flexible AC transmission systems. New York : IEEE Press, 2000. 432 p.
8. FACTS. Modelling and simulation in power networks / E. Acha, C. R. Fuerte-Esquivel, H. Ambriz-Perez, C. Angeles. West Sussex : John Wiley & Sons Ltd., 2004. 421 p.
9. Padiyar K. R. FACTS controllers in power transmission and distribution. New Delhi : New Age International (P) Ltd., Publishers, 2007. 549 p.
10. Никонов А. В., Хусаинов Е. К. Оценка влияния регулируемых устройств компенсации реактивной мощности на работу фазочувствительных защит контактной сети переменного тока // Эксплуатационная надежность локомотивного парка и повышение эффективности тяги поездов : матер. четвертой всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием / ОмГУПС. Омск, 2018. С. 156–161.
11. СТО РЖД 07.021.4–2015. Защита систем электроснабжения железной дороги от коротких замыканий и перегрузки. Ч. 4. Методика выбора уставок защит в системе тягового электроснабжения переменного тока. М., 2015. 126 с.
- All-Russian scientific and technical conference with international participation / OSTU. Omsk, 2016. Pp. 241–248.
3. Cheremisin V. T., Nikonov A. V. Evaluation of static energy generator reactive power [Effektivnost' raboty staticheskogo generatora reaktivnoy moshhnosti] // Vestnik RGUPS. 2016. No. 2 (62). Pp. 128–135. ISSN 0201–727X.
4. Kremlev I. A., Nikonov A. V., Kvashuk V. A. Efficiency of FACTS devices application in railway power supply system [Effektivnost' primeneniya ustroystv FACTS v sisteme elektrosnabzheniya zheleznykh dorog] // Energy security : proceedings of the International youth congress / SWSU. Kursk, 2017. Pp. 160–163.
5. Static compensators for the reactive power regulation [Staticheskie kompensatory dlya regulirovaniya reaktivnoy moshhnosti]. Moscow : Energoatomizdat, 1987. 160 p.
6. Static reactive power compensators in electric systems [Staticheskie kompensatory reaktivnoy moshhnosti v elektricheskikh sistemakh] / Ed. by I. I. Kartashev. Moscow : Energoatomizdat, 1998. 174 p.
7. Hingorani N. G., Gyugyi L. Understanding FACTS: concepts and technology of flexible AC transmission systems. New York : IEEE Press, 2000. 432 p.
8. FACTS. Modelling and simulation in power networks / E. Acha, C. R. Fuerte-Esquivel, H. Ambriz-Perez, C. Angeles. West Sussex : John Wiley & Sons Ltd., 2004. 421 p.
9. Padiyar K. R. FACTS controllers in power transmission and distribution. New Delhi : New Age International (P) Ltd., Publishers, 2007. 549 p.
10. Nikonov A. V., Khusainov E. K. Assessment of adjustable devices for reactive power compensation influence on operation of alternating current catenary phase-sensitive protection [Otsenka vliyaniya reguliruemyykh ustroystv kompensatsii reaktivnoy moshhnosti na rabotu fazochuvstvitel'nykh zashhit kontaktnoy seti peremennogo toka] // Use reliability of locomotive fleet and increase of hauling operations efficiency : proceedings of 4<sup>th</sup> All-Russian scientific and technical conference with international participation / OSTU. Omsk, 2018. Pp. 156–161.
11. STO RZD 07.021.4–2015. Protection of railway power supply system from short circuits and overload. Part 4. Method of protection devices selection in alternating current traction power supply system [Zashhita sistem elektrosnabzheniya zheleznoy dorogi ot korotkikh zamykaniy i peregruzki. Ch. 4. Metodika vybora ustavok zashhit v sisteme tyagovogo elektrosnabzheniya peremennogo toka]. Moscow, 2015. 126 p.

Объем статьи 0,68 авторских листа

### Уважаемые читатели и авторы журнала «Транспорт Урала»!

Если вам нравится наш журнал, вы можете оказать содействие в его развитии, перечислив денежные средства по реквизитам:

Ассоциация выпускников УЭМИИТ-УрГУПС

ИНН-КПП 6670317893/667001001

ОГРН 1156600001470

620075, Свердловская обл., г. Екатеринбург, ул. Шевченко, д. 20, помещение 1

Р/с 40703810863010000192

в ПАО КБ «УБРИР» филиал ССБ

к/с 30101810900000000795

БИК 046577795

**Назначение платежа:** «Пожертвование для поддержки научных журналов УрГУПС».

Ваша финансовая поддержка позволит нам увеличить число публикаций, повысить индексы цитирования журнала и наших авторов.

### Уважаемые руководители инновационных компаний и предприятий!

Предлагаем вам услуги по продвижению вашей продукции через сеть Ассоциации выпускников УЭМИИТ-УрГУПС.

Ассоциация выпускников УЭМИИТ-УрГУПС — это кооперация большого числа неравнодушных людей различных сфер деятельности, окончивших наш университет.

Кроме того, предлагаем услуги по подбору молодых специалистов, по организации поиска решений прикладных и научных задач в рамках диссертационных работ, выполняемых в УрГУПС.

Всю необходимую информацию вы можете получить по тел. (343) 221-24-67 или на сайте <http://www.usurt.ru/vypusknikam/assotsiatsiya-vypusknikov-urgups>

<b>Извещение</b>	<p>Получатель: <u>Ассоциация выпускников УЭМИИТ-УрГУПС</u> КПП: <u>667001001</u> ИНН: <u>6670317893</u> ОКТМО: <u>65701000</u> Р/сч.: <u>40703810863010000192</u> в: <u>ПАО КБ «УБРИР» филиал ССБ</u> БИК: <u>046577795</u> К/сч.: <u>30101810900000000795</u> Код бюджетной классификации (КБК): _____ Платеж: <u>Пожертвование для поддержки научных журналов УрГУПС</u> Платательщик: _____ Адрес плательщика: _____ ИНН плательщика: _____ № л/сч. плательщика: _____ Сумма: _____ руб. ____ коп.  Подпись: _____ Дата: «____» _____ 2019 г.</p>
<b>Квитанция</b>	<p>Получатель: <u>Ассоциация выпускников УЭМИИТ-УрГУПС</u> КПП: <u>667001001</u> ИНН: <u>6670317893</u> ОКТМО: <u>65701000</u> Р/сч.: <u>40703810863010000192</u> в: <u>ПАО КБ «УБРИР» филиал ССБ</u> БИК: <u>046577795</u> К/сч.: <u>30101810900000000795</u> Код бюджетной классификации (КБК): _____ Платеж: <u>Пожертвование для поддержки научных журналов УрГУПС</u> Платательщик: _____ Адрес плательщика: _____ ИНН плательщика: _____ № л/сч. плательщика: _____ Сумма: _____ руб. ____ коп.  Подпись: _____ Дата: «____» _____ 2019 г.</p>



Подписка на 2019 год.

Периодичность — 4 номера в год.

✂

ф. СП-1

**АБОНЕМЕНТ**

на ~~газету~~  
журнал

**46463**

(индекс издания)

**Транспорт Урала**

(наименование издания)

Количество  
комплектов:

на 2019 год по месяцам:

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

**Куда**

(почтовый индекс)

(адрес)

**Кому**

(фамилия, инициалы)

**ДОСТАВОЧНАЯ КАРТОЧКА**

на ~~газету~~  
журнал

**46463**

(индекс издания)

**Транспорт Урала**

(наименование издания)

Стои-  
мость

подписки  
пересланных

руб. \_\_\_\_ коп.  
руб. \_\_\_\_ коп.

Количество  
комплектов:

на 2019 год по месяцам:

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

**Куда**

(почтовый индекс)

(адрес)

**Кому**

(фамилия, инициалы)

Научно-технический журнал «Транспорт Урала»

DOI:10.20291/1815-9400

№ 1 (60), 2019 год

Издается с июня 2004 г. Выходит 1 раз в квартал

Подписной индекс в общероссийском каталоге «Почта России» — 46463

Свидетельство о регистрации средства массовой информации Роскомнадзора  
ПИ № 77-18098 от 27 мая 2004 г.

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 29.03.2019

Выход в свет 07.05.2019

Тираж 250 экз. Формат 60×90/8

Цена 330 руб.

Отпечатано в соответствии с качеством предоставленного оригинал-макета  
в типографии ООО «Универсальная Типография «Альфа Принт».

620049, Свердловская обл., г. Екатеринбург, пер. Автоматики, д. 2ж.

Тел. 8-800-300-16-00. Сайт: [www.alfaprint24.ru](http://www.alfaprint24.ru)

Заказ № 9574

© ФГБОУ ВО «Уральский государственный университет путей сообщения», 2019