

**МОДЕЛЬ АДАПТИВНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ  
ТЯГОВЫМИ РЕСУРСАМИ С ИДЕНТИФИКАЦИЕЙ  
В ПЕРЕВОЗОЧНОМ ПРОЦЕССЕ ПОЛИГОНА ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ**

**ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНТЕРВАЛЬНОГО  
РЕГУЛИРОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ**

**ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ПОВЫШЕНИЯ  
ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ СТАНЦИИ  
ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИИ ВИРТУАЛЬНОЙ СЦЕПКИ**

**ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ  
БЕНЗИНОВОГО АВТОМОБИЛЯ С АНТИТОКСИЧНОЙ СИСТЕМОЙ**

**МЕТОДИКА ОЦЕНКИ УРОВНЯ РАЗВИТИЯ  
ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ РЕГИОНА**



**МЕЖДУНАРОДНЫЙ РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ**

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

**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ**

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

**INTERNATIONAL EDITORIAL BOARD**

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

**EDITORIAL BOARD**

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

**ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ТРАНСПОРТА**

*П. А. Козлов, И. С. Абдуллаев, В. С. Колокольников.*  
**Об особенностях системного построения железнодорожного транспорта** ..... **3**

*Н. Ф. Сирина, Д. Л. Русин.* **Модель адаптивного регулирования и управления тяговыми ресурсами с идентификацией в перевозочном процессе полигона железных дорог** ..... **8**

*В. Л. Герус.* **Система ключевых показателей эффективности как инструмент стратегического управления** ..... **18**

**ВАГОНЫ И ВАГОННОЕ ХОЗЯЙСТВО**

*В. И. Моисеев, А. В. Жебанов.* **Перевозка железнодорожным транспортом вязких нефтепродуктов в зимних условиях при применении принципов каталитического разогрева** ..... **24**

*Д. В. Зяблов, С. В. Беспалко.* **Обследование парка вагонов-цистерн на наличие пролива нефтепродуктов** ..... **30**

**ГРУЗОВЫЕ И ПАССАЖИРСКИЕ ПЕРЕВОЗКИ**

*С. А. Бессоненко, Е. В. Климова, Н. И. Осипов.* **Оценка эффективности интервального регулирования движения поездов** ..... **35**

*С. В. Бушуев, Н. С. Голочалов.* **Технические решения повышения пропускной способности станции при использовании технологии виртуальной сцепки** ..... **46**

*А. В. Пашуков.* **Методика синтеза станционных систем железнодорожной автоматики и телемеханики с программируемой логикой с применением модели конечных автоматов** ..... **56**

*В. С. Колокольников, Н. В. Кашеева, Н. Е. Окулов.* **Оптимизация пассажирских перевозок городским железнодорожным транспортом с использованием имитационных моделей** ..... **64**

**ПОДВИЖНОЙ СОСТАВ И ТЯГА**

*С. В. Кротов, Д. П. Кононов, А. П. Буйносов.* **Исследование изношенного профиля поверхности катания железнодорожного колеса с помощью кривых износа** ..... **69**

*А. В. Старцев, И. И. Сторожев, И. С. Цихалевский, Я. А. Мишин, А. Т. Шарпов.* **Теоретические предпосылки перевода тягового подвижного состава на газомоторное топливо** ..... **75**

**АВТОМАТИКА, ТЕЛЕМЕХАНИКА И СВЯЗЬ**

*А. Н. Попов, М. Л. Попова.* **Контроль целостности рельсовых нитей протекающим током** ..... **79**

**АВТОМОБИЛЬНЫЙ ТРАНСПОРТ**

*Л. В. Плотников, Д. А. Давыдов, Д. Н. Красильников, А. Д. Лаптев, В. А. Следнев, В. А. Шурупов.* **Модернизация впускного тракта путем применения квадратных и треугольных каналов применительно к автомобильному двигателю размерности 8,2/7,1** ..... **84**

*А. В. Гриценко, К. В. Глемба, А. С. Меньшенин, С. А. Чокой.* **Экологические аспекты при эксплуатации бензинового автомобиля с антиотоксичной системой** ..... **91**

**ТРАНСПОРТНО-ЛОГИСТИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ**

*И. С. Выхребенцев, М. Б. Петров.* **Методика оценки уровня развития транспортной инфраструктуры региона** ..... **99**

**ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ТЯГА**

*А. П. Буйносов, А. А. Козлова.* **Анализ отказов и способы повышения надежности оборудования электропоездов** ..... **105**

**ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ**

*Т. В. Ковалева, А. А. Комяков, О. О. Комякова, Н. В. Пашкова.* **Резонансные явления в трехфазных линиях электропередачи, питающих нетяговых потребителей железнодорожного транспорта** ..... **109**

**GENERAL TRANSPORT PROBLEMS**

*P. A. Kozlov, I. S. Abdullaev, V. S. Kolokolnikov.*  
**Peculiarities of the railway transport system construction** ..... **3**

*N. F. Sirina, D. L. Rusin.* **Model of adaptive regulation and traction resource management with identification in the railway transportation process** ..... **8**

*V. L. Gerus.* **The system of key performance indicators as a strategic management tool** ..... **18**

**RAILWAY CARS AND CARRIAGE EQUIPMENT**

*V. I. Moiseev, A. V. Zhebanov.* **Transportation of viscous petroleum products by rail in winter conditions using the principles of catalytic heating** ..... **24**

*D. V. Zhablov, S. V. Bespalko.* **Inspection of the tank car fleet for availability of oil spill** ..... **30**

**CARGO AND PASSENGER TRANSPORTATION**

*S. A. Bessonenko, E. V. Klimova, N. I. Osipov.*  
**Evaluating the efficiency of interval train control** ..... **35**

*S. V. Bushuev, N. S. Golochalov.*  
**Technical solutions for increasing the station capacity using virtual coupling technology** ..... **46**

*A. V. Pashukov.* **The method of synthesis of station systems of railway automation and remote control with programmable logic using the model of finite state machines** ..... **56**

*V. S. Kolokolnikov, N. V. Kashheeva, N. E. Okulov.*  
**Optimization of passenger service by urban rail using simulation models** ..... **64**

**ROLLING STOCK AND TRACTION**

*S. V. Krotov, D. P. Kononov, A. P. Buynosov.*  
**Investigation of a railway wheel rolling surface worn profile using wear curves** ..... **69**

*A. V. Startsev, I. I. Storzhev, I. S. Tsikhalevskiy, Ya. A. Mishin, A. T. Sharapov.*  
**Theoretical background of the transfer of traction rolling stock to gas engine fuel** ..... **75**

**AUTOMATION, TELEMECHANICS AND COMMUNICATION**

*A. N. Popov, M. L. Popova.*  
**Monitoring the integrity of rails by flowing current** ..... **79**

**MOTOR TRANSPORT**

*L. V. Plotnikov, D. A. Davydov, D. N. Krasilnikov, A. D. Laptev, V. A. Slednev, V. A. Shurupov.*  
**Modernization of the intake tract by using square and triangular channels in relation to an automobile engine with dimensionality 8.2/7.1** ..... **84**

*A. V. Gritsenko, K. V. Glemba, A. S. Menshenin, S. A. Chokoy.*  
**Environmental aspects in operation of a gasoline car with antitoxic system** ..... **91**

**TRANSPORT AND LOGISTICS PROCESSES**

*I. S. Vyskrebentsev, M. B. Petrov.* **Methodology for assessing the level of transport infrastructure development of region** ..... **99**

**ELECTRIC TRACTION**

*A. P. Buynosov, A. A. Kozlova.* **Analysis of failures and ways to increase reliability of equipment of electric-multiple units** ..... **105**

**ELECTRIC SUPPLY**

*T. V. Kovaleva, A. A. Komyakov, O. O. Komyakova, N. V. Pashkova.*  
**Resonance phenomena in three-phase power transmission lines feeding the non-traction consumers of railway transport** ..... **109**

УДК 656.2:519.876.5

**Петр Алексеевич Козлов, доктор технических наук, профессор, лауреат Государственной премии Российской Федерации, президент Научно-производственного холдинга «СТРАТЕГ», Москва, Россия,**

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

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

## ОБ ОСОБЕННОСТЯХ СИСТЕМНОГО ПОСТРОЕНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

**Petr Alexeevich Kozlov, DSc in Engineering, Professor, Laureate of the State Prize of the Russian Federation, President of Research & Production Holding STRATEG, Moscow, Russia,**

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

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

## Peculiarities of the railway transport system construction

### Аннотация

Рассматривается двойственная функция железнодорожного транспорта — как самостоятельной системы и как элемента системы «народное хозяйство». Задача второй функции — обеспечение экономических связей надежными и эффективными транспортными связями. При выполнении этой задачи возникает необходимость в построении управления потоками и в использовании гибкого плана формирования. При этом уменьшаются потери из-за несовпадения ритмов на стыке «транспорт — производство».

Однако на железных дорогах и на станциях появляются дополнительные затраты, а значит, сокращаются доходы. То есть «страдает» первая функция. Гармонию в противоречии функций предлагается достигать следующим способом: система «железнодорожный транспорт» из средств, полученных от субъектов экономической связи, оплачивает дополнительную работу дорог, а те в свою очередь оплачивают работу станций.

**Ключевые слова:** железная дорога, станция, поток, система, элемент, транспортная связь

### Abstract

The dual function of railway transport is considered — as an independent system and as an element of the «national economy» system. The task of the second function is to provide economic ties with reliable and efficient transport links. When performing this task, there is a need for stream-by-stream control of traffic flows and use of a flexible formation plan. Herewith, losses are reduced due to mismatch of rhythms at the junction of «transport — production».

However, additional costs appear on railways and at stations, which means that revenues are reduced. That is, the first function «suffers». Harmony in contradiction of functions is proposed to be achieved in the following way: the railway transport system pays for additional work of roads from funds received from subjects of economic ties, and those in turn pay for the work of stations.

**Keywords:** railway, station, flow, system, element, transport links

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

### ВВЕДЕНИЕ

Системным подходом занимались многие исследователи (в качестве примера назовем работы [1–3]). Новый системный подход предложен в статьях [4, 5]. По принципу построения он отличается от предыдущих. Прежде пытались, что называется, «сочинить» своего рода технологию. При разработке нового системного подхода следовали А. И. Герцену, который утверждал: «Метода «вытекает» из объекта, а не приносится к нему внешним случайным образом» [6]. То есть системные принципы «подсмотрели» в природе и сформулировали их. «Из объекта вытекает», что система — это форма устойчивого и эффективного построения организованной материи, выработанная тысячелетиями. Определение: «Система — это целостное образование с активным самоподдержанием, при этом ее элементы тоже являются системами» [4]. Термин «активное» подразумевает технологическую гибкость, адаптивность.

### ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫЙ ТРАНСПОРТ С СИСТЕМНЫХ ПОЗИЦИЙ

Железнодорожный транспорт выступает в этом случае в двух формах — как самостоятельная система и как элемент системы «народное хозяйство» [7]. Функцию железнодорожного транспорта в первой форме можно сформулировать как перевозки, а во второй — как обеспечение экономических связей надежными и эффективными транспортными связями.

Как система железнодорожный транспорт структурно состоит из дорог, а те представляют собой увязанную совокупность станций. Территориальные управления железных дорог (прежде — отделения дорог) здесь как будто «выпадают»: их трудно назвать системами — нет достаточной целостности.

И на дорогах, и на станциях должны быть развиты функции самоподдержания, речь идет о поддержании в работоспособном состоянии путевого и локомотивного хозяйства, средств станционной автоматики, а также профессионального уровня работников. Для этого требуются значительные средства, так что получение доходов относится к основным функциям дорог и станций как систем.

Железнодорожный транспорт как элемент представляет собой, по сути, совокупность транспортных связей. Однако с этим термином трудно работать. Ну как, к примеру, скажешь «пропускная способность транспортной связи»? Поэтому термин «транспортная связь» предлагается заменить на термин «функциональный полигон». Будем считать, что если есть надежная транспортная связь, значит, для экономической связи выстроен функциональный полигон с достаточной пропускной способностью. По нему можно задавать параметры — время хода, скорость и стоимость пропуска. Тогда железнодорожный транспорт как элемент структурно уже представляет собой совокупность функциональных полигонов.

По функциональным полигонам продвигаются грузопотоки от отправителя к получателю. По каким железнодорожным линиям и какими поездами это осуществляется — здесь не рассматривается. Транспорт оценивается как бы «глазами потребителя».

На дороге как на элементе функциональному полигону должен соответствовать некоторый дорожный полигон. Он уже является структурно-функциональным: функциональным по содержанию и структурным по форме. Термин «структурно-функциональный» — труднопроизносимый. Для удобства можно заменить его на «структурный», помня, конечно, что структуры без функции не бывает.

Структурный полигон — это реальная дорожная линия с организованным на ней соответствующим поездным движением. Потоки по структурным полигонам могут начинаться и заканчиваться как за пределами дороги, так и внутри ее (рис. 1).

## О ПРОТИВОРЕЧИЯХ И ГАРМОНИИ

Между функциями и свойствами объекта как системы и как элемента возникают в общем случае противоречия. Но противоположности существуют в одном объекте, значит, они одновременно находятся и в какой-то взаимосвязи. Все как по философскому закону Гегеля об единстве и борьбе противоположностей.

## ПРОТИВОРЕЧИЯ НА ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГЕ

Как системе железной дороге для поддержания жизнедеятельности необходимо зарабатывать средства. Но доходы — это плата за перевозки с учетом расходов. Значит, дороге нужно поддерживать расходы на допустимом уровне. Тогда доходы  $F$  дороги как системы составят

$$F = \sum_i c_i q_i - \sum_j c_j^* p_j,$$

где  $c_i$  — стоимость одной перевозки;  $q_i$  — объем перевозок;  $c_j^*$  — стоимость затраченных ресурсов на одну перевозку;  $p_j$  — ресурсы, затраченные на одну перевозку.

От какого отправителя и к какому потребителю идут потоки — здесь роли не играет. Выбирается наиболее рациональная технология пропуска потоков как равнозначных.

Но на более высоком уровне это важно. Экономические связи в динамичной рыночной экономике меняются. И возникает необходимость постройного управления потоками. Скажем, к порту подходит судно, а груза не хватает. Значит, требуется ускоренный подвод. Значит, на дороге должно быть соответствие параметров структурного полигона требованиям параметров функционального полигона.

Допустим, по функциональному полигону идет поток с выделением ускоренной струи (рис. 2).

Структурный полигон может пропустить весь поток, но только как однородный. Для ускоренной струи нет соответствующей организации поездного движения и нет требуемого путевого развития. При таком несоответствии дорога недостаточно хорошо выполняет функцию элемента.

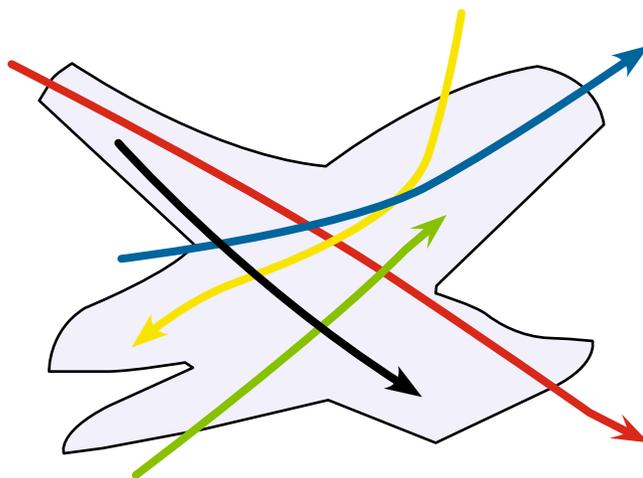


Рис. 1. Потоки по структурным полигонам дороги

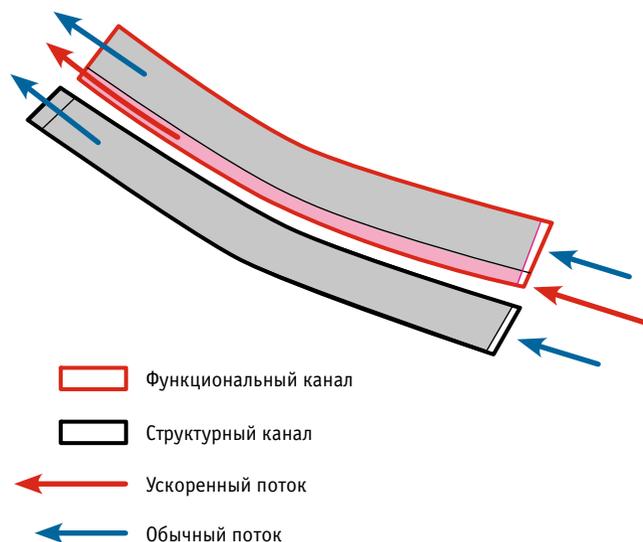


Рис. 2. Схема взаимодействия функционального и структурного полигонов

Допустим, резерв пропускной способности есть. Но пропуск приоритетных поездов требует дополнительных затрат. Например, есть готовый состав, есть локомотив, а отправлять поезд нельзя: следом идет приоритетный, а для него нет локомотива. В общем случае ухудшается использование локомотивов и увеличиваются простои составов. Выполняется функция дороги как элемента, но страдает функция дороги как системы. Противоречие.

Как здесь найти гармонию? Надсистема получает какие-то доходы от постройного управления потоками. Она возмещает из них дополнительные затраты дороги. Но добавляет еще и часть так, чтобы доходность надсистемы и доходность дороги были сопоставимы. Тогда доходы дороги при выполнении функции элемента составят

$$\hat{F} = \sum_i c_i q_i - \sum_j c_j^* p_j - \sum_k c_k^{**} \cdot p_k^{**} + \sum_k \hat{c}_k,$$

где  $c_k^{**}$  — стоимость мероприятий по перестройке одного структурного полигона;  $p_k^{**}$  — мероприятия на перестройку одного структурного полигона;  $\hat{c}_k$  — поощрение дороги за перестройку одного структурного полигона.

Теперь на дороге выполняется и функция элемента (организуется постройное управление), и функция системы (зарабатываются дополнительные денежные средства). Возникает гармония (рис. 3).

### ПРОТИВОРЕЧИЯ НА СТАНЦИИ

Рассмотрим эти противоречия на примере сортировочной станции. Станция работает по определенному плану формирования. Но для обеспечения устойчивости без больших резервов железнодорожному транспорту требуется развитое свойство адаптивности. А это значит, что основные организационные формы — план формирования и график движения — должны быть вариантными.

Допустим, необходимо ускорить какой-то поток. Он проходит две переработки на сортировочных станциях. Для ускорения изменяют план формирования так, чтобы поток проходил только одну переработку. Кстати, изменение плана формирования может происходить и тогда, когда нужно разгрузить какую-то слишком перегружен-

ную сортировочную станцию. Но изменение коснется и работы некоторых других станций.

Рассмотрим следующую ситуацию. На сортировочной станции изменился план формирования. А на трех путях накопились части составов, которые надо переработать. Составы переставляются в предгорочный парк, если есть там свободные пути. А если их нет, то возникает задержка, потому что пока расформирование производить нельзя. Процесс перехода приведет к дополнительным затратам. Проверим такой вариант на имитационной модели одной из сортировочных станций — в имитационной модели можно увидеть не только результаты эксперимента, но и сам процесс перехода в динамике (рис. 4).

Сравним исполненные графики работы предгорочного парка без перехода и с переходом.

Рассматриваемая станция работает с достаточно высокой загрузкой. Естественно, есть определенные простои составов в предгорочном парке из-за несоответствия ритма их поступления и ритма роспуска (рис. 5).

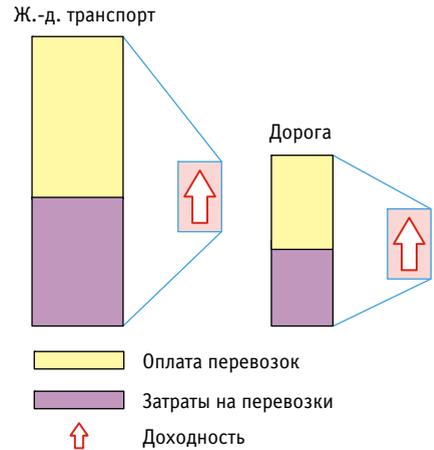


Рис. 3. Сопоставимая доходность пропуска потоков на железнодорожном транспорте и на дорогах

Но во время перехода на новый план формирования простои значительно увеличиваются (рис. 6).

Естественно, некоторые задержки в операции «расформирование» есть на всех станциях. Есть эти задержки и на рассматриваемой станции (рис. 7).

Но в процессе перехода задержки резко возрастают (рис. 8).

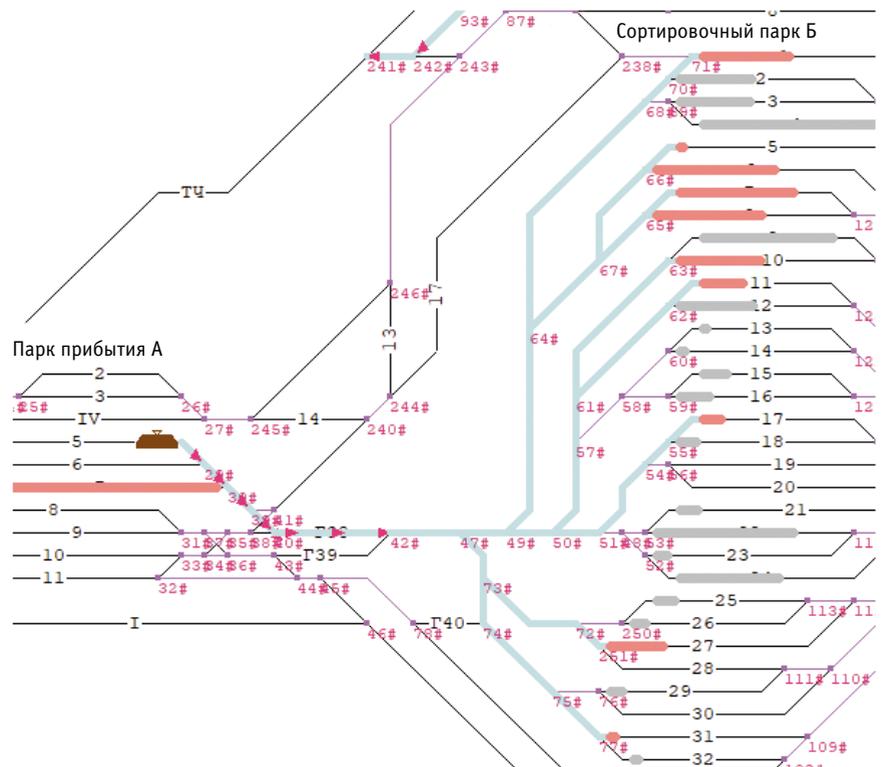


Рис. 4. Динамика роспуска состава с горки в имитационной модели

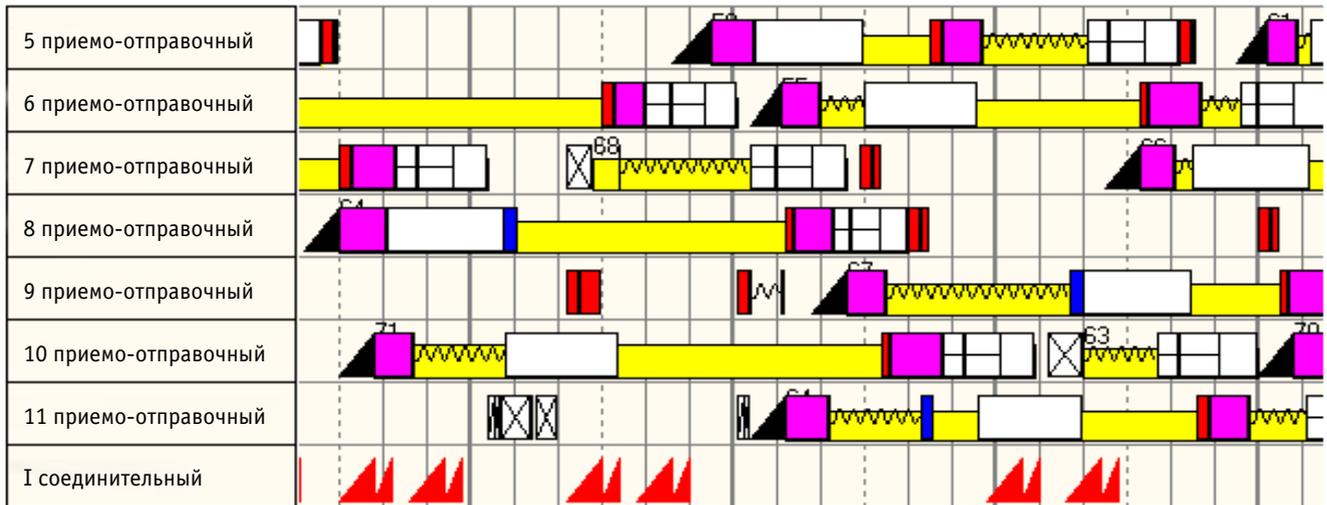


Рис. 5. Динамика работы предгорочного парка в нормальном режиме

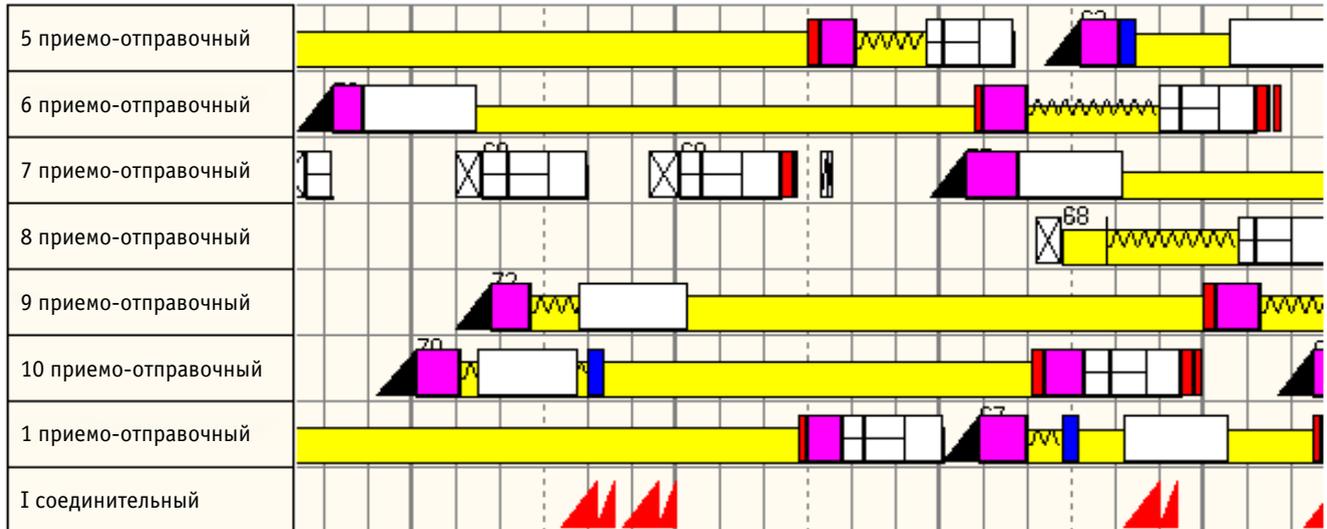


Рис. 6. Динамика работы предгорочного парка при переходе на новый план формирования

п	операция	графически	в сутки	кол-во	на операцию
вн	Осмотр по приему		112:44	107	1:03
	Окончание формирования		31:13	37	0:51
	Расформирование		18:27	49	0:23
	Перестановка		17:10	69	0:15
	Формирование подачи		14:31	11	1:19
	Уборка поездного локомотива		5:00	42	0:07
	Прием поезда		4:56	90	0:03
	Отправление поезда		4:52	82	0:04
			2:21	45	0:03
	Подача поездного локомотива		1:17	33	0:02
	Следование локомотива резервом		0:56	72	0:01
	Закрепление состава		0:14	120	0:00

Рис. 7. Задержки в операциях при работе станции в нормальном режиме

п	операция	графически	в сутки	кол-во	на операцию
вн	Осмотр по приему		135:58	113	1:12
	Расформирование		38:54	53	0:44
	Окончание формирования		25:36	38	0:40
	Перестановка		16:58	63	0:16
	Уборка поездного локомотива		8:29	40	0:13
			5:49	42	0:08
	Формирование подачи		5:36	7	0:48
	Прием поезда		4:44	92	0:03
	Отправление поезда		4:24	83	0:03
	Подача поездного локомотива		2:11	37	0:04
	Следование локомотива резервом		1:28	76	0:01

Рис. 8. Задержки в операциях при работе станции в режиме перехода

Суммарные задержки операции «расформирование» за сутки возросли с 18 ч 27 мин до 38 ч 54 мин, а задержка в среднем на одну операцию увеличилась с 23 до 44 мин.

В предгорочном парке А средний простой увеличился с 1 ч 49 мин до 1 ч 77 мин, а в сортировочном парке Б — с 3 ч 34 мин до 5 ч 05 мин (рис. 9). К дополнительным расходам на выполнение перехода необходимо прибавить стоимость увеличенных вагоно-часов. Это, конечно, снизит доходы станции.

То есть в данном случае выполняется функция станции как элемента, но страдает функция станции как системы. Про-

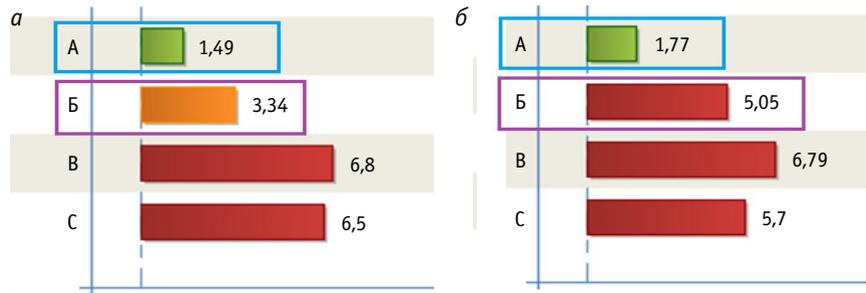


Рис. 9. Средний простой вагонов в парках в нормальном режиме (а) и в режиме перехода (б)

тиворечие. Здесь согласованность функций можно организовать аналогичным способом: дорога оплачивает дополни-

тельные затраты станции с необходимым добавлением прибыли. Тогда и возникает гармония.

## Литература

1. Системные исследования. Методологические проблемы. Ежегодник 1980. Москва : Наука, 1981. 424 с.
2. Аверьянов А. Н. Система: философская категория и реальность. Москва : Мысль, 1976. 185 с.
3. Горев А. Э. Основы теории транспортных систем. Санкт-Петербург : СПбГАСУ, 2010. 214 с.
4. Козлов П. А. Системные исследования — новый подход // Наука и техника транспорта. 2014. № 1. С. 46–50. ISSN 2074–9325.
5. Козлов П. А. О системах и системности на транспорте // Транспорт Урала. 2016. № 2 (49). С. 3–8. DOI: 10.20291/1815-9400-2016-2-3-8. ISSN 1815–9400.
6. Герцен А. И. Собрание сочинений в 30 т. Москва, 1954–1964. Т. 21. С. 12.
7. Козлов П. А., Козлова В. П., Осокин О. В. Об экономической сущности транспорта // Транспорт: наука, техника, управление. 2020. № 2. С. 57–59. ISSN 0236–1914.

Объем статьи 0,57 авторских листа

## References

1. System research. Methodological problems. Yearbook 1980 [Sistemnye issledovaniya. Metodologicheskie problemy. Ezhegodnik 1980]. Moscow, Science. 1981. 424 p.
2. Averyanov A. N. System: philosophical category and reality [Sistema: filosofskaya kategoriya i realnost']. Moscow, Thought. 1976. 185 p.
3. Gorev A. E. Fundamentals of the theory of transport systems [Osnovy teorii transportnykh system]. St. Petersburg, 2010. 214 p.
4. Kozlov P. A. System studies — new approach [Sistemnye issledovaniya — novyy podkhod]. Science and technology in transport. 2014. No. 1. Pp. 46–50. ISSN 2074–9325.
5. Kozlov P. A. On systems and systemacity of transport [O sistemakh i sistemnosti na transporte]. Transport of the Urals. 2016. No. 2 (49). Pp. 3–8. DOI: 10.20291/1815-9400-2016-2-3-8. ISSN 1815–9400.
6. Gertsen A. I. Collected works in 30 books [Sobranie sochineniy v 30 tomakh]. Moscow, 1954–1964. Book 21. P. 12.
7. Kozlov P. A., Kozlova V. P., Osokin O. V. On the economic essence of transport [Ob ekonomicheskoy sushhnosti transporta]. Transport: science, equipment, management. 2020. No. 2. Pp. 57–59. ISSN 0236–1914.

УДК 656.078.14

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

## **МОДЕЛЬ АДАПТИВНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ ТЯГОВЫМИ РЕСУРСАМИ С ИДЕНТИФИКАЦИЕЙ В ПЕРЕВОЗОЧНОМ ПРОЦЕССЕ ПОЛИГОНА ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ**

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

## **Model of adaptive regulation and traction resource management with identification in the railway transportation process**

### Аннотация

На основании исследований, посвященных структурным преобразованиям железнодорожного транспорта и учитывающих тенденции развития транспортной отрасли, активную цифровизацию экономики, внедрение полигонных принципов управления движением поездов, проанализировано текущее состояние локомотивного комплекса ОАО «РЖД». Приведены механизм комплексной оценки распределения локомотивов, нацеленный на раскрытие потенциала ремонтных и эксплуатирующих предприятий, а также адаптивный механизм регулирования участков, обслуживаемых локомотивными бригадами, обеспечивающий выполнение установленных параметров использования тяги на инфраструктуре. Рассмотрена организационная модель адаптивного регулирования и управления тяговыми ресурсами, позволяющая независимым коммерческим структурам и физическим лицам на конкурентной основе предоставлять перевозчикам тягу и локомотивные бригады.

**Ключевые слова:** тяговые ресурсы, железнодорожный транспорт, адаптивное управление, агрегация локомотивных бригад, комплексная оценка распределения локомотивов

### Abstract

The current state of the JSC «Russian Railways» locomotive complex is analyzed in the context of landfill technologies and active digitalization of production and economic processes. The mechanism of comprehensive assessment of the distribution of locomotives and adaptive mechanism for regulating the areas serviced by locomotive crews are considered, which allow to realize the potential of locomotive enterprises to fulfill the established parameters of the use of traction facilities on the infrastructure. The organizational model of adaptive regulation and management of traction resources is proposed, which makes it possible to organize, at the request of carriers, the provision of traction and locomotive crews by independent commercial structures and individuals on a competitive basis.

**Keywords:** traction resources, railway transport, adaptive management, aggregation of locomotive crews, comprehensive assessment of locomotive distribution

DOI: 10.20291/1815-9400-2023-3-8-17

**В** Российской Федерации продолжается успешное внедрение экономических реформ. Оно сопровождается развитием правовой, технической, налоговой и нормативной документации и призвано отвечать требованиям современного финансового рынка для нивелирования негативного влияния на отечественную экономику санкций, введенных с первого квартала 2022 г.

Позитивная макроэкономическая ситуация, которая начала складываться в стране во второй половине 2022 г., способствовала и существенному восстановлению спроса на услуги железнодорожного транспорта — наблюдается стабильное восстановление объемов грузовых отправок, а также рост пассажирских перевозок: в 2022 г. было перевезено свыше 1,1 млрд пассажиров, или +7,7 % к уровню 2021 г. [1] (табл. 1).

Кроме того, по состоянию на 31.12.2022 г. эксплуатируемый парк тяговых ресурсов ОАО «РЖД» сконцентрировал 13462 ед. (+1,3 % к уровню 2021 г.), что отразилось на основных показателях деятельности компании (табл. 2).

Среднесуточное содержание локомотивов на полигоне железных дорог в 2022 г. к уровню 2021 г. составило:

- по маневровому движению — снижение на 2 ед;
- пассажирскому — увеличение на 15 ед.;
- хозяйственному — повышение на 65 ед.;
- грузовому — рост на 93 ед.

С учетом сегодняшнего резкого увеличения основных эксплуатационных показателей восточного направления железнодорожных перевозок ОАО «РЖД» к 2025 г. ожидаемый прирост грузооборота в сравнении с уровнем 2021 г. превысит 21 %. При этом в 2021 г. уже к значениям 2020 г. грузооборот вырос на 3,1 %, погрузка — на 3,2 % (свыше 39,3 млн т), снижение участковой скорости составило 4,6 % (до 39,7 км/ч) с ростом производительности локомотива на 0,9 %, средняя дальность перевозок увеличилась на 17 км (+0,9 %) и достигла 1879 км [2].

Таблица 1

Основные показатели пассажирских перевозок ОАО «РЖД» в 2018–2022 гг. [1]

Показатель	Год					2022 г. к 2021 г., %
	2018	2019	2020	2021	2022	
Пассажирооборот, млрд пасс.-км	129,4	133,4	78,1	103,4	122,8	18,7
дальнее следование	96,3	99,1	53,5	74,5	91,3	22,6
пригородное сообщение	33,1	34,3	24,7	28,9	31,4	8,6
Отправление пассажиров, млн чел.	1157,2	1197,8	872,0	1053,6	1135,2	7,7
дальнее следование	110,3	116,5	67,4	91,9	108,3	17,8
пригородное сообщение	1046,9	1081,3	804,5	961,6	1026,9	6,8

Таблица 2

Динамика основных показателей перевозочного процесса на инфраструктуре ОАО «РЖД» в 2022 г. к значениям 2021 г. [1]

Показатель	Результат в 2022 г.	2022 г. к 2021 г., %
Средний вес поезда, т	4079	+0,5
Средняя участковая скорость, км/ч	38,3	-3,5
Средняя техническая скорость, км/ч	44,0	-3,7
Среднесуточная производительность локомотива эксплуатируемого парка, тыс. ткм брутто	1666	-1,5
Среднесуточная производительность локомотива рабочего парка, тыс. ткм брутто	2143	-2,1
Удельный расход электроэнергии на тягу поездов, кВт·ч/10 тыс. ткм брутто	107,7	+0,4
Удельный расход топлива на тягу поездов, кг у.т./10 тыс. ткм брутто	55,9	+1,8

Переход на полигонные принципы движения поездов требует выполнения технологических процессов не в пределах одной железной дороги, а в границах расширенных полигонов управления, объединенных решением таких общих задач, как организация грузовой работы, предоставление «окон» для ремонтно-строительных работ, управление поездопотоками с использованием единых поездных локомотивов [3]. То есть под полигоном железных дорог понимается объединение поездо-участков, имеющих схожую инфраструктуру, которые характеризуются единой технологией работы тягового подвижного состава с учетом начала и окончания производственных циклов при обслуживании общих пассажирских и грузопотоков для достижения максимального транспортно-логистического эффекта.

Переход к полигонным технологиям, обусловленный изменением структуры грузопотоков в междорожном сообщении, позволил обеспечить в северо-западной части Западного полигона не только устойчивую погрузку (свыше 50 %), но и выполнение 40 % от сетевого показателя тонно-километровой работы в результате рекордного значения обмена поездами (более 100 ед./сут) по стыковым станциям Восточного полигона.

Проведенный в [4] SWOT-анализ определил возможности полигонной системы управления как улучшение результатов эксплуатационной работы. При этом в мировой практике сложилась тенденция по укрупнению полигонов управления перевозками. Например, на железной дороге BNSF в США один

диспетчерский центр с оперативным персоналом в 100 сотрудников управляет одновременным движением до 2 тыс. поездов на полигоне протяженностью 53,3 тыс. км.

Однако использование на полигоне различных типов электрической тяги создает дополнительные сложности для планирования графика движения на стыковых станциях. Поэтому планирование сводится к поиску таких маршрутов локомотивов  $M$  и поездов  $P$ , в которых общее количество локомотивов  $L$ , используемых в этих поездах  $S$ , будет минимальным и покрывающим все маршруты  $M$  и  $P$  [5], т.е. решается следующая комбинаторная задача:

$$|L| \rightarrow \min_{M, P}, \quad (1)$$

где  $|L|$  — количество локомотивов из множества  $L$  с заданным маршрутом следования.

Для каждого локомотива  $l \in L$  из каждого поезда  $s \in S$  назначены множества допустимых маршрутов  $M_l$  и  $P_s$ :

$$M_l \in M, l \in L; \quad (2)$$

$$P_s \in P, s \in S. \quad (3)$$

При ограничениях (2)–(3) учитываются только допустимые маршруты локомотивов  $L$  и поездов  $S$ , чтобы обеспечить выполнение плана перевозок на полигоне в установленный срок:

$$P \triangleq U_{s \in S} F(P_s) \subset M \triangleq U_{l \in L} F(M_l). \quad (4)$$

Условием (4) определено, что каждый поезд  $S$  управляется определенным локомотивом  $L$ , который движется по некоторой нитке графика  $N$ , не задействованной для поездов  $P$ , т.е. всякой используемой нитке графика  $N$  соответствует либо локомотив  $L$ , движущийся резервом, либо определенный поезд  $P$ , в том числе с несколькими локомотивами  $L$ :

$$F(P_s) \cap F(P_{s'}) = \emptyset, \quad s \neq s', \quad s, s' \in S. \quad (5)$$

Условие (5) используется только для маршрутов движения поездов  $P$ , которые не пересекаются, так как одной нитке графика соответствует движение только одного поезда  $S$ . Поэтому действие условия (5) на маршруты локомотивов  $M$  не распространяется в связи с движением локомотивов  $L$  как в составе поезда (вспомогательный пробег), так и резервом:

$$F(M_l) \subset N_l, \quad l \in L; \quad (6)$$

$$F(P_s) \subset N, \quad s \in S. \quad (7)$$

Условия (6) и (7) требуют, чтобы допустимые маршруты составлялись только из простых ниток графика  $N$ , поэтому множества  $P \subset N$  и  $M \subset N$  составлены из таких ниток.

Множество ниток графика  $N$  и поездов  $P$  определяется видом планирования (суточное, недельное, декадное и т.д.) перевозок, в котором начальное состояние локомотива задается условиями:

$$\mathfrak{D}_0(M_l) = \mathfrak{D}_0^l; \quad (8)$$

$$t_0(M_l) \geq t_0^l, \quad (9)$$

где  $\mathfrak{D}_0$  — фиксированная станция;  $t_0$  — момент времени.

Использование полигонной технологии при организации движения поездов требует, чтобы были исключены следующие основные проблемы, снижающие эффективность грузовых перевозок.

1. Непредвиденные задержки локомотивов под технологическими операциями, в том числе из-за необходимости совершенствования конструкции контактной сети, чтобы устранить места повышенной токовой и тепловой нагрузки в ее элементах. В работе [6] предложены решения, которые позволяют выравнивать распределение тока и температуры в элементах контактной сети, что, в свою очередь, способствует увеличению нагрузочной способности контактной сети на 6 %.

2. Трудности с формированием единого расписания. Проблема решается на основе приведенной выше комбинаторной задачи, использования методики расчетов на имитационных моделях сменно-суточных планов работы железных дорог, рассмотренной в [7], и с учетом организации строительства и функционирования логистических центров (графические представления инновационных схем их финансирования на проектной стадии приведены в [8]).

3. Непостоянство суточного плана перевозок, которое усугубляется тем, что частные вагоноремонтные предприятия, независимые от перевозчика и владельца инфраструктуры железнодорожного транспорта, выполняют текущий отцепочный ремонт избыточного парка вагонов на погрузочно-выгрузочных поездо-участках полигона. Эта проблема должна решаться при активном участии административно-регулирующих органов сферы транспорта [9].

4. Отсутствие локомотивов, работающих на требуемом виде тока (постоянном или переменном), при формировании состава на станции. Проблему можно решить за счет ввода в эксплуатацию магистральных грузовых электровозов с двойным напряжением (например, ЭВ120 «Князь Владимир» [10]). При этом необходим поиск оптимального управления локомотивами по заданным режимам и параметрам движения поезда, т.е. с минимальным расходом энергии, достижением оптимальной силы тяги и соблюдением перегонного времени хода [11].

Развитие информационного обеспечения ОАО «РЖД» способствовало повышению уровня координации бизнес-процессов путем перехода на полигонные системы организации движения поездов для увеличения производительности локомотивов, улучшения качественных показателей производственной деятельности (внутренняя клиентоориентированность), удовлетворения потребностей перевозочного процесса меньшим количеством тягового ресурса. Сегодня деятельность ОАО «РЖД» направлена на повышение эффективности перевозочного процесса и развитие современных технологий в транспортной отрасли. Поэтому предусмотрен переход на цифровую железную дорогу [12] — единый информационный комплекс взаимосвязанных систем автоматики и обработки данных по управлению железнодорожными перевозками (рис. 1).

Проектная пропускная и провозная способность поездо-участка ограничивается уровнем качества ремонтно-путевых работ, режимом эксплуатации железнодорожной линии и зависит от фактического технического состояния инфраструктуры. Следовательно, в сетевой структуре необходимо решить задачу по оптимальному распределению локомотивов для каждого вида движения поездов на полигоне. При этом должны учитываться объемы затрачиваемых энергоресурсов на передислокацию и эксплуатацию тяги, поездное положение и адресная потребность в локомотивном парке для удовлетворения производственных нужд ОАО «РЖД». В данных условиях наиболее точным и оперативным методом расчета потребности локомотивов становятся инструменты технологии искусственного интеллекта, используемые, в частности, при разработке механизма комплексной оценки (КО) распределения локомотивов (рис. 2).

Комплексная оценка многоступенчатого процесса распределения локомотивов по видам движения на полигоне с учетом степени влияния большого количества разнородных показателей полигона формируется путем свертки характеристик процедур оценивания на пересечении получаемых данных по строкам и столбцам соответственно. В структуре выбранной оценки каждый узел дерева свертки разделяется на две логические группы матриц свертки (МС) по методу дихотомии. Механизм КО =  $f(A, \dots, N_k)$  работает путем объединения частных



Рис. 1. Структура цифровой железной дороги



Рис. 2. Механизм комплексной оценки распределения локомотивов

показателей и критериев  $\{A, B, \dots, N_k\}$  достижения полигоном цели по распределению локомотивов в предварительно сформированные наиболее значимые группы. В последующем эти группы преобразуются в четырехбалльную шкалу (плохо — 1, удовлетворительно — 2, хорошо — 3, отлично — 4), унифицированную по генеральному показателю и основанную на попарной свертке балльных оценок. Затем определяются граничные уровни получаемого эффекта  $\mathcal{E}$  по каждому поездо-участку  $N$ :  $N_3 < \mathcal{E} \leq N_4$  — отлично,  $N_2 < \mathcal{E} \leq N_3$  — хорошо,  $N_1 < \mathcal{E} \leq N_2$  — удовлетворительно,  $\mathcal{E} \leq N_1$  — неудовлетворительно.

Полигонная система сформирована трехуровневым управлением перевозочным процессом, в котором наиболее ответственные решения по организации ремонтно-путевых работ инфраструктуры, распределению погрузочных ресурсов и регулированию локомотивного парка принимаются во взаимодействии регионального и центрального уровней. В то же время возможные противоречия в работе затрагивают все уровни управления, и, чтобы их разрешить, необходимо разработать механизм, обеспечивающий бесперебойную эксплуатационную работу полигона.

Для устранения возможных несогласованных действий между различными уровнями полигонного управления разработан адаптивный механизм регулирования участков обслуживания локомотивных бригад (рис. 3). С его помощью дирекция тяги (Т) взаимодействует с дирекцией управления движением (Д), центром управления тяговыми ресурсами (ЦУТР), единым центром управления перевозками (ЕДЦУП), их структурными подразделениями и на основе комплексной оценки  $e_t$  анали-

зирует эффективность использования локомотивных бригад и регулирует их участки обслуживания.

Как видно из рис. 3, различают основные показатели, характеризующие выполнение плановых заданий, и дополнительные, которые определяют эффективность производства. По результатам комплексных оценок локомотивных бригад и состояния локомотивов рассчитывается себестоимость использования тяги в периоде  $t$ :

$$c_t = \sum_{i=1}^n k_{it} P_{it}, \quad (10)$$

где  $k_{it}$  — объем  $i$ -го ресурса, необходимого на эксплуатацию локомотива в периоде  $t$ ;  $P_{it}$  — расценка  $i$ -го ресурса для использования локомотива;  $i$  — номер ресурса,  $i = 1, 2, \dots, n$ .

Рассмотрим частный случай дополнительного показателя «управление тягой» в хозяйственном движении ОАО «РЖД», под нужды которого в 2022 г. направлено свыше 1700 ед. (+0,1 % к уровню 2021 г.) тягового подвижного состава. Порядок распределения локомотивов на полигоне в таком движении определен следующей технологией: для хозяйственных нужд устанавливается соответствующий номерной диапазон поездов, к которому возможно подвзывать локомотивы только определенных серий, удовлетворяющих установленным требованиям по выполняемым видам ремонтно-путевых работ и техническим характеристикам путевой техники. Поэтому за каждым локомотивом, распределяемым по виду движения на полигоне, закрепляется условный номер:

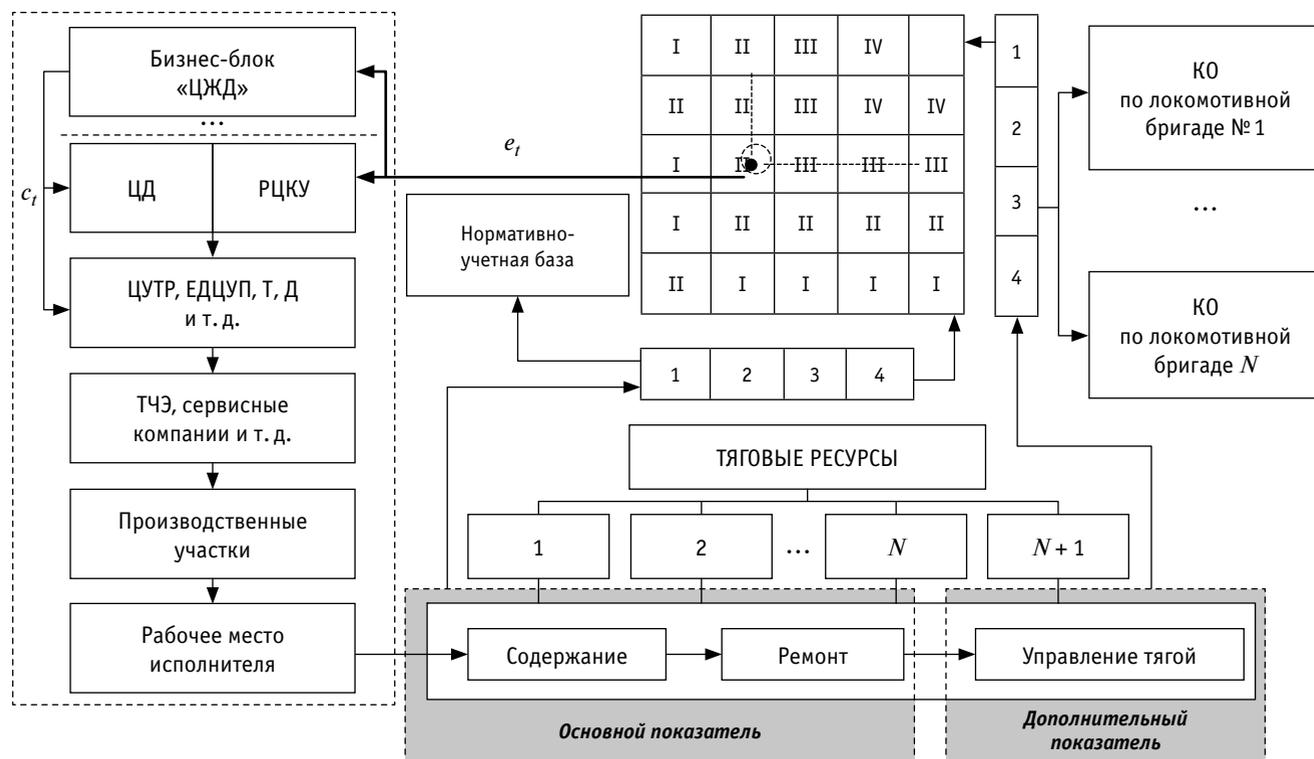


Рис. 3. Адаптивный механизм регулирования участков обслуживания локомотивных бригад на полигоне железных дорог

1 — использование в распределении под хозяйственные поезда на полигоне;

2 — относительное исключение из хозяйственного движения по причине неудовлетворения техническим требованиям путевой машины, указанной в заявке дирекции по ремонту пути или инфраструктуры, а также использование «толчком»;

3 — прямое удаление из списка (для пассажирских серий).

Локомотивам, распределяемым по видам движения, присваивается условный номер 1 при соблюдении следующих параметров: тяговый ресурс удовлетворяет техническим требованиям ремонтно-путевой техники; не используется для подталкивания составов; не соответствует перечню пассажирских локомотивов; грузовой вид движения является приоритетным.

С использованием базисных параметров вышеуказанных условий создан алгоритм работы с объектами достаточно высокого уровня абстракции для подбора тяговых ресурсов по техническим характеристикам поездо-участка (рис. 4). В этом алгоритме при помощи операторов принятия решений «if» и «else» завершается поиск искомого заданного хозяйственного вида движения локомотива с фильтрацией множества оставшихся тяговых средств (например, с условными номерами 2, 3).

На этапе поиска первого годного решения  $A$  распределения локомотивов из множества элементарных событий  $G = \{g_1, \dots, g_2\}$  в приемлемый временной интервал необходимо ограничивать активность диспетчерского аппарата поездо-участков, исходя из того что полезность от принятого решения  $A$  в зависимости от результата  $g_i \in G (i = 1, \dots, n)$  определяется функцией  $\varphi(A|g_i)$ . С учетом того что появление элементарных подборов локомотивов формируется вероятностной мерой  $J$ , предстоящая полезность решения  $A$ :

$$\varphi(A) = \sum_{i=1}^n \varphi(A|g_i)J(\{g_i\}). \quad (11)$$

При этом, «запуская» активность диспетчерского персонала поездо-участка по приведенному выше порядку и запоминая состояния системы до и после, алгоритм предусматривает возможность «отката» в случае неудовлетворительного решения  $A$ .

С учетом исходных данных о маршрутах следования поездов аналогично хозяйственному движению формируются условия назначения локомотивов в грузовом движении: тяговые расчеты на поездо-участке (railway) отфильтровывают имеющиеся в распоряжении серии локомотивов (series) с минимальным количеством секций (section) по весовой норме поезда для максимального руководящего уклона. По результатам анализа путевого развития станций, номеров поездов, мест дислокации, тяговых характеристик и технического состояния локомотивов выбирается наиболее оптимальный вариант грузового движения с конечной станцией по маршруту следования поезда до размена локомотивных бригад или тягового средства.

Себестоимость перевозочного процесса может быть снижена за счет рационального решения технологической проблемы эффективной организации использования тяги. На состоянии поездо-участков  $U_q$  полигона основан алгоритм планирования и распределения тяговых ресурсов под поезда.

В этом алгоритме процесс регулирования локомотивов учитывает не только смену локомотивов на граничных станциях  $B(t_x - t_z \leq t_d)$ , но и смену бригад на установленных станциях  $N$  поездо-участков  $U_q$  по их текущей дислокации на тяговых плечах  $U_d$  (рис. 5).

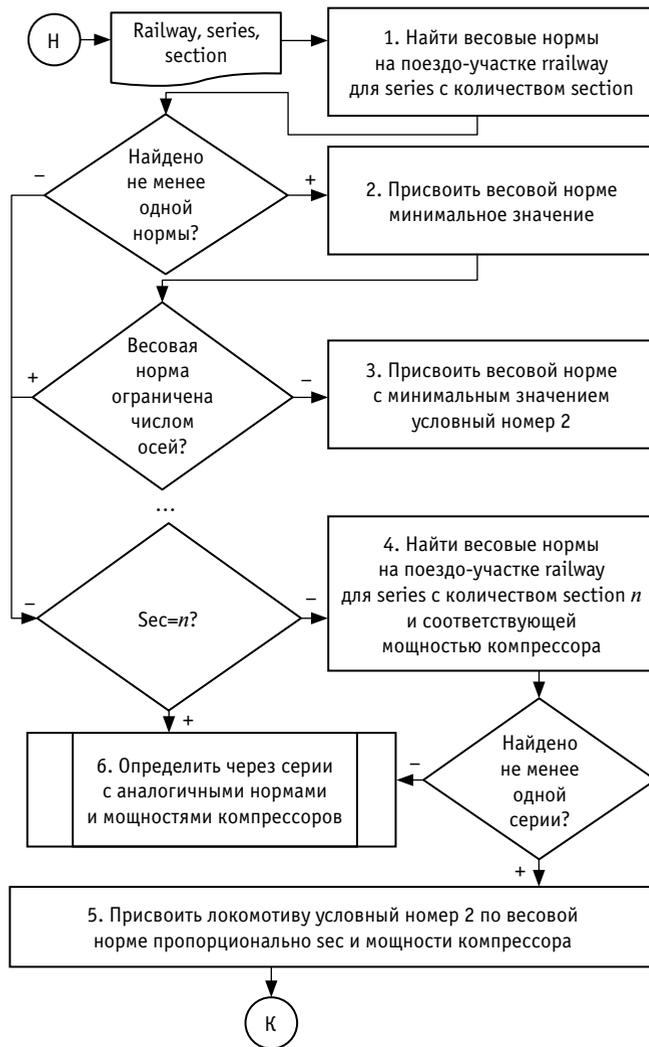


Рис. 4. Блок-схема алгоритма подбора тяговых ресурсов по техническим параметрам поездо-участка

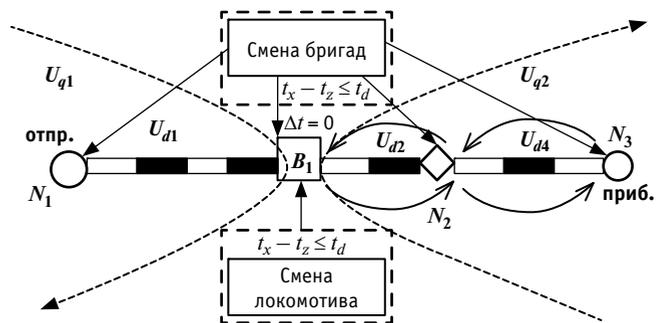


Рис. 5. Подвязка локомотивов и локомотивных бригад под поезда

При численном эксперименте работы алгоритма рассмотрено место производства ремонтных работ на инфраструктуре для выбора локомотива и локомотивной бригады по наиболее благоприятным критериям (см. рис. 5) как на прилегающих станциях (из 42 возможных), так и в ближайших четырех депо с учетом суточного задания по принципу «минимизация упущенной выгоды при заданных параметрах».

Далее проанализирована эффективность полученного решения для разных временных интервалов планирования, способных оценить вычислительную эффективность алгоритма. Эти данные основаны на реальном движении грузовых поездов на некотором участке полигона в течение 10 сут (табл. 3).

Таблица 3

Результаты эксперимента

Цикл моделирования, сут	I	II	IV	VI	X
Количество локомотивов, шт.	494	521	502	481	513
Время работы алгоритма, с	34	71	106	806	1648

Таким образом, при решении задачи по распределению локомотива количество потенциальных вариантов не оказывает существенного влияния на получаемые результаты эксплуатационной работы поездо-участка, но значительно увеличивает время проведения расчетов. При этом по видам движения учитывается принцип определения энергоэффективных решений и маршрутов движения поездов, который позволяет

определить станцию с наиболее благоприятными условиями для смены локомотива на железнодорожных линиях как с одним видом тока, так и с двухсистемными тяговыми средствами.

В свою очередь, решение задачи оптимизации (1) базируется на результатах расчета КО с использованием технологии имитационного моделирования расхода ресурсов, основанной на современной теории автоматического управления в динамических системах: в расчетных условиях оптимальности выполнение условий рационального управления тяговыми ресурсами сводится к решению задач математического программирования. Так как ручной расчет КО требует значительных трудовых и временных ресурсов перевозчика, использование инновационных технологий автоматизации работ при систематизации процесса распределения локомотивов по видам движения является особенно актуальным. Представленный в статье механизм оценки распределения локомотивов, основанный на результатах КО, формируется при помощи цифровой системы автоматизации и современных технических средств (совокупно относящихся к функционированию искусственного интеллекта) в программном комплексе «Интеллектуальная система регулирования и управления тяговыми ресурсами полигона железных дорог (ИСУ РУТР)» [13], который предназначен для адресной подвязки локомотивов на полигоне в поездном, маневровом и хозяйственном движении (рис. 6).

В комплекс ИСУ РУТР интегрированы автоматизированные системы [14, 15], которые позволяют в автоматическом режиме распределять тяговые ресурсы в соответствии с утвержденными наряд-заказами дирекций при выполнении графика движения поездов с учетом эффективного использования

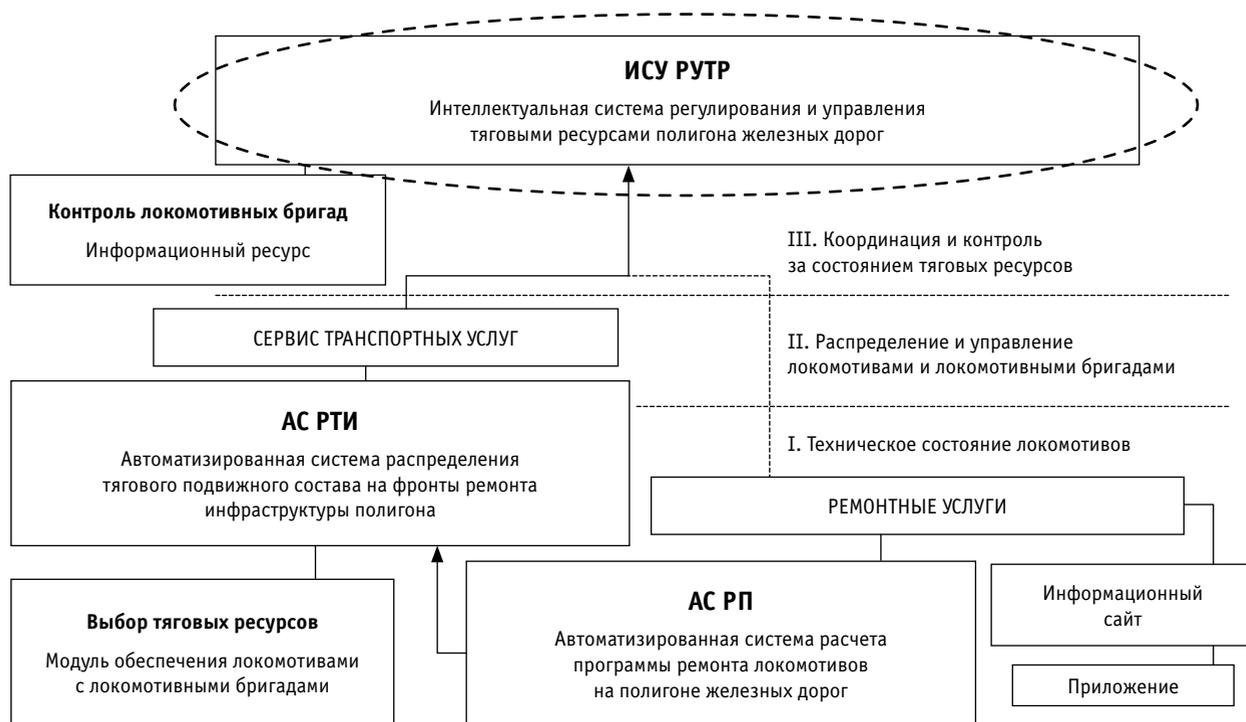


Рис. 6. Структура программного комплекса ИСУ РУТР

и содержания локомотивов в технически исправном состоянии [16]. Например, в [14] формализована процедура принятия решений по алгоритму, показанному на рис. 4, которая на основе данных о плечах обращения локомотивов и локомотивных депо их приписки обеспечивает распределение по заявкам суточного эксплуатируемого тягового парка на фронты ремонта инфраструктуры.

Функциональность и инструментарий ИС РУТР позволяют: согласно суточным заявкам по видам движения достаточно точно распределять эксплуатируемый парк тяговых средств с учетом плеч обращения локомотивов и наличия локомотивных бригад на станциях назначения;

корректировать распределение локомотивов с учетом поездной обстановки;

контролировать месторасположение путевой техники и потребное под ее нужды количество локомотивов с заданными параметрами.

При полном выборе параметров алгоритма (см. рис. 4 и 5) гарантируется высокая конвергентность результатов подвязки локомотивов по видам движения в ИСУ РУТР. Внедрение подобных технологий позволяет значительно сократить непроизводительные затраты на внутрихозяйственном рынке перевозчика и владельца инфраструктуры (ОАО «РЖД»).

Стратегический приоритет в развитии транспортно-логистического бизнеса ОАО «РЖД» обеспечивается последовательным расширением масштабов с 2PL- до 4PL-услуг, в том числе за счет перехода от разрозненных транспортных услуг к предоставлению комплексного интегрированного сервиса

«от двери до двери» с одновременным формированием глобальной логистической цепочки для создания диверсифицированной продуктовой корзины. При этом использование конвенционального железнодорожного подвижного состава (интермодальной транспортной тары) является эффективным при перевозках на расстояния до 1000 км [17].

Технико-технологическая часть бесперебойной организации процессов использования и контроля состояния тяговых ресурсов, реализованная в ИСУ РУТР, позволяет разработать процедуру использования локомотивов и локомотивных бригад на коммерческой основе. Для этого создана модель адаптивного регулирования и управления тяговыми ресурсами. Модель позволяет организовать предоставление тяги и локомотивных бригад по заявкам перевозчиков независимыми коммерческими структурами и физическими лицами на конкурентной основе при помощи комплексной оценки.

С этой целью организован Центр агрегации тяговых ресурсов и локомотивных бригад (ЦАТР). Он обеспечивает непрерывный мониторинг потребности в предоставлении услуг тяги, структурирует и систематизирует работу локомотивных бригад по заказам перевозчиков на конкурентной экономически выгодной основе с учетом практически значимых категорий оценочных показателей. В зависимости от влияния внешней среды (стохастической помехи  $\xi \in \Theta \subset R^n$ ) управляющий, т.е. полигон, на основе процедуры КО организует распределение локомотивов по видам движения.

Модель адаптивного регулирования и управления тяговыми ресурсами на полигоне (рис. 7) начинает функционировать



Рис. 7. Модель адаптивного регулирования и управления тяговыми ресурсами на полигоне

с подачи корпоративным уровнем управления параметров и объемов перевозок по направлениям и временным периодам. С учетом воздействия внешней среды  $\zeta$  на полигонном уровне формируются управленческие рекомендации и нормативы  $x_t$ , производственных показателей, на основе которых региональным уровнем распределяются ресурсы  $u_t$ . Далее подразделение линейного уровня управления выбирает показатель из собственного потенциала, чтобы максимизировать свою целевую функцию.

Дальнейший контроль выполнения показателя  $y_t$  с использованием процедур планирования  $\pi$  и регулирования  $Q$  осуществляет региональный ЦАТР, который отвечает за последующее формирование будущих ресурсов  $u_{t+1} = Q(a_{t+1})$ ,  $u_{t+1} \in U_{t+1}$  и нормативов  $x_{t+1}$ . Соответствующие показатели для агрегации перевозок с помощью КО на каждом уровне формируют ранг по производственно-экономическим блокам деятельности ЦАТР.

Основные показатели работы локомотивных бригад с определенным потенциалом деятельности  $p_t = (u_t, \zeta)$  являются их выходами (результатами работы)  $y$ . Сверяя запланированные показатели  $x_t$  (норму часов в месяц, график работы, затраты на заработную плату и т.д.) с фактическими значениями выходов  $y_t$ , ЦАТР стимулирует (поощряет) управленческими воздействиями  $\varphi$  локомотивные бригады на выполнение поездов по установленным нормативам  $R$  в следующие периоды:

$$\varphi_t = f(x_t, y_t), \varphi \in R^1, \quad (12)$$

где  $f$  — функция непрерывного стимулирования локомотивных бригад.

Так же и целевая функция локомотивных бригад (депо) в каждом периоде  $\tau$  стремится к увеличению заинтересованности локомотивных бригад по выполнению установленных ЦАТР показателей:

$$V_t = \sum_{\tau=t}^{t+T} \rho^{\tau-t} \varphi_{\tau}, \quad (13)$$

где  $\rho$  — коэффициент дисконтирования,  $0 < \rho < 1$ ;  $T$  — дальновидность ЦАТР в каждом периоде времени.

В связи с некоторой неопределенностью реализации потенциала локомотивных бригад (депо) и результатов их работы  $R(\Sigma) = \min_{\xi \in \Theta} \min_{y \in R(\Sigma(p))} \psi(x_t, u_t, y_t)$  для достижения максимальных значений выходов  $y_t^*$  из возможного множества, запланированных полигоном, перед ЦАТР встает необходимость решения задачи  $R(\Sigma, p_t) = \arg \max_{y_t \in Y(p_t)} V(x_t, y_t)$  [18], что гаранти-

рует максимальную экономическую эффективность использования локомотивных бригад на конкурсной основе.

Представленная в статье комплексная оценка дает возможность вырабатывать технологические решения, направленные на эффективное распределение локомотивов по видам движения на полигоне с учетом поданных локомотивными бригадами заявок на управление локомотивами при исполнении графика движения поездов. На основе КО авторами описан адаптивный механизм регулирования участков обслуживания локомотивных бригад, позволяющий организовать предоставление тяги и локомотивных бригад по заявкам перевозчиков сторонними локомотивными бригадами. При этом авторами разработан единый информационный комплекс систем управления и обработки данных «Интеллектуальная система регулирования и управления тяговыми ресурсами полигона железных дорог», состоящий из трех автоматизированных систем по сбору, анализу исходных данных и принятию управленческих решений по локомотивам и локомотивным бригадам.

В основу функционирования ИСУ РУТР положена представленная в статье модель адаптивного регулирования и управления тяговыми ресурсами. Эта модель позволяет автоматизировать технологию распределения локомотивов для выполнения основных показателей эксплуатационной работы полигона, в том числе для решения государственных задач социального, экономического и оборонного значения в разрезе обеспечения безопасности движения поездов.

## Литература

1. Годовой отчет ОАО «Российские железные дороги» за 2022 г. URL: <https://company.rzd.ru/ru/9471> (дата обращения: 13.07.2023).
2. Годовой отчет ОАО «Российские железные дороги» за 2021 г. URL: <https://ar2021.rzd.ru/ru> (дата обращения: 13.07.2023).
3. Технологический процесс работы центра управления перевозками восточного полигона (ЦУП ВП) / В. Л. Зобнин, А. Т. Осминин, Е. А. Сотников, М. А. Осминин // Вестник ВНИИЖТ. 2017. Т. 76. № 3. С. 146–152. DOI: <http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2017-76-3-146-152>. ISSN 2223-9731.
4. Сирина Н. Ф., Русин Д. Л. Эффективность локомотивного комплекса в полигонной системе управления ОАО «РЖД» // Транспорт и логистика: пространственно-технологическая синергия развития : сборник научных трудов IV международной научно-практической конференции, Ростов-на-Дону, 3–4 февраля 2020 г. Ростов-на-Дону : Изд-во РГУПС, 2020. С. 299–303.
5. Модель оптимального назначения локомотивов при формировании грузовых составов / Д. Н. Гайнанов, А. И. Кибзун, С. В. Иванов, А. В. Осокин // Интеллектуальные системы управления на

## References

1. Annual report of JSC «Russian Railways» for 2022 [Godovoy otchet OAO «Rossiyskie zheleznye dorogi» za 2022 g.]. URL: <https://company.rzd.ru/ru/9471> (access date: 13.07.2023).
2. Annual report of JSC «Russian Railways» for 2021 [Godovoy otchet OAO «Rossiyskie zheleznye dorogi» za 2021 g.]. URL: <https://ar2021.rzd.ru/ru> (access date: 13.07.2023).
3. Zobnin V. L., Os'minin A. T., Sotnikov E. A., Os'minin M. A. Technological work process of the control center for transportation of the eastern operational polygon [Tehnologicheskiiy protsess raboty tsentra upravleniya perevozkami vostochnogo poligona (TsUP VP)]. Russian Railway Science Journal. 2017. Vol. 76. No. 3. Pp. 146–152. DOI: <http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2017-76-3-146-152>. ISSN 2223-9731.
4. Sirina N. F., Rusin D. L. Efficiency of the locomotive complex in the JSC «Russian Railways» landfill management system [Effektivnost' lokomotivnogo kompleksa v poligonnoy sisteme upravleniya OAO «RZhD»]. Transport and Logistics: spatial and technological synergy of development. Proceedings of the 4th International Scientific and Practical Conference, Rostov-on-Don, February 3–4, 2020. Pp. 299–303.
5. Gaynanov D. N., Kibzun A. I., Ivanov S. V., Osokin A. V. Model of the optimal purpose of locomotives in the formation of freight trains [Model' opti-

- железнодорожном транспорте. Компьютерное и математическое моделирование : труды Четвертой научно-технической конференции с международным участием (ИСУЖТ-2015), Москва, 18 ноября 2015 г. Москва : ОАО «НИИАС», 2015. С. 45–47.
6. Galkin A., Buynosov A., Parani A., Batrashov A. Improving of the electrothermal characteristics of the contact line // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2020. Vol. 1115. Pp. 195–205. DOI: 10.1007/978-3-030-37916-2\_21. ISSN 2194-5357.
  7. Александров А. Э., Сурин А. В. Методика использования имитационных моделей поездобразования 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.
  8. Покровская О. Д., Самуйлов В. М., Галкин А. Г. Инновационные основы финансово-экономической организации логистического центра // *Инновационный транспорт*. 2014. № 3 (13). С. 34–42. ISSN 2311-164X.
  9. Смольянинов А. В., Кармацкий В. Ф., Черепов О. В. Организационно-технологические аспекты текущего отцепочного ремонта грузовых вагонов // *Транспорт Урала*. 2023. № 2 (77). С. 8–15. DOI: 10.20291/1815-9400-2023-2-8-15. ISSN 1815-9400.
  10. Русин Д. Л. Организация полигонной системы управления тяговым подвижным составом // *Инновационный транспорт*. 2019. № 4 (34). С. 57–63. DOI: 10.20291/2311-164X-2019-4-57-63. ISSN 2311-164X.
  11. Сирина Н. Ф., Русин Д. Л. Реализация методов автоматизированного распределения тяговых ресурсов на обслуживание инфраструктуры полигона железных дорог // *Транспорт: наука, образование, производство : сборник научных трудов Международной научно-практической конференции, Ростов-на-Дону, 20–22 апреля 2020 г. Т. 3. Технические и экономические науки. Ростов-на-Дону : Изд-во РГУПС, 2020. С. 200–204.*
  12. Программа развития ОАО «РЖД» до 2025 года : утв. распоряжением Правительства Российской Федерации от 19.03.2019 г. № 466-р. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201903210017> (дата обращения: 15.07.2023).
  13. Интеллектуальная система регулирования и управления тяговыми ресурсами полигона железных дорог (ИС РУТР) / Д. Л. Русин : свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2020662421 Российская Федерация. Заявл. 28.09.2020 ; опубл. 13.10.2020.
  14. Автоматизированная система распределения тягового подвижного состава на фронты ремонта инфраструктуры полигона железных дорог (АС РТИ) / Н. Ф. Сирина, Д. Л. Русин : свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2020612196 Российская Федерация. Заявл. 05.02.2020 ; опубл. 18.02.2020.
  15. Автоматизированная система расчета программы ремонта локомотивов на полигоне железных дорог (АС РП) / Н. Ф. Сирина, Д. Л. Русин : свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2020617911 Российская Федерация. Заявл. 26.06.2020 ; опубл. 15.07.2020.
  16. Сирина Н. Ф., Русин Д. Л. Интеллектуальная система регулирования и управления тяговыми ресурсами полигона железных дорог // *Политранспортные системы : материалы XI Международной научно-технической конференции, Новосибирск, 12–13 ноября 2020 г. Новосибирск : Изд-во СГУПС, 2020. С. 658–664.*
  17. Комплексный анализ эффективности использования современного подвижного состава при перевозках массовых грузов / С. П. Вакуленко, М. В. Роменская, К. А. Калинин, К. И. Шведин // *Вестник ВНИИЖТ*. 2022. Т. 81. № 2. С. 170–178. DOI: 10.21780/2223-9731-2022-81-2-170-178. ISSN 2223-9731.
  18. Сирина Н. Ф. Методологические основы формирования адаптивных механизмов организации вагоноремонтного комплекса : диссертация на соискание ученого звания доктора технических наук. Екатеринбург, 2009. 295 с.
  - mal'nogo naznacheniya lokomotivov pri formirovaniy gruzovykh sostavov]. Intelligent control systems for railway transport. Computer and mathematical modeling. Proceedings of the 4th Scientific and Technical Conference with International Participation (ISRTC-2015), Moscow, November 18, 2015. Pp. 45–47.
  6. Galkin A., Buynosov A., Parani A., Batrashov A. Improving of the electrothermal characteristics of the contact line. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2020. Vol. 1115. Pp. 195–205. DOI: 10.1007/978-3-030-37916-2\_21. ISSN 2194-5357.
  7. Alexandrov A. E., Surin A. V. Method of using imitation models of train formation and movement in operation planning [Metodika ispol'zovaniya imitatsionnykh modeley poezdoobrazovaniya i prodvizheniya poezdov v operativnom planirovaniy]. *Transport of the Urals*. 2016. No. 4 (51). Pp. 66–70. DOI: 10.20291/1815-9400-2016-4-66-70. ISSN 1815-9400.
  8. Pokrovskaya O. D., Samuylov V. M., Galkin A. G. Innovation Foundations of Financial and Economic Organization of Logistics Center [Innovatsionnye osnovy finansovo-ekonomicheskoy organizatsii logisticheskogo tsentra]. *Innotrans*. 2014. No. 3 (13). Pp. 34–42. ISSN 2311-164X.
  9. Smolyaninov A. V., Karmatskiy V. F., Cherepov O. V. Organizational and technological aspects of current uncoupling repair of freight railway cars [Organizatsionno-tekhnologicheskie aspekty tekushhego otsepochnogo remonta gruzovykh vagonov]. *Transport of the Urals*. 2023. No. 2 (77). Pp. 8–15. DOI: 10.20291/1815-9400-2023-2-8-15. ISSN 1815-9400.
  10. Rusin D. L. Organization of polygon control system for traction rolling stock [Organizatsiya poligonnoy sistemy upravleniya tyagovym podvizhnym sostavom]. *Innotrans*. 2019. No. 4 (34). Pp. 57–63. DOI: 10.20291/2311-164X-2019-4-57-63. ISSN 2311-164X.
  11. Sirina N. F., Rusin D. L. Implementation of automated distribution methods of traction resources for maintenance of railway infrastructure [Realizatsiya metodov avtomatizirovannogo raspredeleniya tyagovykh resursov na obsluzhivanie infrastruktury poligona zheleznykh dorog]. *Transport: science, education, production. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference, Rostov-on-Don, April 20–22, 2020. Vol. 3. Pp. 200–204.*
  12. The development program of JSC «Russian Railways» until 2025 [Programma razvitiya OAO «RZhD» do 2025 goda]. Approved by the Order of the Government of the Russian Federation dated 19.03.2019 No. 466-r. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201903210017> (access date: 15.07.2023).
  13. Rusin D. L. Intelligent system of regulation and management of railway traction resources (IS TRRM) [Intellektual'naya sistema regulirovaniya i upravleniya tyagovymi resursami poligona zheleznykh dorog (IS RUTR)]. Certificate of registration of a computer program No. 2020662421. Russian Federation. Filed 28.09.2020 ; publ. 13.10.2020.
  14. Sirina N. F., Rusin D. L. Automated system of traction rolling stock distribution to the repair fronts of the railway infrastructure (AS RTI) [Avtomatizirovannaya sistema raspredeleniya tyagovogo podvizhnogo sostava na fronty remonta infrastruktury poligona zheleznykh dorog (AS RTI)]. Certificate of registration of a computer program No. 2020612196. Russian Federation. Filed 05.02.2020 ; publ. 18.02.2020.
  15. Sirina N. F., Rusin D. L. Automated system for calculating the locomotive repair program at the railway landfill (AS RP) [Avtomatizirovannaya sistema rascheta programmy remonta lokomotivov na poligone zheleznykh dorog (AS RP)]. Certificate of registration of a computer program No. 2020617911. Russian Federation. Filed 26.06.2020 ; publ. 15.07.2020.
  16. Sirina N. F., Rusin D. L. Intelligent system of regulation and management of railway traction resources [Intellektual'naya sistema regulirovaniya i upravleniya tyagovymi resursami poligona zheleznykh dorog]. *Polytransport systems. Proceedings of the 11th International Scientific and Technical Conference, Novosibirsk, November 12–13, 2020. Pp. 658–664.*
  17. Vakulenko S. P., Romenskaya M. V., Kalinin K. A., Shvedin K. I. Comprehensive analysis of the modern rolling stock efficiency in bulk cargo transportation [Kompleksnyy analiz effektivnosti ispol'zovaniya sovremennogo podvizhnogo sostava pri perevozkakh massovykh gruzov]. *Russian Railway Science Journal*. 2022. Vol. 81. No. 2. Pp. 170–178. DOI: 10.21780/2223-9731-2022-81-2-170-178. ISSN 2223-9731.
  18. 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.

УДК 656.2

Владимир Леонидович Герус, кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление эксплуатационной работой» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия

## СИСТЕМА КЛЮЧЕВЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ КАК ИНСТРУМЕНТ СТРАТЕГИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Vladimir Leonidovich Gerus, PhD in Engineering, Associate Professor, Operations Management Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia

### The system of key performance indicators as a strategic management tool

#### Аннотация

Сформулированы требования к управлению перевозочным процессом с учетом современных мировых стандартов. Показана необходимость использования системы сбалансированных показателей и ключевых показателей эффективности для обоснования и достижения целевых результатов в подразделениях железнодорожного транспорта.

Предложены способы, позволяющие адаптировать рассмотренные методологии к особенностям функционирования ОАО «РЖД» и внедрять эти методологии в Единый сетевой технологический процесс железнодорожных перевозок.

Обоснована необходимость обновления и совершенствования действующей в ОАО «РЖД» системы ключевых показателей эффективности и приведения ее в соответствие с современными технологиями управления перевозочным процессом.

**Ключевые слова:** стратегия развития железнодорожного транспорта, методологии управления перевозочным процессом, эффективность перевозочного процесса, система сбалансированных показателей, ключевые показатели эффективности, единый сетевой технологический процесс

#### Abstract

The requirements for the transportation process management are formulated taking into account modern world standards. The necessity of using the system of balanced indicators and key performance indicators to justify and achieve the target results of railway transport units is shown.

The measures allowing to adapt the considered methodologies to peculiarities of JSC «Russian Railways» functioning and introduce these methodologies into a single network technological process of railway transportation are proposed.

The necessity of updating and improving the system of key performance indicators operating in JSC «Russian Railways» and bringing it in line with modern technologies for the transportation process management is substantiated.

**Keywords:** railway transport development strategy, transportation process management methodologies, transportation process efficiency, balanced scorecard, key performance indicators, unified network technological process

DOI: 10.20291/1815-9400-2023-3-18-23

Системные изменения в мировой и в национальной экономике формируют новые условия функционирования предприятий: окружающая экономическая среда характеризуется все более интенсивной динамикой, большей неопределенностью и сложностью хозяйственных взаимосвязей, растущими управленческими рисками. В свою очередь, все это предъявляет новые требования к системам управления деятельностью, конкурентоспособностью, устойчивостью и эффективностью предприятий.

Сегодня наиболее актуальным и востребованным инструментом такого управления является концепция ключевых показателей эффективности (КПЭ). В ОАО «РЖД» система ключевых показателей эффективности стратегического уровня [1] используется для реализации долгосрочной программы развития холдинга путем планирования (среднесрочного и оперативного) и мониторинга выполнения целевых значений. Такая система дает возможность в полной мере применять процессный подход к управлению деятельностью ОАО «РЖД», оперативно изменять ее характеристики и параметры, а также наиболее эффективно организовывать рабочие процессы и мотивировать персонал к достижению целевых результатов. То есть система КПЭ используется как эффективный инструмент, позволяющий реализовать стратегию развития компании за счет решения тактических и оперативных задач.

К основным составляющим системы ключевых показателей эффективности ОАО «РЖД», сформулированным в документах [2, 3], можно отнести: структурные единицы и подразделения холдинга, задействованные в реализации системы; перечень КПЭ; источники данных и методологию их расчета; процедуру мониторинга данных и формирования отчетности для контроля за выполнением целевых значений КПЭ.

Система ключевых показателей эффективности базируется на четкой формализации и измеримости таких аспектов деятельности, как производственные и бизнес-процессы, управление ими, целесообразность программ и проектов развития компании. Целевые значения показателей позволяют контролировать уровень исполнительской дисциплины и эффективность деятельности подразделений холдинга.

Одна из первостепенных задач системы КПЭ заключается в совершенствовании функций управления персоналом путем

повышения мотивации, имеется в виду четкое понимание о результатах труда и его премировании, а также об основных ресурсах, необходимых для достижения целевых значений. Регулярная отчетность со стороны сотрудников и структурных подразделений компании о выполнении целевых значений позволяет быстро корректировать производственные процессы.

Систему ключевых показателей эффективности холдинга «РЖД» можно условно разделить на две группы [4]:

- операционные — предназначенные для управления филиалами и территориальными подразделениями;
- стратегические — ориентированные на реализацию стратегии и долгосрочной программы развития и выполняемые

на уровне холдинга, бизнес-блоков, дочерних и зависимых обществ, филиалов центрального уровня.

Анализ годовых отчетов ОАО «РЖД» за период реализации системы КПЭ (с 2014 г.) позволяет определить наиболее значимые стратегические показатели эффективности, сгруппированные в соответствии с принципом 10/80/10 (рис. 1).

Показатель EBITDA, характеризующий общую прибыль, является наиболее универсальным для оценки эффективности деятельности компании и управления ею. Так, анализ динамики EBITDA до 2022 г. (рис. 2) позволяет сделать вывод о незначительном, но стабильном росте эффективности в условиях глобальных экономических кризисов.

Показатели результативности			
EBITDA*		ROIC* по нерегулируемым видам деятельности	
Снижение операционных расходов (затрат)		Уровень безопасности	
Рентабельность по EBITDA		Проведенная работа по инфраструктуре	
Производственные (операционные) показатели			
Показатели эффективности			
Отраслевые ключевые показатели эффективности, ориентированные на достижение национальных целей		Финансово-экономические ключевые показатели эффективности	
Объем инвестиций	Количество перевезенных пассажиров	Доходы от основной деятельности	Темп роста себестоимости перевозок
		ROIC по нерегулируемым видам деятельности	$\frac{\text{Чистый долг}}{\text{EBITDA}}$
Специализированные ключевые показатели эффективности			
Выполнение расписания движения пассажирских поездов	Уровень безопасности движения	Приведенная работа по инфраструктуре	Средняя скорость доставки грузовых отправок в грузовых вагонах

Рис. 1. Структура ключевых показателей эффективности ОАО «РЖД»

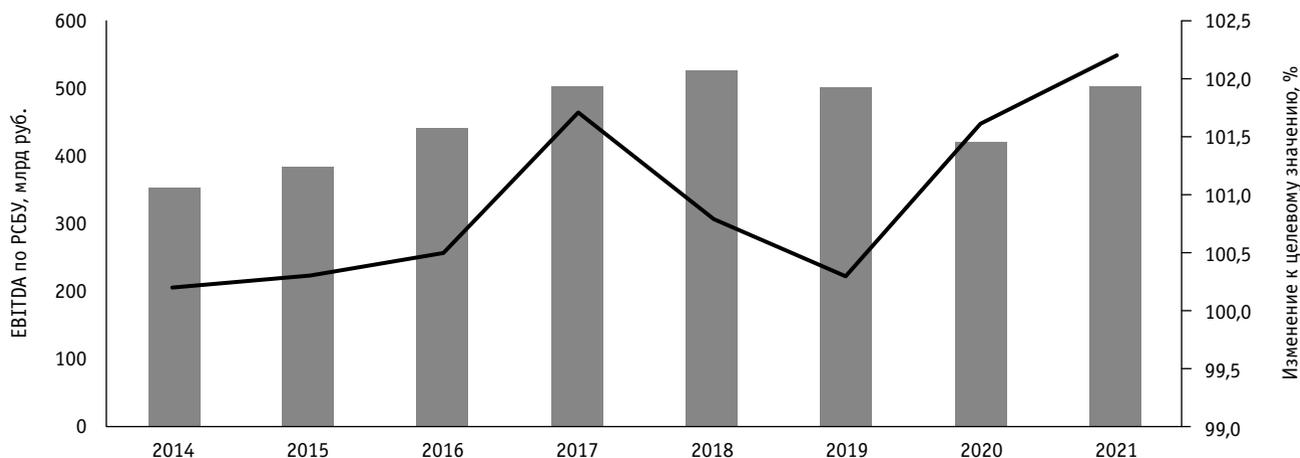


Рис. 2. Динамика EBITDA холдинга «РЖД»\*\*

\* EBITDA (Earnings Before Interest, Taxes, Depreciation and Amortization) — доход бизнеса до уплаты налога на прибыль, процентов по кредитам и амортизации; ROIC (Return On Invested Capital) — рентабельность инвестированного капитала.

\*\* Источник — годовые отчеты ОАО «РЖД».

Таблица 1

Динамика финансовых показателей деятельности холдинга «РЖД»\*

Показатель	Год				
	2017	2018	2019	2020	2021
Выручка, млрд руб.	2252,0	2413,0	1848,1	1974,5	1963,6
ЕБИТДА, млрд руб.	502,0	527,0	576,9	420,7	503,9
Рентабельность по ЕБИТДА, %	Нет данных	Нет данных	22,6	22,2	21,8

\*Источник — годовые отчеты ОАО «РЖД».

Таблица 2

Динамика ключевых показателей эффективности транспортно-логистического бизнес-блока холдинга «РЖД»

Показатель	Год				
	2017	2018	2019	2020	2021
Погрузка, млн т	1261,3	1289,6	1278,1	1243,6	1282,8
Грузооборот, млрд ткм	3176,7	3304,8	3305,0	3221,0	3320,3
Доля отправок, доставленных в нормативный срок, %	88,6	88,3	87,1	92,9	96,1

Таблица 3

Динамика ключевого показателя эффективности «пассажиροоборот» бизнес-блока «Пассажирские перевозки» холдинга «РЖД»

Показатель	Год				
	2017	2018	2019	2020	2021
Пассажиροоборот, млн пасс.-км	122,9	129,4	133,4	78,1	103,4

Кроме того, согласно данным, приведенным в табл. 1, финансовые показатели холдинга не претерпели существенных негативных изменений, их выполнение относительно целевых значений положительно, что свидетельствует об устойчивости компании и ее способности формировать точные прогнозы развития с учетом нестабильности внешней среды. По этим показателям деятельность холдинга можно охарактеризовать как эффективную, даже с учетом того что такие финансовые средства используются для возмещения операционных расходов, налогов и других затрат.

Следует отметить, что аналитический показатель ЕБИТДА в его изначальном классическом понимании характеризовал способность создавать денежный поток без учета стоимости привлекаемого капитала, существующей в стране налоговой нагрузки и правил начисления амортизации, так как все эти факторы относятся к нерегулируемым. Его основное назначение — сравнение эффективности предприятий одной отрасли, функционирующих на одном рынке. В настоящее время он получил более широкое распространение (и в России тоже), однако аналитики, в том числе в области железнодорожного транспорта и логистики, подчеркивают, что этот показатель из-за сложности и отсутствия единой методики расчета является непрозрачным и малоинформативным для определения эффективности деятельности предприятий.

Оценка основной деятельности холдинга «РЖД» предполагает также анализ динамики объемных и качественных показателей по следующим пяти бизнес-блокам: «Транспортно-логистический», «Пассажирские перевозки», «Железнодорожные перевозки и инфраструктура», «Международный инжиниринг и транспортное строительство», «Социальный блок» [4].

Рассмотрим ключевые показатели эффективности транспортно-логистического бизнес-блока, включающего услуги по обработке грузов и обслуживанию грузовладельцев (табл. 2).

Из табл. 2 видно, что динамику КПЭ деятельности ОАО «РЖД» в целом можно охарактеризовать как стабильную. В частности, увеличение объемов погрузки в 2021 г. после незначительного спада

в результате экономического кризиса, вызванного пандемией COVID-19, свидетельствует о высокой адаптивности и устойчивости холдинга в условиях неопределенной внешней среды.

Стабильное увеличение грузооборота за наблюдаемый период и темпы роста, превышающие аналогичные показатели по погрузке (см. табл. 2), объясняются, по всей видимости, увеличением средней дальности перевозок грузов.

Доля отправок, доставленных в нормативный срок, растет (см. табл. 2), что обусловлено совершенствованием логистических технологий взаимодействия с грузовладельцами, в том числе большей востребованностью услуги по перевозке грузов с согласованным временем отправления и прибытия.

Аналогичная ситуация складывается с КПЭ «пассажиροоборот» бизнес-блока «Пассажирские перевозки». Как

видно из табл. 3, до 2020 г. темпы роста пассажиροоборота были положительными и стабильными, а 2020 г. характеризовался значительным снижением мобильности населения из-за ограничений по COVID-19. В 2021 г. в связи со стабилизацией социальной активности пассажиροоборот увеличился на 32,4 %, что, конечно, ниже докризисных значений, но позволяет прогнозировать достаточно интенсивный рост этого показателя в будущем.

Отметим, что одной из актуальных задач ОАО «РЖД» остается сокращение убыточности пассажирских перевозок. Существует два варианта решения этой задачи: экстенсивный, т.е. увеличение доходов от перевозок, и интенсивный — снижение затрат на выполнение запланированного объема пассажирских перевозок.

Реализация обоих вариантов предполагает внедрение инновационных тех-

нологий и модернизацию транспортно-логистической инфраструктуры, в том числе увеличение парка комфортабельных пассажирских вагонов и создание новых высокоскоростных магистралей. С этой целью ОАО «РЖД» активно взаимодействует с предприятиями сферы транспортной промышленности, реализующими инновационные производственные программы, что отражено в Стратегии развития холдинга на период до 2025 г. с перспективой до 2035 г.

Как уже отмечалось, к основным задачам реализации системы КПЭ относятся усиление кадровых аспектов и повышение производительности труда, представляющей собой важнейший ключевой показатель социального блока. Система мероприятий по решению этих задач предполагает обновление и модернизацию производства, внедрение новых технологий, совершенствование организации труда [5].

Отметим, что за последние три года производительность труда в компании немного снизилась (рис. 3). Чтобы решить проблему, необходимо определить целевые значения показателя до 2025 г. и на перспективу до 2035 г., а также разработать программу по их достижению, учитывая при этом взаимосвязь с повышением производительности других производственных ресурсов и с общей долгосрочной программой развития холдинга [6].

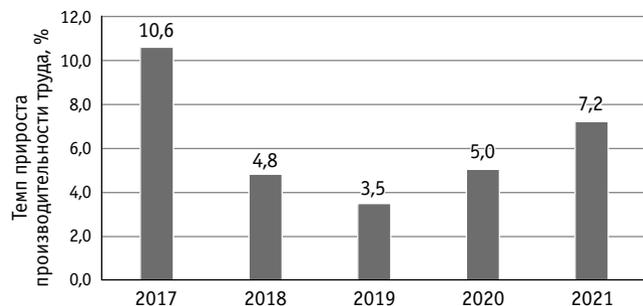


Рис. 3. Динамика производительности труда в ОАО «РЖД»

В частности, увеличение пассажиропотока и организация эффективной работы пассажирского транспорта возможны за счет такого инструмента, как прогнозирование объемов, структуры, направлений и расстояний перевозок на основе выявления среднесрочных и долгосрочных тенденций развития.

Также для стратегического управления грузовыми и пассажирскими потоками должен выполняться факторный анализ, устанавливающий степень и направление влияния на результирующие показатели таких условий, как уровень платежеспособности населения и конкурентоспособность других видов транспорта, развитие транспортной сети и т. д. Поэтому при планировании ключевых показателей эффективности на долгосрочную перспективу необходимо учитывать показатели состояния социально-экономической системы страны в целом. Актуальным также остается непрерывное совершенствование системы обслуживания пассажиров и грузовладельцев путем внедрения новых логистических технологий и услуг [7].

При использовании системы ключевых показателей в ОАО «РЖД» особо следует выделить проблему управления производительностью труда, которое одновременно выполняется по

средством конфликтующих между собой систем КПЭ и управления человеческими ресурсами (УЧР). К особенностям последней системы можно отнести так называемое ручное управление, которое является традиционным для госкорпораций, но может приводить к ряду негативных последствий, таких как организационная фрагментация, низкая мотивация и эмоциональное выгорание сотрудников. В то время как система КПЭ позволяет ориентировать руководителей и сотрудников на достижение измеримых и прозрачных целевых показателей, оценка которых напрямую зависит от результатов работы.

Система ключевых показателей эффективности, используемая для оценки и управления деятельностью ОАО «РЖД», не статична, и ее изменение зависит не только от внутренних установок, но и от внешних факторов, что играет особую роль в мониторинге устойчивого развития компании. Постоянное совершенствование, адаптация к изменяющимся рыночным и технологическим условиям ставят задачу объединения системы КПЭ с концепцией процессного подхода и более гармоничного внедрения такой системы в производственные и бизнес-процессы компании. Решение этой задачи — одно из условий реализации Единого сетевого технологического процесса ОАО «РЖД» (ЕСТП) в практике взаимодействия участников перевозочного процесса.

Назначение ЕСТП — организация системного взаимодействия различных дирекций холдинга и грузовладельцев, операторов, владельцев путей необщего пользования [8]. Очевидно, что такой масштаб процесса, вовлеченность в него различных участников, интересы которых зачастую разнонаправлены, требуют создания большой и сложной системы оценки его эффективности.

Для концепции процессного подхода, в рамках которой реализуется ЕСТП, и системы ключевых показателей эффективности характерны следующие общие задачи [9]:

- ориентация на результат;
- повышение результативности и эффективности работы предприятия;
- прозрачность действий по достижению результата;
- повышение предсказуемости результатов;
- сокращение временных и материальных затрат.

В силу того что Единый сетевой технологический процесс — это объективное условие повышения качества транспортно-логистического обслуживания и эффективности деятельности ОАО «РЖД» [10], возрастает значимость систем частных и интегральных показателей и для самого холдинга, и для остальных участников ЕСТП. Детализированная адаптация системы КПЭ для целей Единого сетевого технологического процесса позволит системно оценить его выполнение, выявить и устранить узкие места и тем самым повысить качество взаимодействия с грузовладельцами и другими участниками ЕСТП [11].

Единый сетевой технологический процесс относится к технико-технологическим моделям управления перевозочным процессом и предназначен для синхронизации деятельности работников Центральной дирекции управления движением, Центра фирменного транспортного обслуживания, железных дорог, предприятий, станций и подразделений, расположенных

в границах определенного технологического полигона [2]. Основная особенность реализации ЕСТП по сравнению с традиционными подходами заключается в координации и оперативном согласовании деятельности посредством взаимодействующих автоматизированных систем и баз данных. В результате достигаются оптимальная организация перевозочного процесса и его взаимодействия с внешними участниками: грузоотправителями, грузополучателями, логистическими провайдерами, транспортными операторами, владельцами железнодорожного подвижного состава и пр. [12].

Управление большими сложными системами, к которым относятся транспортный комплекс и железнодорожный транспорт, требует интеграции подсистем и элементов, чьи интересы зачастую бывают разнонаправленными и противоречащими друг другу. Главное условие такой интеграции — обоснование целевых результатов системы в целом и ее

составляющих на различных уровнях иерархии [13].

Система сбалансированных показателей и ключевые показатели эффективности позволяют сформулировать такие целевые результаты, раскрыть их содержание и влияние на работу подразделений ОАО «РЖД» в рамках организации Единого сетевого технологического процесса. Методологической основой этого выступают: технологические регламентации; оперативное управление и мониторинг перевозочного процесса и результатов статистической и оперативной отчетности по установленным показателям; анализ качества эксплуатационной работы [3].

Используемая в настоящее время система ключевых показателей ОАО «РЖД» полностью раскрывает стратегические цели, представленные в основном в форме наиболее распространенных финансовых показателей, что показано на рис. 1. Для повышения эффективности исполь-

зования этой системы необходимо совершенствовать те показатели, которые формируются при взаимодействии филиалов и подразделений и характеризуют степень общей вовлеченности в достижение целей высшего уровня иерархии [14].

Система ключевых показателей в полной мере обеспечивает выполнение сквозных принципов планирования, нормирования, управления и мониторинга, предусмотренных Единым сетевым технологическим процессом. Обоснованные в рамках такого подхода целевые результаты деятельности филиалов и подразделений железных дорог позволят эффективнее управлять потоками, в том числе порожних грузовых вагонов, рационально использовать транспортную инфраструктуру, четко выполнять обязательства по комплексному транспортно-логистическому обслуживанию, что, в свою очередь, создаст возможности для дальнейшего развития железнодорожного транспорта.

## Литература

1. Шишова Л. С., Пророков А. Н. Ключевые показатели эффективности как важнейший инструмент целевой системы управления холдингом РЖД // Транспортное дело России. 2022. № 2. С. 96–98. DOI: 10.52375/20728689\_2022\_2\_96. ISSN 2072-8689.
2. Об утверждении Порядка мониторинга ключевых показателей деятельности холдинга «РЖД»: распоряжение ОАО «РЖД» от 27.07.2017 г. № 1500р.
3. Об утверждении методологии мониторинга ключевых показателей эффективности инвестиционных вложений ОАО «РЖД»: распоряжение ОАО «РЖД» от 25.11.2014 г. № 2748р. URL: <https://jd-doc.ru/2014/noyabr-2014/14073-rasporyazhenie-oao-rzhd-ot-25-11-2014-n-2748r> (дата обращения: 23.03.2023).
4. О системе декомпозированных контрольных параметров целевого состояния холдинга «РЖД»: распоряжение ОАО «РЖД» от 22.06.2015 г. № 1545р. URL: <https://gkrfkod.ru/zakonodatelstvo/rasporjazhenie-oao-rzhd-ot-22062015-n-1545r/?ysclid=llui8prhz25255132> (дата обращения: 23.03.2023).
5. Сорокина А. В., Трофимова О. Ю. Как повысить результативность оценки деятельности железных дорог ОАО «РЖД» // Транспортное дело России. 2017. № 4. С. 68–71. ISSN 2072-8689.
6. Трофимова О. Ю. Оценка реализации стратегии транспортной компании на основе ключевых показателей эффективности (КПЭ) // Транспортное дело России. 2017. № 5. С. 174–175. ISSN 2072-8689.
7. Сацук Т. П. Система ключевых показателей результативности в экономике организаций железнодорожного транспорта // Известия ПГУПС. 2015. № 1 (42). С. 144–148. ISSN 1815-588X.

## References

1. Shishova L. S., Prorokov A. N. Key performance indicators as the most important tool for the target management system of the Russian Railways holding [Klyucheveye pokazateli effektivnosti kak vazhneyshiy instrument tselevoiy sistemy upravleniya kholdingom RZhD]. Transport business in Russia. 2022. No. 2. Pp. 96–98. DOI: 10.52375/20728689\_2022\_2\_96. ISSN 2072-8689.
2. On approval of the procedure for monitoring the key performance indicators of the Russian Railways Holding [Ob utverzhenii Poryadka monitoringa klyuchevykh pokazateley deyatelnosti kholdinga «RZhD»]. The Order of JSC «RZD» dated 27.07.2017 No. 1500r.
3. On approval of the methodology for monitoring key performance indicators of JSC «Russian Railways» investments [Ob utverzhenii metodologii monitoringa klyuchevykh pokazateley effektivnosti investitsionnykh vlozheniy OAO «RZhD»]. The Order of JSC «RZD» dated 25.11.2014 No. 2748r. URL: <https://jd-doc.ru/2014/noyabr-2014/14073-rasporyazhenie-oao-rzhd-ot-25-11-2014-n-2748r> (access date: 23.03.2023).
4. About the system of decomposed control parameters of the target state of the Russian Railways Holding [O sisteme dekompozirovannykh kontrol'nykh parametrov tselevogo sostoyaniya kholdinga «RZhD»]. The Order of JSC «RZD» dated 22.06.2015 No. 1545r. URL: <https://gkrfkod.ru/zakonodatelstvo/rasporjazhenie-oao-rzhd-ot-22062015-n-1545r/?ysclid=llui8prhz25255132> (access date: 23.03.2023).
5. Sorokina A. V., Trofimova O. Yu. How to increase the effectiveness of assessment of activity of the railroads of JSC «Russian Railways» [Kak povysit' rezul'tativnost' otsenki deyatelnosti zheleznykh dorog OAO «RZhD»]. Transport business in Russia. 2017. No. 4. Pp. 68–71. ISSN 2072-8689.
6. Trofimova O. Yu. Assessment of strategy implementation of transportation company on a basis key performance indicators (KPI) [Otsenka realizatsii strategii transportnoy kompanii na osnove klyuchevykh pokazateley effektivnosti (KPE)]. Transport business in Russia. 2017. No. 5. Pp. 174–175. ISSN 2072-8689.
7. Satsuk T. P. System of key performance indicators in the economics of railway transport organizations [Sistema klyuchevykh pokazateley rezul'tativnosti v ekonomike organizatsiy zheleznodorozhnogo transpor-

8. О Едином сетевом технологическом процессе железнодорожных грузовых перевозок : распоряжение ОАО «РЖД» от 28.12.2012 г. № 2786р. (с изм. от 09.01.2020 г.). URL: [https://e-ecolog.ru/docs/t2145auYPsYyPoAB\\_b9Qf?ysclid=llullq4bu855054664](https://e-ecolog.ru/docs/t2145auYPsYyPoAB_b9Qf?ysclid=llullq4bu855054664) (дата обращения: 23.03.2023).
9. Елисеев С. Ю., Кулиева Е. С. Процессный подход как основа повышения эффективности обслуживания грузовладельцев // Мир транспорта. 2017. Т. 15. № 2. С. 150–157. ISSN 1992-3252.
10. Сирина Н. Ф., Герус В. Л. Единый сетевой технологический процесс как фактор повышения качества транспортного обслуживания // Транспорт и логистика: актуальные проблемы стратегического развития и оперативного управления : сборник трудов конференции. Ростов-на-Дону : Изд-во РГУПС, 2019. С. 219–222.
11. Подсорин В. А., Яшина А. С. Ключевые показатели деятельности транспортной компании. Москва : Изд-во РУТ (МИИТ), 2019. 60 с.
12. Полякова Т. В. Система ключевых показателей эффективности как инструмент управления // Карельский научный журнал. 2018. Т. 7. № 1 (22). С. 158–161. ISSN 2311-0104.
13. Зубков В. В., Сирина Н. Ф. Формирование модели управления перевозочной деятельностью // Транспорт Урала. 2014. № 1 (40). С. 13–17. ISSN 1815-9400.
14. Бородин А. Ф., Прокофьева Е. С., Панин В. В. Единый сетевой технологический процесс грузовых железнодорожных перевозок. Москва : Изд-во РУТ (МИИТ), 2017. 118 с.
- ta]. Proceedings of Petersburg Transport University. 2015. No. 1 (42). Pp. 144–148. ISSN 1815-588X.
8. About the Unified network technological process of railway freight transportation [O Edinom setevom tekhnologicheskom protsesse zheleznodorozhnykh gruzovykh perevozok]. The Order of JSC «RZD» dated 28.12.2012 No. 2786r (with a change from 09.01.2020 r.). URL: [https://e-ecolog.ru/docs/t2145auYPsYyPoAB\\_b9Qf?ysclid=llullq4bu855054664](https://e-ecolog.ru/docs/t2145auYPsYyPoAB_b9Qf?ysclid=llullq4bu855054664) (access date: 23.03.2023).
9. Eliseev S. Yu., Kulieva E. S. Process approach as a basis for increasing the efficiency of freight owners' servicing [Protsessnyy podkhod kak osnova povysheniya effektivnosti obsluzhivaniya gruzovladel'tsev]. World of Transport and Transportation. 2017. Vol. 15. No. 2. Pp. 150–157. ISSN 1992-3252.
10. Sirina N. F., Gerus V. L. Unified network technological process as a factor in improving the quality of transport services [Edinyy setevoy tekhnologicheskiy protsess kak faktor povysheniya kachestva transportnogo obsluzhivaniya]. Transport and logistics: actual problems of strategic development and operational management. Proceedings of the conference. Rostov-on-Don, Publishing House of RSTU, 2019. Pp. 219–222.
11. Podsorin V. A., Yashina A. S. Key performance indicators of the transport company [Klyucheveye pokazateli deyatel'nosti transportnoy kompanii]. Moscow, Publishing House of MIIT, 2019. 60 p.
12. Polyakova T. V. System of key efficiency indicators as a tool of management [Sistema klyuchevykh pokazateley effektivnosti kak instrument upravleniya]. Karelian Scientific Journal. 2018. Vol. 7. No. 1 (22). Pp. 158–161. ISSN 2311-0104.
13. Zubkov V. V., Sirina N. F. Developing a transportation management model [Formirovaniye modeli upravleniya perevozochnoy deyatel'nost'yu]. Transport of the Urals. 2014. No. 1 (40). Pp. 13–17. ISSN 1815-9400.
14. Borodin A. F., Prokofeva E. S., Panin V. V. Unified network technological process of freight rail transportation [Edinyy setevoy tekhnologicheskiy protsess gruzovykh zheleznodorozhnykh perevozok]. Moscow, Publishing House of MIIT, 2017. 118 p.

Объем статьи 0,73 авторских листа

УДК 665.664

**Владимир Иванович Моисеев, доктор технических наук, профессор кафедры «Математика и моделирование» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС), Санкт-Петербург, Россия,**

**Александр Владимирович Жебанов, кандидат технических наук, доцент кафедры «Вагоны» Самарского государственного университета путей сообщения (СамГУПС), Самара, Россия**

## ПЕРЕВОЗКА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫМ ТРАНСПОРТОМ ВЯЗКИХ НЕФТЕПРОДУКТОВ В ЗИМНИХ УСЛОВИЯХ ПРИ ПРИМЕНЕНИИ ПРИНЦИПОВ КАТАЛИТИЧЕСКОГО РАЗОГРЕВА

**Vladimir Ivanovich Moiseev, DSc in Engineering, Professor, Mathematics and Modeling Department, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (PSTU), St. Petersburg, Russia,**  
**Alexander Vladimirovich Zhebanov, PhD in Engineering, Associate Professor, Cars Department, Samara State Transport University (SSTU), Samara, Russia**

### Transportation of viscous petroleum products by rail in winter conditions using the principles of catalytic heating

#### Аннотация

В статье исследуется выгрузка застывающих нефтепродуктов (типа котельного мазута) на сливной площадке средней мощности. Принято, что под слив ставится наливной поезд из 45 специализированных 67-тонных вагонов-цистерн, состав находится в пути следования 7–8 сут при отрицательных температурах воздуха (до  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Обычно на сливной площадке средней мощности одновременно ставят под выгрузку от 3 до 5 вагонов-цистерн, на их разогрев тратят до 10–12 ч, на саму выгрузку, освобождение сливной площадки и установку следующих 5 вагонов-цистерн — еще 2–2,5 ч. Остальные вагоны-цистерны стоят на подъездных путях, ожидая очереди. Нефтепродукт в них, изначально имевший низкую температуру, продолжает охлаждаться, переходя в высоковязкое состояние. Помимо времени доставки (7–8 сут), состав, как правило, находится под операцией выгрузки еще 8–10 сут. В предлагаемом авторами способе обработки вагоны-цистерны могут обогреться уже на стадии простоя на подъездных путях, а сам слив осуществляется на сливной площадке. При этом время выгрузки наливного поезда сокращается до 15–20 ч.

**Ключевые слова:** перевозка застывающих нефтепродуктов, вагон-цистерна, выгрузка при отрицательных температурах, каталитический разогрев

#### Abstract

The article investigates the problem of unloading solidifying petroleum products (such as boiler fuel oil) at a medium-capacity drain site. It is accepted that a filling train of 45 specialized 67-ton tank cars is placed under the drain, the train is en route for 7–8 days at negative air temperatures (up to  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Usually, from 3 to 5 tank cars are simultaneously put under unloading at a medium-capacity drain site, up to 10–12 hours are spent on heating them; for unloading, emptying the drain site and installing the next 5 tank cars — 2–2.5 hours more. The rest of the tank cars are put on the access roads, waiting in line. The oil product in them, initially having a low temperature, keeps cooling and passes into a highly viscous state. In addition to the delivery time (7–8 days), the train, as a rule, is under the unloading operation for 8–10 more days. In the method of processing proposed by the authors, tank cars can be heated already at the idle stage on the access roads, and the discharge is carried out at the drain site. In this case, the unloading time of the filling train is reduced to 15–20 hours.

**Keywords:** transportation of solidifying petroleum products, tank car, unloading at negative temperatures, catalytic heating

DOI: 10.20291/1815-9400-2023-3-24-29

#### ВВЕДЕНИЕ

**Р**ассматривается задача выгрузки застывающих нефтепродуктов (ЗНП) типа котельного мазута на сливной площадке средней мощности. Определены следующие условия исследования: под слив ставят наливной поезд из 45 специализированных 67-тонных вагонов-цистерн; транспортировка осуществляется 7–8 сут под воздействием низких температур воздуха (до  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ); мощность пункта выгрузки от 3 до 5 вагонов-цистерн одновременно; время подогрева нефтепродукта для слива 10–12 ч; время на слив и подачу-уборку следующих 5 вагонов-цистерн 2–2,5 ч.

#### ПРИНЦИП КАТАЛИТИЧЕСКОГО РАЗОГРЕВА ЗАСТЫВАЮЩИХ НЕФТЕПРОДУКТОВ

Известно, что наибольшие проблемы при доставке потребителям ЗНП (мазатов, технических масел, смазочно-охлаждающих жидкостей) в зимних условиях связаны с выгрузкой и передачей по трубопроводам, так как требуют высокой текучести жидкостей, достигаемой только при довольно высоких температурах. Основные средства, применяемые для разогрева ЗНП, — это паровые установки в различных вариантах исполнения. Вместе с тем разогрев ЗНП паром не является пожаробезопасным, требует значительного времени, производственных площадей, огромных затрат тепловой энергии и специального дорогостоящего оборудования, которое к тому же имеет низкий среднегодовой коэффициент использования — от 10 до 15 % [1–5].

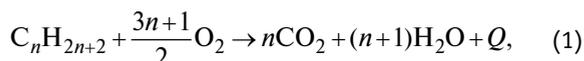
Таблица 1

Низкотемпературное окисление углеводородов на катализаторах [7]

Катализатор	Носитель	Температура реакции, °С	Горючее	Продукты реакции
Никель	Асбест	150–350	Метан	CO <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> O и следы формальдегида
Окись меди	Пемза	150–200	Ацетилен	CO <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> O
Окись меди	Асбест	100	Метан	CO <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> O
Двуокись марганца	Пемза	150–200	Ацетилен	CO <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> O
Закись никеля	Пемза	150–200	Ацетилен	CO <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> O
Хромиты никеля, меди, магния	Асбест, стекловолокно	200–300	Алканы (бензин, керосин, дизтопливо)	CO <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> O

В качестве альтернативы паровым способам разогрева и разжигания ЗНП предлагаются средства, основанные на низкотемпературном (от 150 до 300 °С) горении газообразных углеводородов (метана, пропан-бутановой смеси, ацетилена и др.) на поверхности катализатора глубокого окисления (КГО), такое горение называют каталитическим. Операция горения — это процедура окисления топлива, которое сопровождается ярко проявляющимся тепловыделяющим явлением при интервале температур от 2000 до 2500 °С. Окисление углеводородов, сопровождающееся колоссальным выделением тепла, но происходящее при температурах от +150 °С до +300 °С (табл. 1) и определяется как каталитическое горение [6]. При этом процессе катализатор практически не теряет массу, но утрачивает свою действенность, что приводит к необходимости использовать методы восстановления каталитической активности.

Общая формула окисления углеводородов C<sub>n</sub>H<sub>2n+2</sub> (n — число атомов в молекуле) имеет вид



где Q — количество выделяющейся при горении теплоты, Дж/кг (например, при горении метана, ацетилена, смеси пропан-бутана значение Q составляет 50·10<sup>6</sup>, 48·10<sup>6</sup> и 41–49·10<sup>6</sup> Дж/кг соответственно).

Из уравнения (1) следует, что горячий газ, которым обеспечивается разогрев ЗНП в котле вагона-цистерны, содержит большое количество водяных паров и углекислого газа, но, так как в нем нет кислорода, это может резко повысить взрыво- и пожаробезопасность процесса выгрузки.

Все ЗНП имеют низкую температуру вспышки: от +80 °С у флотских мазутов Ф-12 до +125 °С у котельных мазутов М100 и крекинг-остатков М200. У гудронов и нефтебитумов она близка к +150 °С. При температуре вспышки пары над поверхностью жидкости образуют смесь с воздухом, вспыхивающую при приближении пламени [7]. Низкая температура вспышки резко снижает перспективы электроразогрева ЗНП, при котором возможно образование электрической искры.

Отметим, что воспламенение паров ЗНП происходит лишь при одновременном присутствии кислорода в воздухе и пламени над жидким нефтегрузом в объеме, примерно равном объему котла вагона-цистерны. Но вспышки не будет, если в воз-

духе внутри котла отсутствует кислород. Оправданность применения каталитического разогрева заключается в том, что во время сжигания, например, пропан-бутановой смеси кислород в воздухе, участвуя в химической реакции (1), в итоге создает двуокись углерода CO<sub>2</sub>, которая не поддерживает горения. Эту «обескислороженную» атмосферу даже при некотором избыточном давлении легко создать в котле вагона-цистерны. Такой газ, называемый газом наддува, применяется при выгрузке легко воспламеняющихся жидких компонентов ракетных топлив. Обычно в качестве газа наддува используют азот, но можно применять и CO<sub>2</sub>.

В целом каталитическое горение не только дает тепловой эффект, высокий коэффициент теплоиспользования топлива, низкую материалоемкость, пожарную безопасность, но и обеспечивает ускорение слива самотеком за счет избыточного давления атмосферы углекислого газа.

Само каталитическое горение тоже пожаробезопасно. Если рассмотреть вариант горения состава из кислорода с водородом при пиковой температуре, равной порядка +400 °С, то при подаче на пористую поверхность с нанесенным катализатором глубокого окисления (КГО) этот состав не взорвется, продолжая «безопасно» гореть. При взаимодействии с воздухом таких веществ, как метан, этан, пропан и бутан, образуются взрывоопасные смеси. Но с применением катализаторов эти вещества вполне неопасно окисляются под воздействием низких температур и становятся пригодными даже для подогрева баллонов, содержащих природный газ.

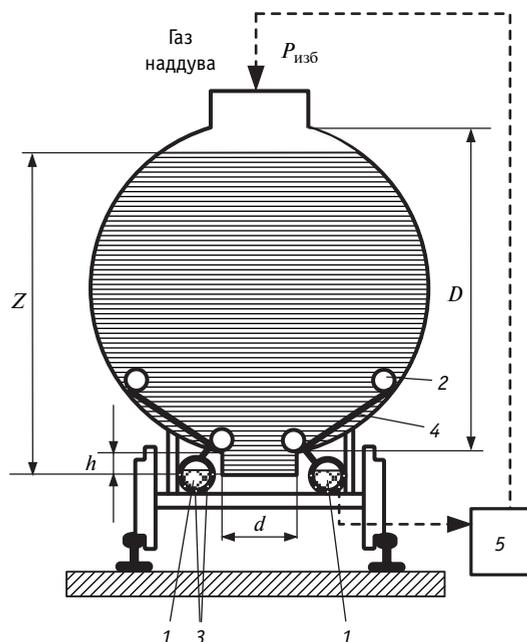
### ВАРИАНТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НАГРЕВАТЕЛЕЙ С КАТАЛИТИЧЕСКИМИ ГОРЕЛКАМИ

Для разогрева сливаемых застывающих нефтепродуктов перспективны шпинельные КГО. Они образуются при использовании хромитов никеля, марганца, меди и магния (NiCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, MnCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, CuCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, MgCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub> + MgO).

Высокие эксплуатационные характеристики имеют и комплексные соединения, выпускаемые отечественной промышленностью, например: MgFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> + Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Pt (0,015 %), CuAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> + CuO, FeAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> + Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и ряд других [6].

По своему целевому назначению катализаторы глубокого окисления должны иметь низкую себестоимость, обеспечивать полное окисление углеводородов до конечных CO<sub>2</sub> и H<sub>2</sub>O, обладать низкой чувствительностью к водяным парам.

Перечисленные КГО удовлетворяют всем этим требованиям. При эксплуатации КГО изготавливаются в виде тонкого порошка, наносимого на негорючие теплоизоляционные материалы с высокой пористостью (волокнистый асбест, кремнеземное или каолиновое волокно, пемзу и др.). Получаемые таким образом «тепловые маты» жестко крепятся на наружной поверхности котла вагона-цистерны. На вагонах-цистернах с паробогревательным кожухом (модели 15-1566) маты можно закладывать под него без кардинального изменения конструкции котла. Котлы вагонов-цистерн, не имеющие паробогревательного кожуха, могут быть дооборудованы каталитическими нагревателями, выполненными по схеме, показанной на рис. 1.



**Рис. 1. Исполнение котла вагона-цистерны с трубами обогрева и нагревательными элементами по технологии каталитического горения углеводородов:**

1 — испаритель трубы обогрева; 2 — конденсаторы трубы обогрева; 3 — емкости с КГО; 4 — трубы с фитилем; 5 — компрессор

Часть элементов паровых систем разогрева вагонов-цистерн с ЗНП относится к наземному оборудованию сливной площадки (парогенератор, магистраль для подачи пара и др.), а часть входит в конструкцию вагона-цистерны (паробогревательный кожух, обогреватели сливного прибора и др.).

Аналогично выполнена и система каталитического разогрева ЗНП. Ее наземными элементами являются резервуар для горючего (пропан-бутановой смеси), магистраль для его подачи на поверхность КГО, компрессор и магистраль для подачи сжатого воздуха к вагону-цистерне. Все оборудование малогабаритно и может быть установлено на сливной площадке и на подъездных путях к ней.

Устройства, предназначенные для отвода образующегося горячего газа и его распределения по объему разогреваемого ЗНП внутри котла вагона-цистерны, устанавливаются на самом котле.

Рассмотрим подробнее показанную на рис. 1 конструкцию котла вагона-цистерны с каталитическим нагревателем и трубой обогрева, выполняющей функцию передачи тепла [8, 9]. Теплопередающая труба состоит из испарителя, который взаимодействует с конденсатором, образуя сплошной трубопровод 4, внутри которого находится фитиль, обеспечивающий проход жидкости из конденсатора в испаритель непосредственно в тепловой трубе для нагрева.

Испаритель трубы обогрева 1 размещается на раме вагона-цистерны, а конденсатор трубы обогрева 2 — внутри котла. Чтобы система функционировала, испаритель должен быть не полностью заправлен рабочей жидкостью. По периметру испарителя устанавливаются трубки с каталитическими элементами — гранулами, состоящими из волокнистого антофилитового асбеста с напыленными частицами хромита меди  $\text{CuCr}_2\text{O}_4$ . Эти компоненты создают температурные условия для протекания реакции в интервалах от +200 до +250 °С, что видно из данных, приведенных в табл. 1.

При нагреве в теле испарителя рабочей жидкости происходит парообразование, в процессе которого в ненагретые трубки подается пар. Так как у стенок трубки и поступающего пара большая разница температур, то образуется конденсат, а тепло передается для подогрева нефтегруза, находящегося в котле вагона-цистерны.

В качестве рабочей жидкости перспективными по термодинамическим показателям представляются специально разработанные жидкости флуток РР2 и флуток РР9 с удобным диапазоном рабочих температур от -30 до +160 °С и высокой удельной способностью передачи теплоты порядка 8 кВт/см<sup>2</sup> с теплоотдающей поверхности трубы. Характеристики рабочих жидкостей приведены в табл. 2.

Из резервуара 5 горючее (например, пропан-бутановая смесь) подается в трубки 3 и пропитывает таблетки из волокнистого антофилитового асбеста с нанесенными частицами шпинельного КГО ( $\text{NiCr}_2\text{O}_4$ ). Каталитический обогреватель «разжигается» дистанционно электрической искрой, создаваемой дизель-генератором. Искра воспламеняет газообразную пропан-бутановую смесь в трубках 3, которая проникает через среду КГО и переходит в химическую реакцию с кислородом воздуха на поверхности катализатора. Реакция, происходящая при температуре от +200 до +250 °С, вызывает кипение рабочей жидкости в испарителе 1. Ее пары заполняют трубки 2 конденсатора, конденсируются в нем, что и вызывает разогрев нефтегруза в котле вагона-цистерны. Конденсат от рабочей жидкости, скопившийся в испарителе, доводится до температуры испарения заново. С учетом того что теплота, при которой жидкость преобразуется в пар, достигает порядка 70 кДж/кг (по данным табл. 2), при минимальном различии температур между стенками труб испарителя и конденсатора тепловая труба может передать удельные тепловые потоки ( $q$ ) от 5 до 7 кВт/см<sup>2</sup>.

Чтобы обеспечить непрерывное каталитическое горение, в трубки 3 подается поток воздуха, нагнетаемого компрессором 5. В соответствии с химической реакцией (1) кислород воздуха при каталитическом горении «пережигается», образуя углекислый газ. Когда разогрев ЗНП осуществляется на подъ-

Таблица 2

Характеристики рабочих жидкостей  
для тепловой трубы системы разогрева ЗНП каталитическими нагревателями [6]

Температура, °С	Теплота парообразования, кДж/кг	Плотность жидкости, кг/м <sup>3</sup>	Плотность пара, кг/м <sup>3</sup>	Вязкость жидкости, Па·с·10 <sup>3</sup>	Вязкость пара, Па·с·10 <sup>3</sup>	Давление пара, кПа	Поверхностное натяжение, Н/м·10 <sup>2</sup>
Флутек РР2							
-30	106,2	1942	0,13	5,20	0,098	1	1,90
+10	99,8	1829	1,39	2,14	0,107	9	1,52
+70	87,0	1660	11,79	0,720	0,122	62	0,93
+160	59,1	1440	103,63	0,167	0,143	876	0,01
Флутек РР9							
-30	103	2098	0,01	5,77	0,082	0	2,36
+30	94,5	1960	0,12	1,48	0,106	1	1,80
+90	86,1	1822	1,93	0,65	0,121	12	1,24
+150	77,4	1685	11,81	0,38	0,126	61	0,67
+180	70,8	1604	25,13	0,30	0,133	158	0,40

ездных путях, до установки вагона-цистерны на сливную площадку, углекислый газ сбрасывается в атмосферу, а на самой сливной площадке он подается внутрь котла вагона-цистерны, создавая над поверхностью жидкости избыточное давление  $P_{изб}$  газа наддува с малым содержанием кислорода воздуха.

Таким образом, содержимое котла вагона-цистерны разогревается еще на подъездных путях, что экономит время обработки, и ставится на сливную площадку с нефтегрузом, уже имеющим высокую температуру и текучесть.

Таким образом, рассмотренный процесс каталитического горения пропан-бутановой смеси происходит при безопасном температурном режиме и к тому же вне зоны котла вагона-цистерны.

К преимуществам этого варианта можно отнести невысокую цену, несложную установку и минимальное сокращение полезного объема котла вагона-цистерны. При изготовлении труб обогрева 2 можно использовать трубы на фланцевых соединениях, применяемые для подачи воды в бытовых условиях, с диаметром от 38 до 51 мм. Диаметр труб 4, которые содержат фитиль, от 20 до 30 мм, т.е. общая потеря полезного объема котла вагона-цистерны от установки таких трубопроводов не будет превышать 0,1 м<sup>3</sup>.

Представленная схема исполнения позволяет без затруднений демонтировать каталитические элементы, шпинели NiCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub> из трубки 3 для их контроля, удаления остатков, восстановления или замены катализатора. Демонтаж в зависимости от частоты использования необходимо выполнять 2–3 раза в год.

**ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ**

Выполним количественные оценки избыточного давления газа наддува, обеспечивающего ускорение слива. Предохранительный-впускной клапан, применяемый в конструкции котла вагона-цистерны, рассчитан на избыточное давление  $P_{max} = 150$  кПа, а при вакуумировании его показатели должны находиться в ин-

тервале  $P_{min} = 0,1–0,3$  кПа. В рамках рассматриваемых параметров примем количественный уровень избыточного давления, полученный при химической реакции «обескислороженной» атмосферы,  $P_{изб} = 12–20$  кПа.

Оценим фактор избыточного давления на продолжительность операции выгрузки ЗНП, принимая, что котел вагона-цистерны представляет собой горизонтальный цилиндр длиной  $L$  и диаметром  $D$ .

Практика показывает, что при сливе ЗНП самотеком самопроизвольно и быстро освобождается половина котла вагона-цистерны. На слив ЗНП из второй (нижней) половины котла тратится существенно большее время, что обусловлено снижением гидростатического давления.

Опишем ситуацию разгрузки нефтепродукта самотеком за время  $dt$  через сливной прибор с площадью поперечного сечения  $f$  (м<sup>2</sup>), принимая, что скорость течения  $w$  (м/с):

$$dV = f w dt. \tag{2}$$

При этом

$$dV = -\Omega(z) dz, \tag{3}$$

где  $\Omega(z)$  — площадь свободной поверхности нефтепродукта в котле вагона-цистерны ( $R = D/2$ ), находящаяся в зависимости с  $z$  — высотой гидравлического столба нефтепродукта (м),

$$\Omega(z) = 2L\sqrt{R^2 - (z - R)^2} = 2L\sqrt{z(D - z)}. \tag{4}$$

Во время разгрузки нефтепродукта напор столба жидкости уравнивает гидравлическое сопротивление сливного прибора и создает скоростной напор

$$z + h = \frac{w^2}{2g} + \frac{l_{np} w^2}{2dg}, \tag{5}$$

где  $\iota$  — коэффициент гидравлического сопротивления;  $h$  и  $d$  — соответственно высота и диаметр сливного прибора, м;  $l_{\text{пр}}$  — приведенная длина сливного прибора, включающая его длину  $h$  и эквивалентную длину  $z$ , обусловленную гидравлическим сопротивлением, м.

Из формулы (5) можно оценить скорость выгрузки нефтепродукта:

$$w = \bar{\mu} \sqrt{2g(z+h)}, \quad (6)$$

где  $\bar{\mu}$  — эмпирический средний коэффициент расхода сливного прибора, зависящий от кинематической вязкости сливаемой жидкости  $\nu$ ,

$$\bar{\mu} = \frac{1}{0,0238\nu + 1,29}. \quad (7)$$

Скорость движения уровня сливаемой жидкости определяется производной  $w = \frac{dz}{d\tau}$ , и ее можно записать в виде дифференциального уравнения с раздельными переменными

$$d\tau = \frac{-2L}{f\bar{\mu}\sqrt{2g}} \sqrt{\frac{z(D-z)}{z+h}} dz. \quad (8)$$

Интегрирование (8) в пределах от  $D$  до 0 позволяет оценить продолжительность слива ЗНП самотеком:

$$\tau_{\text{слив}} = \frac{-2L}{f\bar{\mu}\sqrt{2g}} \int_D^0 \sqrt{\frac{z(D-z)}{z+h}} dz. \quad (9)$$

Когда  $h$  можно принять пренебрежимо малой величиной, то выражение (9) упрощается:

$$\tau_{\text{слив}} = \frac{-2L}{f\bar{\mu}\sqrt{2g}} \int_D^0 \sqrt{D-z} dz = \frac{2\sqrt{2}LD^{3/2}}{f\bar{\mu}\sqrt{g}}. \quad (10)$$

Строгое выполнение гидравлических расчетов требует сложных промежуточных вычислений, дающих в итоге следующую формулу:

$$\tau_{\text{слив}} = \frac{4LDb\nu}{\pi g d^3} \Phi(m, z), \quad (11)$$

где  $\Phi(m, z)$  — функция, зависящая от геометрических параметров;  $b$  — постоянная, определяемая моделью сливного прибора;  $d$  — диаметр сливного патрубка, м;  $m = h/D$  — безразмерная высота сливного патрубка, имеющего высоту  $h$ .

Конструктивные особенности 60-тонного вагона-цистерны характеризуются следующими размерами сливных приборов:  $D = 2,8$  м,  $L = 10,3$  м,  $d = 0,2$  м,  $h = 0,6$  м,  $m = 0,2143$  и  $b = 1602$ .

Слив первой половины котла выполняется самотеком, и время выгрузки этой части ЗНП может быть определено по формуле

$$\begin{aligned} \tau_{\text{слив.1}} &= \frac{-2L}{f\bar{\mu}\sqrt{2g}} \int_D^{D/2} \sqrt{\frac{z(D-z)}{z+h}} dz \approx \\ &\approx \frac{-\sqrt{2}L}{f\bar{\mu}\sqrt{g}} \int_D^{D/2} \sqrt{D-z} dz = \frac{\sqrt{2}LD^{3/2}}{3f\bar{\mu}\sqrt{g}}. \end{aligned} \quad (12)$$

Вторую половину котла сливают уже с использованием углекислого газа, образовавшегося от каталитического нагрева, создающего избыточное давление газа наддува. Формула (12) преобразуется к виду

$$\tau_{\text{слив.2}} = \frac{-\sqrt{2}L}{f\bar{\mu}} \int_{D/2}^0 \sqrt{\frac{z(D-z)}{\frac{P_{\text{изб}}}{\rho_{\text{ж}}} + g(z+h)}} dz. \quad (13)$$

Если  $P_{\text{изб}} \approx 20$  кПа, а плотность мазута  $\rho_{\text{ж}} \approx 970$  кг/м<sup>3</sup>, то  $P_{\text{изб}}/\rho_{\text{ж}} \approx 21,5$  м/с<sup>2</sup>. Второе слагаемое имеет наибольшее значение при  $z = D/2$ , а затем убывает по линейному закону до нуля при  $z = -h$ , его среднее значение будет много меньше первого. При этом можно пренебречь вторым слагаемым из-за его ничтожно малой величины в знаменателе, существенно упростив выражение (13). Изменив расположение пределов интегрирования, преобразуем:

$$\begin{aligned} \tau_{\text{слив.2}} &= \frac{\sqrt{2}L}{f\bar{\mu}} \sqrt{\frac{\rho_{\text{ж}}}{P_{\text{изб}}}} \int_0^{D/2} \sqrt{z(D-z)} dz = \\ &= \frac{L}{f\bar{\mu}} \sqrt{\frac{2D\rho_{\text{ж}}}{P_{\text{изб}}}} \int_0^{D/2} \sqrt{z\left(1-\frac{z}{D}\right)} dz. \end{aligned} \quad (14)$$

Обозначив  $x = -z/D$  и  $a = 1/2$ , второй множитель в подынтегральном уравнении разложим в ряд с биномиальными коэффициентами:

$$(1+x)^a = 1 + \frac{ax}{1!} + \frac{a(a-1)x^2}{2!} + \frac{a(a-1)(a-2)x^3}{3!} + \dots \quad (15)$$

Необходимо учитывать первые три члена разложения, так как ряд быстро сходится, ввиду того что его четвертый член в 128 раз меньше первого.

Преобразуем:

$$\sqrt{1-\frac{z}{D}} = 1 - \frac{z}{2D} - \frac{z^2}{8D^2}. \quad (16)$$

Решая выражение (16) в (14), находим интеграл и получаем

$$\begin{aligned} \tau_{\text{слив.2}} &= \frac{L}{f\bar{\mu}} \sqrt{\frac{2D\rho_{\text{ж}}}{P_{\text{изб}}}} \int_0^{D/2} \left( z^{1/2} - \frac{z^{3/2}}{2D} - \frac{z^{5/2}}{8D^2} \right) dz = \\ &= \frac{0,15D^2 L \rho_{\text{ж}}^{1/2}}{\bar{\mu} f P_{\text{изб}}^{1/2}}. \end{aligned} \quad (17)$$

Выражение (12) определяет время слива ЗНП, и, решая его, находим количественные показатели в создавшихся температурных условиях. А именно:  $\tau_{\text{слив.1}} = 1063 \text{ с} = 17,72 \text{ мин}$ ;  $\tau_{\text{слив.2}} = 948 \text{ с} = 15,8 \text{ мин}$ ;  $\tau_{\text{слив.полн}} = 17,72 + 15,8 = 33,5 \text{ мин} \approx 0,5 \text{ ч}$ . Время на вспомогательные операции, связанные с установкой цистерн на площадку и отводом их с площадки маневровым тепловозом, можно оценить также в 30 мин. В целом выгрузку наливного поезда в 45 вагонов-цистерн на сливной площадке средней мощности можно приблизить к нормативам летнего времени.

Сопоставление с экспериментальными показателями времени выгрузки ЗНП самотеком в зависимости от температуры окружающей среды и вязкости самого нефтепродукта, представленными в [4, 5], показало, что при создании избыточного давления в котле вагона-цистерны затраты времени на выгрузку ЗНП снижаются в 1,4 раза по сравнению со стандартным вариантом.

При избыточном давлении ( $P_{\text{изб}} = 20 \text{ кПа}$ ) в котле вагона-цистерны в процессе выгрузки нужно подавать порядка  $72 \text{ м}^3$  воздуха массой примерно 85 кг, содержащего 18 % (или 15,5 кг) кислорода. Из уравнения (1) следует, что для выжигания такого количества кислорода необходимо порядка 4,5 кг пропан-бутановой смеси (около 12 л) себестоимостью приблизительно в 500 руб. Это намного ниже цены других смесей (например, азота), применяемых для создания инертной среды в свобод-

ном пространстве котла, что также подтверждает актуальность перспективной технологии выгрузки вязких нефтепродуктов из котла вагона-цистерны.

После выгрузки самотеком вязкий ЗНП (например, мазут М100) попадает в приемную яму-накопитель, устроенную ниже железнодорожного полотна на сливной площадке, откуда центробежными насосами его перекачивают по обогреваемому мазутопроводу на склад.

## ВЫВОДЫ

1. Рассмотрен способ разогрева застывающих нефтепродуктов, в основе которого лежит низкотемпературное горение (~200 °С) углеводородных топлив (пропан-бутановой смеси) на поверхности шпинельного катализатора ( $\text{NiCr}_2\text{O}_4$ ).

2. Представлен эскизный проект котла вагона-цистерны с тепловыми трубами и нагревательными элементами на основе применения каталитического горения углеводородных топлив.

3. Предложено использовать образующийся при каталитическом горении пропан-бутановой смеси углекислый газ ( $\text{CO}_2$ ) в качестве газа наддува, что позволит в 1,4 раза ускорить слив нефтегруза по сравнению с базовым вариантом слива самотеком.

4. Сделаны оценочные гидравлические расчеты времени выгрузки по новой технологии разогрева ЗНП (мазута котельного М100).

## Литература

1. Железнодорожные цистерны. Конструкции, техническое обслуживание и ремонт / И. Г. Морчиладзе, А. П. Никодимов, М. М. Соколов, А. В. Третьяков. Москва : ИБС-Холдинг, 2006. 516 с.
2. Моисеев В. И., Жебанов А. В., Комарова Т. А. Организация перевозок вагонами-цистернами застывающих нефтяных топлив с передачей по полевым трубопроводам в условиях низких температур // Транспорт Урала. 2021. № 2 (69). С. 40–43. DOI: 10.20291/1815-9400-2021-2-40-43. ISSN 1815-9400.
3. Моисеев В. И., Жебанов А. В. Оптимальные варианты перевозки застывающих темных и светлых нефтепродуктов в вагонах-цистернах // Вестник транспорта Поволжья. 2021. № 2 (86). С. 7–14. ISSN 1997-0722.
4. Власов А. В. Борьба с потерями при транспортировании и хранении нефтепродуктов (анализ и оценки потерь). Москва : ЦНИИТЭНЕФТЕХИМ, 1984. 52 с.
5. Типовой технологический процесс железнодорожных станций по наливу и сливу нефтегрузов и промывочно-пропарочных предприятий по очистке и подготовке цистерн под перевозку грузов. Москва : Транспорт, 1982. 71 с.
6. Крылов О. В. Глубокое каталитическое окисление углеводородов. Москва : Наука, 1981. 199 с.
7. Дубовкин Н. Ф. Справочник по углеводородным топливам и продуктам их сгорания. Москва : Госэнергоиздат, 1962. 320 с.
8. Дан П., Рей Д. Тепловые трубы. Москва : Энергия, 1979. 271 с.
9. Жебанов А. В., Комарова Т. А., Моисеев В. И. Совершенствование методов расчета охлаждения загустевших нефтепродуктов при железнодорожных перевозках в цистернах // Транспорт Российской Федерации. 2013. № 3 (46). С. 54–56. ISSN 1994-831X.

## References

1. Morchiladze I. G., Nikodimov A. P., Sokolov M. M., Tretyakov A. V. Railway tanks. Construction, maintenance and repair [Zheleznodorozhnye tsisterny. Konstruktsiya, tekhnicheskoe obsluzhivanie i remont]. Moscow, IBS Holding, 2006. 516 p.
2. Moiseev V. I., Zhebanov A. V., Komarova T. A. Organization of transportation by tank cars of solidified petroleum fuels with transmission through field pipelines in low temperature conditions [Organizatsiya perevozok vagonami-tsisternami zastyvayushchikh neftyanykh topliv s peredachey po polevym truboprovodam v usloviyakh nizkikh temperatur]. Transport of the Urals. 2021. No. 2 (69). Pp. 40–43. DOI: 10.20291/1815-9400-2021-2-40-43. ISSN 1815-9400.
3. Moiseev V. I., Zhebanov A. V. Optimal options for transportation of solidifying heavy and light oil products in tank cars [Optimal'nye varianty perevozki zastyvayushchikh temnykh i svetlykh nefteproduktov v vagonakh-tsisternakh]. Bulletin of transport of the Volga region. 2021. No. 2 (86). Pp. 7–14. ISSN 1997-0722.
4. Vlasov A. V. Dealing with losses during transportation and storage of petroleum products (analysis and evaluation of losses) [Bor'ba s poteryami pri transportirovani i khraneni nefteproduktov (analiz i otsenki poter)]. Moscow, 1984. 52 p.
5. Typical technological process of railway stations for filling and draining oil and gas cargoes and washing and steaming enterprises for cleaning and preparing tanks for cargo transportation [Tipovoy tekhnologicheskij protsess zheleznodorozhnykh stantsiy po nalivu i slivu neftegruzov i promyvochno-proparochnykh predpriyatij po oчитке i podgotovke tsistern pod perevozku gruzov]. Moscow, Transport, 1982. 71 p.
6. Krylov O. V. Deep catalytic oxidation of hydrocarbons [Glubokoe kataliticheskoe okislenie uglevodorodov]. Moscow, Science, 1981. 199 p.
7. Dubovkin N. F. Handbook of hydrocarbon fuels and their combustion products [Spravochnik po uglevodorodnym toplivam i produktam ikh sgoraniya]. Moscow, 1962. 320 p.
8. Dunn P., Reay D. Heat pipes [Teplovyje trubyy]. Moscow, Energy, 1979. 271 p.
9. Zhebanov A. V., Komarova T. A., Moiseev V. I. Improvement of methods for calculation of cooling of thickening petroleum products during rail transportation in tanks [Sovershenstvovanie metodov rascheta okhlazhdeniya zagustevayushchikh nefteproduktov pri zheleznodorozhnykh perevozkakh v tsisternakh]. Transport of the Russian Federation. 2013. No. 3 (46). Pp. 54–56. ISSN 1994-831X.

УДК 629.463.32:614.841

Дмитрий Вячеславович Зяблов, аспирант кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство»  
Российского университета транспорта РУТ (МИИТ), Москва, Россия,

Сергей Валерьевич Беспалько, доктор технических наук, профессор кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство»  
Российского университета транспорта РУТ (МИИТ), Москва, Россия

## ОБСЛЕДОВАНИЕ ПАРКА ВАГОНОВ-ЦИСТЕРН НА НАЛИЧИЕ ПРОЛИВА НЕФТЕПРОДУКТОВ

Dmitriy Vyacheslavovich Zyablov, postgraduate student, Railway Cars and Carriage Facilities Department,  
Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia,

Sergey Valeryevich Bepalko, DSc in Engineering, Professor, Railway Cars and Carriage Facilities Department,  
Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia

### Inspection of the tank car fleet for availability of oil spill

#### Аннотация

Статья посвящена обследованию парка нефтебензиновых цистерн для оценки наличия и размеров зон пролива перевозимого продукта. По результатам замеров определены итоговые характеристики зон пролива: длина вдоль оси котла цистерны, угол зоны, длина дуги, площадь зоны пролива. Рассчитаны вероятностные характеристики и построены интегральные функции распределения по каждому параметру. Установлено, что распределение геометрических характеристик зон пролива близко к нормальному закону. Полученные результаты могут быть использованы при выборе параметров системы защиты котлов цистерн от пожара.

**Ключевые слова:** нефтебензиновая вагон-цистерна, пожаро- и взрывобезопасность, котел, температурное поле, средства защиты, пожар, открытое пламя, пролив

#### Abstract

The article is devoted to the survey of the petrol tank fleet from the point of view of availability and size of the transported product spill zone. Based on the results of measurements, the final characteristics of the spill zones were determined: the length along the axis of the tank boiler, the angle of the zone, the length of the arc, the area of the spill zone. Probabilistic characteristics are calculated and integral distribution functions for each parameter are constructed. It is established that distribution of geometric characteristics of the spill zones is close to the normal law. The obtained results are proposed to be used when choosing the parameters of the tank boiler protection system from fire.

**Keywords:** petrol tank car, fire and explosion safety, boiler, temperature field protective equipment, fire, open flame, spill

DOI: 10.20291/1815-9400-2023-3-30-34

**Б**езопасность движения на железных дорогах представляет собой чрезвычайно важную и актуальную задачу. В первую очередь это касается обеспечения пожаро- и взрывобезопасности при перевозках особо опасных грузов в цистернах [1].

Один из наиболее опасных аварийных режимов для таких цистерн — действие открытого пламени на котел в случае пожара [2–4]. Причем источник пожара может находиться как снаружи, так и в самой цистерне, а кроме того, одновременно и вне цистерны, и на ней. Воздействие открытого пламени влечет за собой несколько последствий. Во-первых, это возникновение неравномерного температурного поля в оболочке котла, что вызывает температурные напряжения. Во-вторых, происходит теплоприток к перевозимому грузу и, как следствие, повышение его давления, что создает дополнительные напряжения в оболочке. В-третьих, при существенном повышении температуры котла «ослабевают» механические характеристики материала, в частности, снижаются модуль упругости и предел текучести. Причем в результате снижения предела текучести изменяется восприятие оболочкой котла штатных нагрузок. В целом все эти факторы могут привести и часто приводят к нарушению прочности котла и пожарам (рис. 1).

Опыт эксплуатации вагонов-цистерн свидетельствует и о наличии на их котлах проливов перевозимого продукта (рис. 2), что может усугубить условия пожара. Подобные проливы происходят из-за неисправности арматуры [5, 6] и обычно распространяются по поверхности котла симметрично от горловины.

На основе многолетних экспериментально-теоретических исследований, посвященных обеспечению пожаро- и взрывобезопасности [7–9] и выполненных МИИТом совместно с другими организациями по заданию МПС, были, в частности, разработаны сценарии ава-

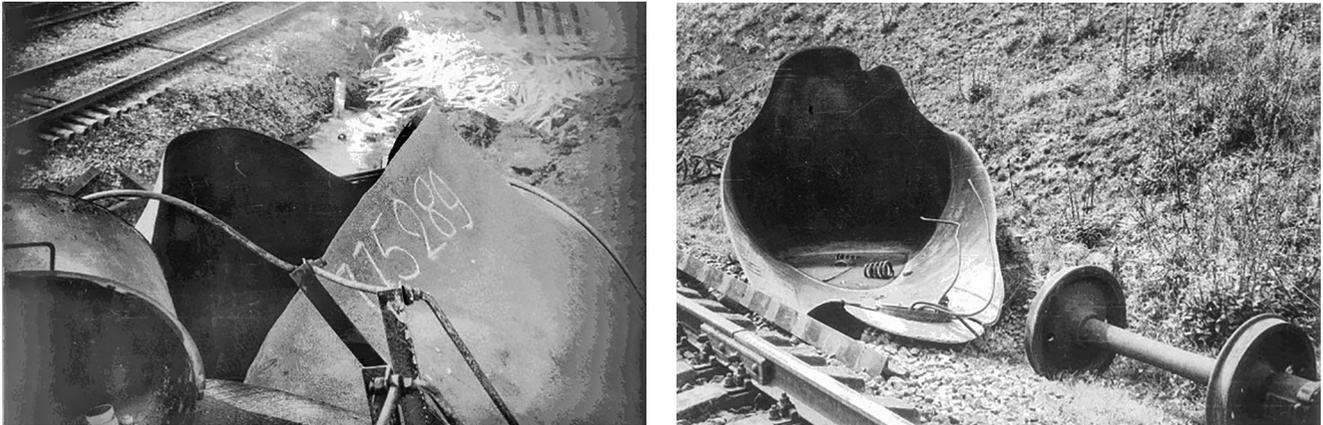


Рис. 1. Последствия пожара на котлах цистерн

рийных ситуаций и соответствующие требования к цистернам, используемым для перевозки опасных грузов, принятые как дополнение к нормам [10].

Цель настоящего исследования состоит в определении числовых параметров зон пролива для парка нефтебензиновых цистерн.

Обследования проводились в январе — марте 2022 г. на путях одной из станций. Всего обследовано 500 вагонов-цистерн. Обследование состояло в определении наличия и размеров зоны пролива для каждой нефтебензиновой цистерны. На рис. 3 показаны измеряемые параметры: длина зоны ( $L$ ), высота зоны от верхней образующей ( $h$ ), наружный диаметр котла ( $D$ ).

Весь массив обследованных вагонов включал три группы: а) вагоны, не имевшие следов пролива (их доля составила 30 %); б) вагоны с зонами пролива незначительных размеров (60 %); в) вагоны с существенными следами проливов (10 %). В табл. 1 приведен фрагмент таблицы измерений по вагонам третьей группы. Отметим, что для каждого варианта зон пролива характерна практически постоянная высота вдоль оси котла.

На основе полученных первичных данных определены итоговые характеристики зоны пролива. На рис. 4 приведены эскизы определения характеристик для двух вариантов распространения пролива.

На рис. 4 обозначено:  $s$  — общая длина дуги зоны пролива;  $\varphi$  — угол, определяющий половину зоны пролива по окружности;  $R$  — радиус котла ( $R = D/2$ ).



Рис. 2. Нефтебензиновые цистерны с зонами пролива



Рис. 3. Параметры зоны пролива, подлежащие измерению

Таблица 1

Фрагмент таблицы замеров зон пролива

№	Ширина потёков, мм	Высота потёков от верха, мм	Диаметр котла, мм	Наружный радиус, мм
1	1340	2250	2820	1410
2	980	2680	2800	1410
3	950	1900	3000	1510
4	590	1940	2800	1410
5	1890	2500	3000	1510
6	1580	2730	3000	1510
7	1210	1970	3000	1510
8	880	2870	3000	1510
9	1000	2460	2800	1410
10	435	2320	2800	1410

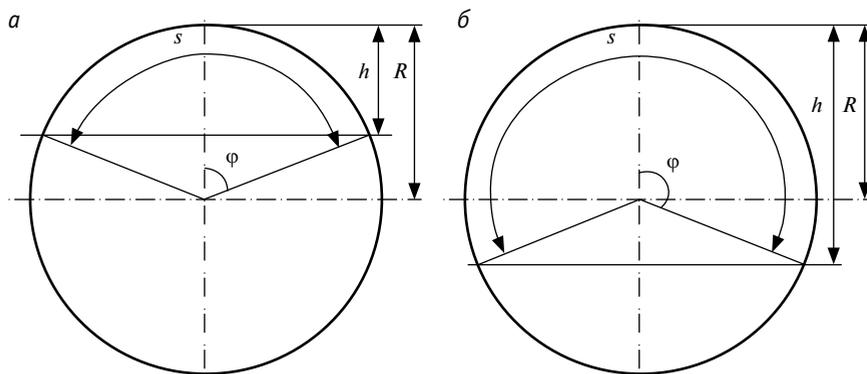


Рис. 4. Определение характеристик зоны пролива:  
а — уровень пролива выше середины котла ( $h \leq R$ );  
б — уровень пролива ниже середины котла ( $h > R$ )

Таблица 2

Фрагмент таблицы расчетных характеристик зоны пролива

№	Угол, °	Длина дуги зоны, мм	Площадь зоны, м <sup>2</sup>
1	99,25	5509	7,38
2	100,85	5822	5,71
3	101,85	5368	5,10
4	103,50	5210	3,07
5	105,85	5973	11,29
6	106,32	6143	9,71
7	109,57	5456	6,60
8	109,57	6235	5,49
9	109,91	5673	5,67
10	111,04	5566	2,42

Из рис. 4 следует, что угол зоны пролива находится по формулам:

$$\varphi = \begin{cases} \arccos \frac{R-h}{R} & \text{при } 0 \leq h \leq R; \\ \pi - \arccos \frac{h-R}{R} & \text{при } R < h \leq 2R. \end{cases}$$

Длина дуги зоны пролива равна

$$s = 2R \cdot \varphi.$$

Наконец, площадь зоны пролива (наиболее значимый параметр) равна

$$F = L \cdot s.$$

В табл. 2 приведен фрагмент таблицы результирующих характеристик зоны пролива.

Завершающий этап обработки результатов обследования состоял в определении вероятностных характеристик по каждому параметру. Кроме того, все параметры были отсортированы по возрастанию, построены графики их распределения (интегральная функция распределения). Результаты представлены на рис. 5.

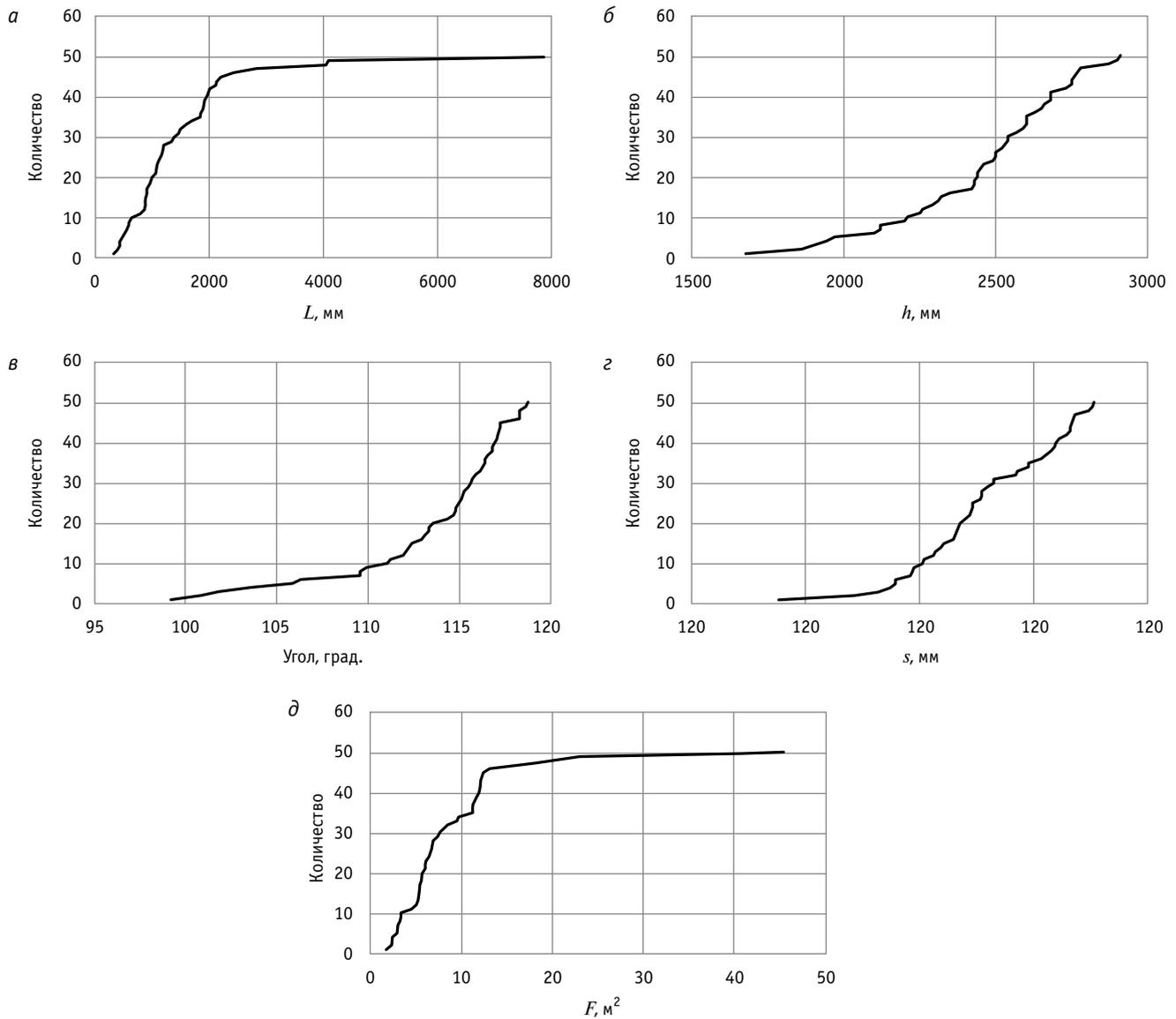
Как видно из рис. 5, распределение геометрических характеристик зон пролива близко к нормальному закону [11]. В табл. 3 приведены итоговые параметры распределения: математическое ожидание  $M$  и среднеквадратичное отклонение  $\sigma$ .

Полученные значения математического ожидания могут служить основой для выбора параметров системы защиты от пожара. В качестве подобной защиты предлагается использовать экран, имеющий слой огнезащитного материала. Конструкция и характеристики подобных экранов разработаны в исследовании В. Ю. Навцени [12]. Данную систему можно принять за основу, придав ей геометрические размеры в соответствии с данными табл. 3.

### ВЫВОДЫ

1. Обследовано 500 нефтебензиновых вагонов-цистерн на наличие зон пролива.

2. Установлено, что 10 % цистерн имеют существенную зону пролива. Это свидетельствует о возможном влиянии проливов на аварийные ситуации, связанные с пожаром.



**Рис. 5. Законы распределения геометрических параметров зон пролива:**  
а — ширина; б — высота потёков от верха; в — угол; г — длина дуги зоны пролива; д — площадь зоны пролива

3. Определены размеры зон пролива для каждой цистерны.
4. По результатам исследования вероятностных характеристик установлено, что законы распределения размеров зон пролива близки к нормальному.
5. Определены математические ожидания основных геометрических характеристик. Математические ожидания составили:
  - для длины зоны вдоль оси — 1,5 м;
  - для угла зоны пролива — 113,52°;
  - для длины дуги зоны пролива — 5,78 м;
  - для площади зоны пролива — 8,65 м<sup>2</sup>.
6. Полученные данные могут быть использованы при выборе параметров системы защиты котлов цистерн от пожара.

Таблица 3

Параметры распределения основных геометрических характеристик зон пролива

Параметр	<i>M</i>	$\sigma$
Ширина потёков, м	1,50	1,22
Высота потёков от верха, м	2,45	0,28
Угол, °	113,52	0,08
Длина дуги зоны, м	5,78	0,31
Площадь зоны, м <sup>2</sup>	8,65	6,89

## Литература

1. О техническом регулировании : Федеральный закон от 27.12.2002 г. № 184-ФЗ. URL: <http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&nd=102079587> (дата обращения: 16.04.2023).
2. Пономарев В. М. Повышение безопасности и устойчивости функционирования железнодорожного транспорта : монография. Москва : МИИТ, 2011. 174 с.
3. Попов В. Г., Сухов Ф. И., Петров С. В. Оценка риска от аварийных происшествий // Мир транспорта. 2012. Т. 10. № 6 (44). С. 150–155. ISSN 1992-3252.
4. Пономарев В. М., Шевченко А. И. Предупреждение и ликвидация чрезвычайных ситуаций на железнодорожном транспорте // Наука и техника транспорта. 2005. № 2. С. 40–46. ISSN 2074-9325.
5. Специализированные цистерны для перевозки опасных грузов / Под ред. В. Н. Котуранова и В. Н. Филиппова. Москва : Изд-во стандартов, 1993. 214 с.
6. Филиппов В. Н., Скуратов А. Е. Общие технические требования к арматуре вагонов-цистерн для опасных грузов. Безопасность движения поездов // Труды МИИТ. Москва, 1999.
7. A study of the behaviour of a protected vessel containing LPG during pool fire engulfment / Yu. N. Shebeko, I. A. Bolodian, V. N. Filippov [et al.] // Journal of Hazardous Materials. 2000. Vol. 77. No. 1–3. Pp. 43–56.
8. Экспериментальное исследование поведения тонкостенной оболочки в очаге пламени / Ю. Н. Шебеко, В. А. Назаренко, В. Н. Филиппов [и др.] // Пожарная безопасность. 2004. № 2. С. 64–71. ISSN 2411-3778.
9. Беспалько С. В., Маслов И. Г. Методика моделирования напряженно-деформированного состояния котла цистерны от воздействия неравномерного температурного поля в очаге пламени // Безопасность движения поездов : труды VII научно-практической конференции. Москва : МИИТ, 2007. С. IX-26–IX-27.
10. Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). Москва : ГосНИИВ ; ВНИИЖТ, 1996. 319 с.
11. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. Москва : Наука, 1969. 576 с.
12. Навценя В. Ю. Развитие научных основ и совершенствование методов обеспечения пожаровзрывобезопасности технологического оборудования с горючими газами и жидкостями : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Москва, 2003. 574 с.

## References

1. About technical regulation [O tekhnicheskomo regulirovanii]. Federal Law from 27.12.2002 No. 184-FZ. URL: <http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&nd=102079587> (access date: 16.04.2023).
2. Ponomarev V. M. Improving the safety and sustainability of railway transport [Povysenie bezopasnosti i ustoychivosti funktsionirovaniya zheleznodorozhnogo transporta] : monograph. Moscow, MIIT, 2011. 174 p.
3. Popov V. G., Sukhov F. I., Petrov S. V. Accident risk assessment [Otsenka riska ot avariynykh proissheshtiy]. World of Transport and Transportation. 2012. Vol. 10. No. 6 (44). Pp. 150–155. ISSN 1992-3252.
4. Ponomarev V. M., Shevchenko A. I. Prevention and liquidation of extreme situations on the railway transport [Preduprezhdenie i likvidatsiya chrezvychaynykh situatsiy na zheleznodorozhnom transporte]. Science and technology in transport. 2005. No. 2. Pp. 40–46. ISSN 2074-9325.
5. Specialized tanks for transportation of dangerous goods [Spetsializirovannye tsisterny dlya perevozki opasnykh грузов]. Ed. by V. N. Koturanov and V. N. Filippov. Moscow, 1993. 214 p.
6. Filippov V. N., Skuratov A. E. General technical requirements to fittings of tank cars for dangerous goods. Train safety [Obshhie tekhnicheskie trebovaniya k armature vagonov-tsistern dlya opasnykh грузов. Bezopasnost' dvizheniya poezdov]. MIIT Proceedings. Moscow, 1999.
7. Shebeko Yu. N., Bolodian I. A., Filippov V. N. [et al.] A study of the behaviour of a protected vessel containing LPG during pool fire engulfment. Journal of Hazardous Materials. 2000. Vol. 77. No. 1–3. Pp. 43–56.
8. Shebeko Yu. N., Nazarenko V. A., Filippov V. N. [et al.]. Experimental study of a thin-walled shell behavior in the flame hearth [Eksperimental'noe issledovanie povedeniya tonkostennoy obolochki v ochage plameni]. Fire Safety. 2004. No. 2. Pp. 64–71. ISSN 2411-3778.
9. Bepalko S. V., Maslov I. G. Method of modeling the stress-strain state of a tank boiler from influence of uneven temperature field in the flame hearth [Metodika modelirovaniya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya kotla tsisterny ot vozdeystviya neravnomernogo temperaturnogo poly v ochage plameni]. Train safety. Proceedings of the 7th Scientific and Practical conference. Moscow, Publishing House of MIIT, 2007. Pp. IX-26–IX-27.
10. Norms for calculation and design of cars of 1520 mm gauge railways of Ministry of Railways (non-self-propelled) [Normy dlya rascheta i proektirovaniya vagonov zheleznykh dorog MPS kolei 1520 mm (nesamokhodnykh)]. Moscow, 1996. 319 p.
11. Venttsel E. S. Probability theory [Teoriya veroyatnostey]. Moscow, Science, 1969. 576 p.
12. Navtsenya V. Yu. Development of scientific foundations and improvement of methods for ensuring fire and explosion safety of technological equipment with flammable gases and liquids [Razvitie nauchnykh osnov i sovershenstvovanie metodov obespecheniya pozharovzryvobezopasnosti tekhnologicheskogo oborudovaniya s goryuchimi gazami i zhidkostyami]. DSc in Engineering Thesis. Moscow, 2003. 574 p.

Объем статьи 0,52 авторских листа

УДК 656.222.6

**Сергей Анатольевич Бессоненко**, доктор технических наук, профессор кафедры «Управление эксплуатационной работой» Сибирского государственного университета путей сообщения (СГУПС), Новосибирск, Россия,  
**Екатерина Викторовна Климова**, кандидат экономических наук, доцент кафедры «Управление эксплуатационной работой» Сибирского государственного университета путей сообщения (СГУПС), Новосибирск, Россия,  
**Николай Игоревич Осипов**, аспирант кафедры «Управление эксплуатационной работой» Сибирского государственного университета путей сообщения (СГУПС), Новосибирск, Россия

## ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНТЕРВАЛЬНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ

**Sergey Anatolyevich Bessonenko**, DSc in Engineering, Professor, Operations Management Department, Siberian Transport University (STU), Novosibirsk, Russia,

**Ekaterina Viktorovna Klimova**, PhD in Economics, Associate Professor, Operations Management Department, Siberian Transport University (STU), Novosibirsk, Russia,

**Nikolay Igorevich Osipov**, postgraduate student, Operations Management Department, Siberian Transport University (STU), Novosibirsk, Russia

### Evaluating the efficiency of interval train control

#### Аннотация

В статье проанализированы назначение, основные характеристики и степень внедрения интервального регулирования, опыт по оценке его эффективности. Исследованы сопряженные с внедрением интервального регулирования проблемы, в частности «волновой эффект», возникающий при уплотнении поездопотоков и усугубляющий совокупную цепную реакцию. Определены направления дальнейших исследований в области оценки эффективности интервального регулирования: моделирование работы конкретных участков и станций, анализ пропускной способности в условиях сбоев цифровой радиосвязи, проработка ориентированных на бесшовность перевозочного процесса решений, корректировка документации, оценка эффективности интервального регулирования на однопутных линиях. Предложена структура системы поддержки принятия решений при развитии интервального регулирования на однопутных линиях.

**Ключевые слова:** интервальное регулирование движения поездов, «волновой эффект», виртуальная сцепка, подвижные блок-участки, пропускная способность железных дорог

#### Abstract

The paper analyses the purpose, main characteristics and extent of implementation of interval control, as well as experience in assessing its efficiency. Problems associated with the introduction of interval control, in particular the «shockwave effect» arising from the densification of train flows and exacerbating the cumulative chain reaction, have been investigated. The directions for further research in the evaluation of the efficiency of interval control were determined: modelling of the operation of specific sections and stations, analysis of throughput under conditions of digital radio communication failures, development of solutions oriented towards the seamless transport process, correction of documentation, evaluation of the efficiency of interval control on single-track lines. The structure of a decision support system for the development of interval control on single-track lines is proposed.

**Keywords:** interval train control, «shockwave effect», virtual coupling, moving blocks, railway capacity

DOI: 10.20291/1815-9400-2023-3-35-45

#### ВВЕДЕНИЕ

Последнее десятилетие характеризуется ростом грузо- и поездопотоков в восточном направлении. Это приводит к тому, что ключевые железнодорожные линии вынуждены работать в условиях отсутствия резервов пропускных и провозных способностей. Соответственно одной из важнейших задач становится активное внедрение инноваций, позволяющих предотвратить транспортные коллапсы на сети железных дорог.

Исторически именно развитие систем железнодорожной автоматики определяло новые технологические решения в организации перевозочного процесса и способствовало повышению эффективности использования инфраструктуры [1]. Одним из способов таких решений стало сокращение станционных и межпоездных интервалов, но реализовать его традиционными средствами затруднительно. Это обстоятельство предопределило необходимость проведения работ по тиражированию систем интервального регулирования движения поездов (СИРДП) нового поколения на линиях с дефицитом пропускной способности. Оценке эффективности таких систем и посвящен анализ публикаций в настоящей статье. Отметим, что в связи с высокой стоимостью внедрения передовых СИРДП детальная проработка аспектов перевозочного процесса, включая взаимодействие всех подразделений железнодорожного транспорта и проектирование инфраструктуры под сокращенные интервалы, является весьма актуальной проблемой.

## ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЕРЕДОВЫХ СИСТЕМ ИНТЕРВАЛЬНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ ПЕЗДОВ, ОПЫТ ПО ОЦЕНКЕ ИХ ЭФФЕКТИВНОСТИ

Согласно стандарту [2], интервальное регулирование движения поездов (ИРДП) — это способ регулирования движения поездов и обеспечения безопасности движения путем установления заданных интервалов попутного следования и направления движения поездов по железнодорожным перегонам.

Ключевым документом, определяющим стратегию внедрения ИРДП на сети железных дорог ОАО «РЖД» и выступающим в качестве исходной точки для рассмотренных в настоящей статье исследований, является Концепция [3], в которой выделены «основные этапы развития систем, отвечающих за управление и обеспечение безопасности движения поездов на отечественных железных дорогах, проведен сравнительный анализ с учетом аналогичных зарубежных систем, сформулированы требования к развитию технических решений и технологий на основе современных тенденций и трендов» [3].

К задачам, на решение которых ориентировано ИРДП, относятся [4]:

- обеспечение безопасного интервала между поездами;
- согласованное движение поездов по полигону;
- выполнение требуемого объема перевозок в период ремонтных работ;
- надежное отслеживание ограничений скорости бортовыми средствами;
- резервирование и киберзащищенность средств ИРДП;
- обеспечение возможности оперативного изменения графика движения.

Ведущие специалисты в области эксплуатации железных дорог в качестве наиболее перспективных решений по переходу от традиционной системы автоблокировки с фиксированными блок-участками к ИРДП нового поколения выделяют микропроцессорную автоблокировку АБТЦ-МШ и технологию виртуальной сцепки (ВСЦ). В ПТЭ от 01.08.2022 г. дополнительно к порядку эксплуатации классических систем закреплены требования и к СИРДП нового поколения, что создает нормативную базу для их тиражирования.

АБТЦ-МШ предназначена для применения на однопутных, двухпутных и многопутных скоростных, магистральных и малоинтенсивных линиях, работающих как на электрической, так и на автономной тяге [5]. На начало 2023 г. данной системой оборудовано 1806 км линий сети железных дорог ОАО «РЖД» (Московское центральное кольцо, Байкало-Амурская магистраль, железнодорожный обход Украины), что составляет около 3 % от общей протяженности автоблокировки. АБТЦ-МШ предусматривает технологию ИРДП с подвижными блок-участками (ПБУ), обеспечивающую следование поездов с сокращенным межпоездным интервалом. На современном этапе развития ОАО «РЖД» этот метод является самым эффективным (до 20–25 % повышения пропускной способности), но и самым дорогостоящим [6].

Второй промежуточный вариант ИРДП — соединение по цифровому радиоканалу локомотивов двух (в перспективе — до пяти) идущих вслед поездов по технологии ВСЦ. Эта

технология позволяет реализовать пропуск последовательно движущихся поездов с уменьшенным интервалом, значение которого определяется в зависимости от сложности условий на перевальных элементах профиля пути [7]. В пределах трех железных дорог Восточного полигона ВСЦ активно используется практически на всем протяжении главного хода Транссиба и способствует увеличению пропускной способности участков до 10 % [6]. В 2022 г. с применением ВСЦ на Восточно-Сибирской железной дороге было отправлено более 1,1 тыс. поездов, на Дальневосточной — 3,9 тыс., на Забайкальской — 6 тыс., а на Красноярской железной дороге были проведены испытания. В январе 2023 г. на Забайкальской дороге проведены успешные испытания вождения ВСЦ двух поездов по неправильному пути. В большинстве случаев в ВСЦ на данный момент следуют два попутных поезда, однако в феврале 2023 г. впервые на Восточно-Сибирской железной дороге был осуществлен пропуск трех поездов.

Значительный вклад в оценку эффективности СИРДП внесли специалисты Сибирского государственного университета путей сообщения. Главные результаты их исследований [8–12]: определение точки безразличия (1,33 длины блок-участка), являющейся границей эффективности применения ВСЦ; выявление эффективности физической сцепки при формировании соединенного поезда на станции, а виртуальной — на перегоне; выделение шести вариантов применения физической и виртуальной сцепки поездов с выбором наиболее оптимального из них для условного полигона; рассмотрение возможностей развития выделенного участка для освоения перспективных поездопотоков путем перехода к бессветофорным системам; разработка методики расчета наличной пропускной способности с учетом ВСЦ поездов.

Определенный интерес для развития СИРДП в России может представлять анализ достижений зарубежных ученых. Так, специалисты Иллинойского университета [13–16] определили зависимость эффективности ПБУ от структуры поездопотока, продвижения поездов в пакетах, гибкости графика движения поездов (ГДП) и конфигурации разъездов; прямую пропорциональную зависимость эффективности ПБУ от количества двухпутных линий; потенциал ПБУ по повышению целесообразности обращения более коротких грузовых поездов, что позволяет сократить простои на технических станциях.

В исследовании европейских ученых [17] проведен анализ технологий ПБУ и ВСЦ применительно к разным сегментам рынка железнодорожных перевозок. Одним из главных его результатов стал вывод о недостаточной технической зрелости, препятствующей внедрению ВСЦ в Европе, вместе с тем отмечается, что преодоление этих трудностей позволит ВСЦ стать доминирующей системой. Во многом данному обстоятельству способствует прирост пропускной способности при ВСЦ в сравнении с ПБУ на магистральных (на 14 %), грузовых (на 13 %) и высокоскоростных (на 11 %) линиях.

Целью работы британских ученых [18] было моделирование трех состояний движения ВСЦ поездов: «объединения», совместного следования и «разъединения». В соответствии с проведенными ими расчетами пропускная способность при ВСЦ может достигать 50 % прироста относительно ПБУ.

Таким образом, несмотря на различия в техническом исполнении концепции подвижных блок-участков, зарубежные ученые, равно как и российские, сосредоточены на оценке влияния СИРДП на пропускную способность железнодорожных линий. Однако сравнение отечественного и зарубежного опыта позволяет сделать вывод об особом положении ОАО «РЖД» в области развития СИРДП. Во-первых, в российской теории и практике ВСЦ рассматривается как промежуточный этап при переходе к ПБУ, дополняющий систему с фиксированными блок-участками, а в зарубежных исследованиях ВСЦ — это финальная стадия развития систем управления движением. Во-вторых, ИРДП уже внедряется на сети железных дорог ОАО «РЖД», что позволяет осуществлять дальнейшее развитие с учетом реального производства, тогда как, например, в Европе внедрение ВСЦ до сих пор находится на стадии моделирования [19].

### ПРОБЛЕМАТИКА ВНЕДРЕНИЯ ИНТЕРВАЛЬНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

Комплекс проблем, связанных с внедрением СИРДП, выходит за рамки функций одного подразделения железной дороги. На основании анализа выявлены две основные группы проблем, препятствующих тиражированию СИРДП четвертого поколения: это проблемы технического характера, связанные с разработкой и внедрением СИРДП, и проблемы технологического характера, сопряженные с необходимостью преобразования инфраструктуры и порядка ее эксплуатации. В работах [20, 21] сформирован перечень мероприятий по локомотивному хозяйству, хозяйствам движения, связи, автоматики и телемеханики, энергоснабжения, проведение которых необходимо для внедрения технологии ИРДП.

На сети железных дорог ОАО «РЖД» техническая реализация ИРДП неразрывно связана с деятельностью ученых АО «НИИАС», в ведении которых находятся обеспечение требуемого уровня надежности средств ИРДП, их увязка с электрической централизацией, переработка концепции участка удаления, внедрение ПБУ на главных путях станций [20].

К числу актуальных технических проблем, которые необходимо преодолеть для тиражирования СИРДП, относятся также недостаточный охват цифровой связью железнодорожных линий [22] и потребность в переоборудовании поездных локомотивов устройствами для ее восприятия. При ПБУ для сокращения длины защитного участка параметры каждого поезда учитываются и передаются по цифровому радиоканалу. Если линия не оснащена цифровой связью или локомотив не имеет устройств для восприятия через нее данных, то защитный участок для поезда не сокращается, однако ПБУ активны. В свою очередь, ВСЦ при данных обстоятельствах невозможна [23].

В работе [24] проанализирован план внедрения ВСЦ на участке Карымская — Хабаровск Забайкальской железной дороги. В том числе установлены факторы локомотивного комплекса, от которых зависит внедрение ВСЦ: это оснащение локомотивов системами ИСАВП-РТ-М, переработка регламента «минутной готовности» для реализации сокращенного межпоездного интервала, увеличение расхода топливно-энер-

гетических ресурсов, усложнение технологии подталкивания, повышение надежности локомотивов, мониторинг предотказного состояния.

Ликвидация проблем второго рода (технологического) необходима для максимальной реализации потенциала ИРДП. Например, анализ использования пропускной способности станций при ИРДП, выполненный в работе [25], позволил установить, что максимальный прирост результирующей пропускной способности линии возможен только при синхронизации пропускной способности перегонной инфраструктуры с пропускной и перерабатывающей способностями станций. Отсюда был сделан вывод, что затраты на развитие технологических линий технических станций необходимо учитывать в общих инвестициях на внедрение ИРДП.

Результатом работы [26] стало обоснование того, что внедрение ВСЦ дает максимально возможный эффект лишь в совокупности с развитием приемо-отправочных путей длиной более 1000 м на припортовых станциях и станциях смены локомотивов для ритмичного приема поездов длиной 71 и более усл. вагонов; проектированием на станциях смены локомотивных бригад разгонно-замедляющих путей параллельно главным путям для приема и отправления ВСЦ поездов; усилением контроля за выполнением нормативов простоя грузовых поездов на станциях смены локомотивных бригад; сокращением числа данных станций; поддержанием актуальности ГДП по всем техническим станциям.

Совокупный перечень мероприятий, необходимых для реализации технологии ИРДП, сформированный на основе анализа публикаций ведущих специалистов, представлен в форме диаграммы Исикавы (рис. 1).

### «ВОЛНОВОЙ ЭФФЕКТ» ПРИ ОСТАНОВКЕ ПЕЗДОВ НА ТЕХНИЧЕСКИХ СТАНЦИЯХ

Если успешность решения проблем первого рода вполне легко оценить по наличию ИРДП, то степень решения проблем второго рода лежит в определении баланса между необходимой пропускной способностью и маршрутной скоростью движения поездов. Согласно ПТЭ, при приеме на станцию поезд должен следовать по горловине со скоростью не более 40 км/ч. В случае сокращения межпоездного интервала до 6 мин первый поезд прибывает на станцию без потерь по скорости, а все последующие вынуждены снижать скорость ранее расчетной точки, чтобы обеспечить безопасность движения [27]. С другой стороны, при отправлении с технической станции без модернизации инфраструктуры выдерживать обеспечиваемый СИРДП интервал затруднительно. Такое явление обозначается термином «волновой эффект».

В 1980-е гг. [27] были предложены схемы горловин технической станции, при которых «волновой эффект» купируется: параллельно главным путям для поочередного приема (отправления) проектируются дополнительные пути — разводной (со стороны горловины приема) и разгонный (со стороны горловины отправления) [28]. Однако проектирование дополнительных путей экономически нецелесообразно, особенно в пределах Восточного полигона (из-за большого количества рек и мостов).

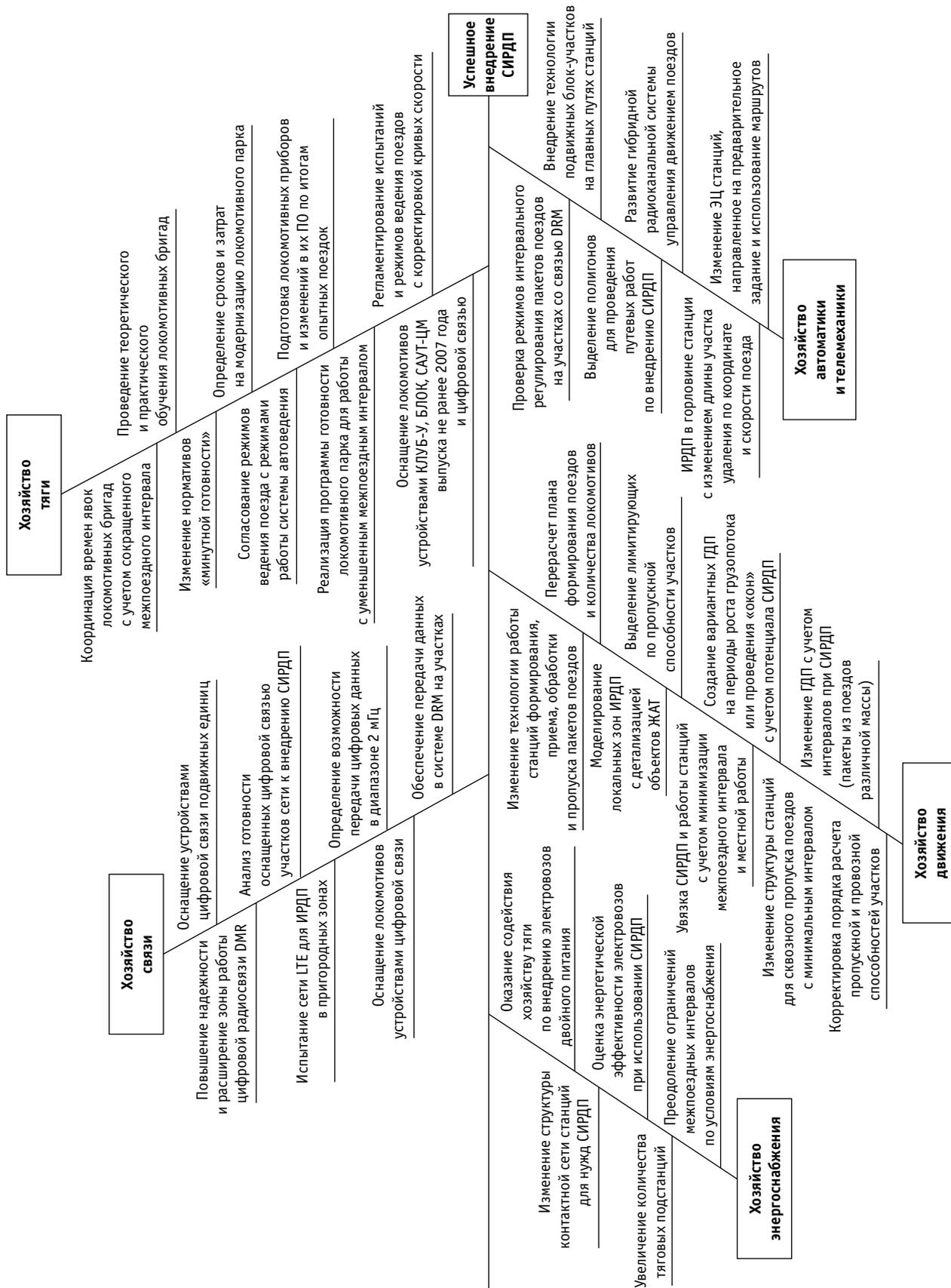


Рис. 1. Перечень мероприятий, необходимых для реализации технологии ИРДП

Таблица 1

Проблемы на пути к устранению «волнового эффекта» и способы их решения

Проблема	Описание влияния	Возможные пути решения
Человеческий фактор (машинисты)	«Развал» межпоездного интервала из-за недоиспользования допустимых скоростей	Повышение квалификации, развитие систем автоматизированного ведения поездов
Ограничение скорости следования с отклонением по стрелкам	Снижение скорости следования поезда по горловине до 40 км/ч, создающее «затор» на подходе	Укладка стрелок более пологих марок (проблематично), внедрение стрелок 1/11, 1/9 с повышенными скоростями движения
Ограничение скорости на подходе к запрещающему сигналу	Снижение скорости до 20 км/ч не менее чем за 400 м до запрещающего сигнала, что создает «затор» на подходе	Совершенствование тормозного оборудования
Недостаточность «компромиссных решений»	В отдельных случаях может потребоваться сооружение разводных или разгонных путей	Технико-экономическое обоснование сооружения дополнительной инфраструктуры

Второй способ решения проблемы «волнового эффекта» предусматривает модернизацию горловин с заменой стрелочных переводов крутых марок (1/9, 1/11) на стрелки более пологих марок (1/18, 1/22) [27]. Но в данном случае проблемой является расположение технических станций, которые из-за близости к инфраструктуре населенных пунктов давно исчерпали резервы пространства для своего развития. Кроме того, внедрение стрелочных переводов более пологих марок приводит к удлинению маршрутов приема, что нивелирует эффект от повышения скоростей движения.

Третий метод устранения «волнового эффекта» заключается в установке специальных светофоров (интервальных и групповых) вблизи стрелочных улиц, что благодаря бесшовному включению станционных горловин в систему АБТЦ-МШ позволяет повысить скорость движения. Это решение уже реализовано специалистами НИИАС на ряде станций Восточно-полигона [29].

Наиболее детально проблема «волнового эффекта» проработана в исследованиях Уральского государственного университета путей сообщения. Так, в работе [30] представлена имитационная модель 17 станций Свердловской железной дороги. Рассмотрены и ВСЦ, реализующая движение поездов на фиксированном расстоянии, и координатная система интервального регулирования (КСИР), предусматривающая движение на фиксированном по времени интервале. На основе моделирования движения поездов с применением тяговых расчетов определена длина разгонного пути в условиях работы КСИР: при интервале в 6 мин разгонный путь не требуется, при интервале в 2 мин его длина составляет 4,5 км [30]. Установлено, что ВСЦ по сравнению с КСИР накапливает на 22 % больше задержек под влиянием «волнового эффекта». Показано, что сложность проблемы «волнового эффекта» заключается в разнообразии ситуаций и в противоречивости критериев оценки эффекта от применения ИРДП, поэтому возникает необходимость в моделировании работы конкретного участка [30].

В работах [31, 32] отмечается, что переход к ориентированию на хвост поезда усугубляет проблему «волнового эффекта», в том числе и по причине человеческого фактора, так как машинист в силу отсутствия мотивации, достаточного уровня

квалификации или иных причин не реализует полностью резерв по скоростному режиму. Отсюда делается вывод о необходимости внедрять в перевозочном процессе системы автоведения, вплоть до беспилотных технологий.

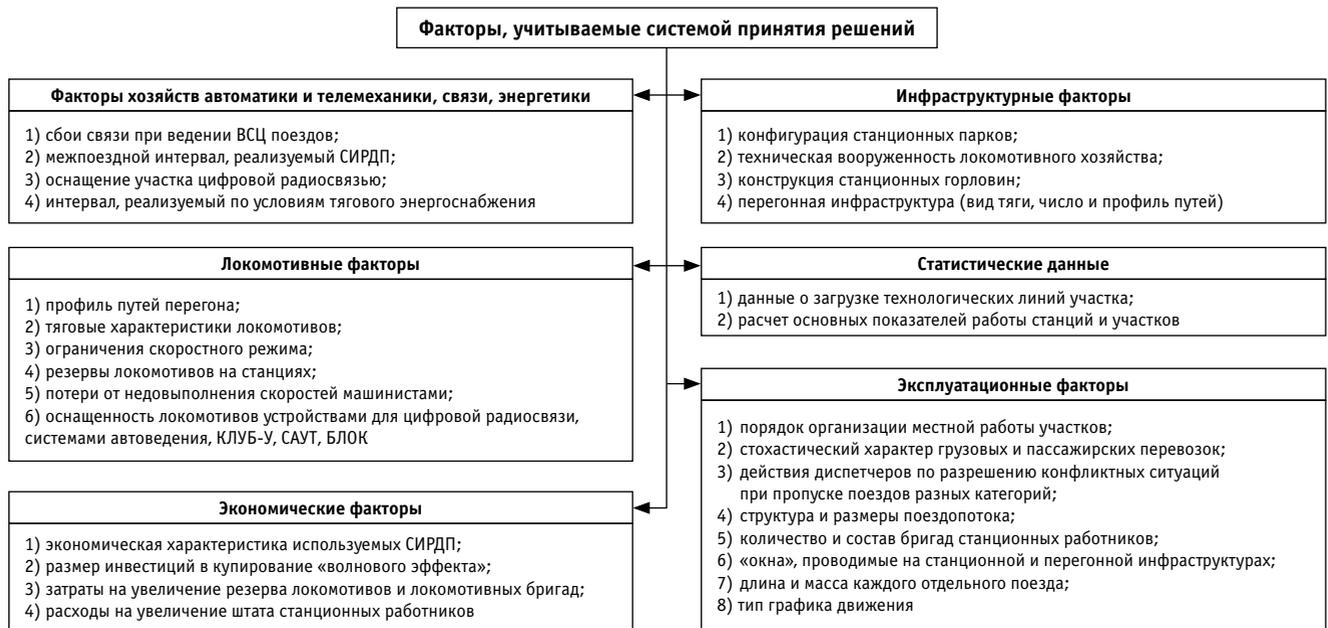
Несмотря на очевидные различия отечественных и зарубежных концепций ИРДП, проблема «волнового эффекта» относится к числу универсальных. Например, исследователи из Иллинойса уже активно анализируют явление, аналогичное «волновому эффекту», которое в их работах называется «ударными волнами». Проведя аналогию с автомобильными шоссе, они предлагают методику расчета размера «ударной волны» в зависимости от «узких мест» железнодорожного участка, к которым относятся уклоны, резкое снижение скорости следующего впереди поезда, наличие однопутных перегонов и др. [33].

На основе анализа литературных источников нами определены препятствия на пути к устранению «волнового эффекта» и возможные способы их преодоления (табл. 1).

**ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТЬ И СТРУКТУРА СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПО РАЗВИТИЮ ИНТЕРВАЛЬНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ ПЕЗДОВ НА ОДНОПУТНЫХ ЛИНИЯХ**

При оценке эффективности ИРДП следует учитывать, что уплотнение поездопотока по причине «волнового эффекта» может усугубить цепную реакцию, способную затронуть несколько диспетчерских участков и привести к отставлению грузовых поездов от движения, отмене захода локомотивов на ПТОЛ, ограничению передачи по междорожным стыкам, отмене «кокон», работе локомотивных бригад за пределами нормальной продолжительности рабочего времени [34].

Лидером по вопросам организации стабильного пропуска поездопотоков с учетом особенностей работы станций и перегонов в отечественной науке является ВНИИЖТ. Так, в [35, 36] предложена динамическая модель, в которой взаимосвязаны число приемо-отправочных путей в парках технических станций, время занятости путей под обработку транзитных поездов и интервалы попутного следования. Модель позволяет оптимизировать соотношение времени занятости и числа приемо-отправочных путей, величины межпоездных интервалов и за счет этого увеличить участковую скорость.



**Рис. 2. Факторы, необходимые для оценки ИРДП на однопутных линиях**

В работах [37, 38] установлено, что участковая скорость снижается при увеличении плотности потока из-за сокращения межпоездного интервала и возрастающего влияния поездов друг на друга. Отмечено, что на участках, которые являются подходами к станциям стыкования локомотивных плеч, есть и другой фактор влияния — локомотивный комплекс. Предложен новый метод резервирования локомотивов на станциях стыкования постоянного и переменного тока, ориентированный на норматив участковой скорости.

В статье [39] рассмотрено в динамике взаимовлияние показателей основных элементов железнодорожных линий, а также получены аналитические зависимости, которые позволяют увязывать параметры, определяющие пропускную способность отдельных элементов участков при их взаимодействии. Сделан вывод о том, что повышение пропускной способности отдельных элементов линии без усиления элементов с наименьшей пропускной способностью не окажет существенного влияния на пропускную способность направления.

Исследования по этой тематике проводят и зарубежные специалисты. Так, в работе [40] выполнена оценка эффективности фиксированных, виртуальных (проектируемых внутри фиксированных) и подвижных блок-участков на двухпутной линии железных дорог США при варьировании объемов перевозок. На основе моделирования установлено, что до предела в 140 % от базового объема перевозок передовые СИРДП по сравнению с классической системой позволяют повысить среднюю скорость движения, а далее более плавно минимизировать ее потери, однако отмечено, что для их максимальной эффективности необходимо усиление диспетчерского контроля. При этом авторами обозначен ряд ограничений, снижающих достоверность полученных результатов: в модели не реализованы логика обгонов и симуляция операций на промежуточных станциях.

Важно отметить, что вопрос организации перевозок при движении пакетов из нескольких ВСЦ поездов (особенно пяти) на современном этапе исследован недостаточно. Первый аспект, требующий конкретизации, — это оценка влияния сбоев в работе цифровой связи при движении поездов. Второй — анализ условий, при которых движение в составе этого пакета возможно, так как на технической станции пять готовых к отправлению поездов накапливаются, как правило, в исключительных ситуациях (например, при проведении «окон»). На однопутных линиях подобный сценарий более реалистичен. Но он тоже требует детальной проработки, поскольку отечественные исследования в области ИРДП на особо грузонапряженных двухпутных линиях, несущих значительные потери в связи с высоким коэффициентом заполнения пропускной способности, более приоритетны и, как следствие, более активны.

Таким образом, среди множества решений по ИРДП следует отобрать то, которое обеспечит разумный баланс между потребной пропускной способностью и нормативом участковой скорости. В связи с этим требуется разработка системы поддержки принятия решений по развитию ИРДП, которая позволит оценить эффективность его вариантов при варьировании параметров линии, дополнит комплекс МСУ (разработанный НИИАС и используемый для моделирования ключевых станций и участков сети железных дорог ОАО «РЖД»), систему автоматизированного построения имитационных моделей железнодорожных станций и узлов (ИСТРА), систему построения суточного энергосберегающего графика движения поездов АПК ЭЛЬБРУС (АО «ВНИИЖТ»). Предлагаемая система специализирована для однопутных линий, учитывает все необходимые факторы (рис. 2), и в ее основе заложен алгоритм, предусматривающий поэтапное развитие ИРДП (рис. 3).

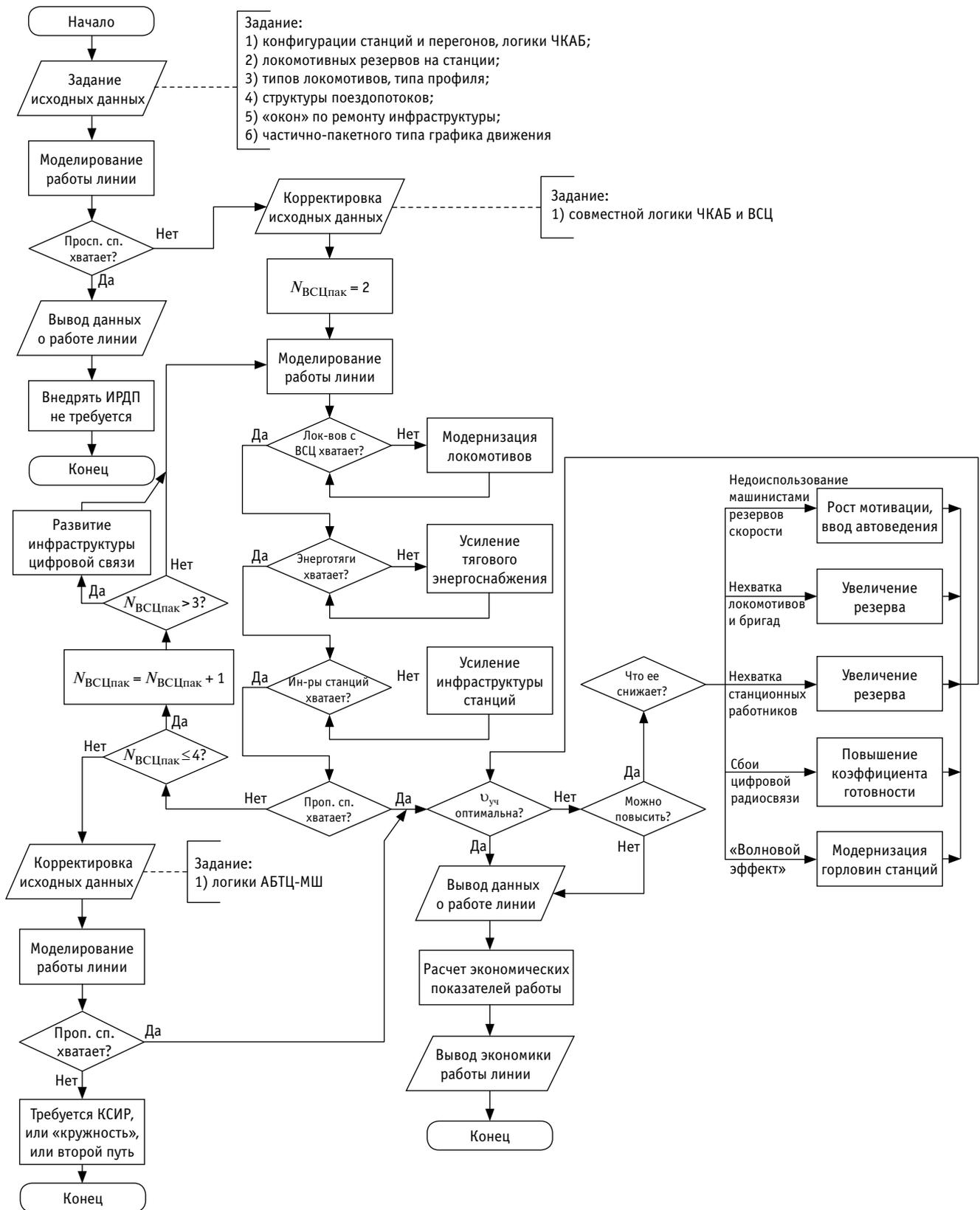


Рис. 3. Авторский алгоритм выбора ИРДП на однопутном участке

## Выводы

1. Проанализированы назначение, основные характеристики, степень внедрения на сети железных дорог передовых СИРДП (ВСЦ и ПБУ), рассмотрен мировой опыт по оценке их влияния на пропускную способность, обоснована обособленность развития ИРДП в ОАО «РЖД».

2. Исследованы проблемы внедрения ИРДП, представлены в форме диаграммы Исикавы. Выделены две основные группы проблем, препятствующих тиражированию СИРДП четвертого поколения: проблемы технического и проблемы технологического характера.

3. Проанализирован опыт мировых исследований по оценке возникновения, влияния на перевозочный процесс и способам купирования «волнового эффекта», образующегося при уплотнении поездопотоков посредством СИРДП.

4. Установлено, что внедрение ИРДП без изменения технологии и инфраструктуры железных дорог способно усугубить

парализующую поездопоток цепную реакцию, порождаемую «волновым эффектом», дефицитом локомотивов, локомотивных бригад и станционных работников, а также ограничениями энергоснабжения.

5. Определены направления дальнейших исследований эффективности ИРДП: моделирование всех возможных режимов работы конкретных участков и станций в условиях работы различных СИРДП; анализ пропускной способности при сбоях в цифровой радиосвязи пакетов ВСЦ поездов; разработка решений, ориентированных на бесшовность перевозочного процесса; корректировка документации по результатам оценки пропускной способности при ИРДП; оценка эффективности ИРДП на однопутных линиях.

6. Сформулированы требования и предложена структура системы поддержки принятия решений при внедрении ИРДП на однопутных линиях.

## Литература

1. Современные технологические и инновационные решения, направленные на увеличение пропускных и провозных способностей железнодорожных направлений / В. А. Воронин, П. В. Куренков, И. А. Солоп, Е. А. Чеботарева // Транспортные системы и технологии. 2021. Т. 7. № 2. С. 16–29. DOI: 10.17816/transsyst20217216-29. ISSN 2782-3733.
2. ГОСТ 34530–2019. Транспорт железнодорожный. Основные понятия. Термины и определения. Москва : Стандартинформ, 2019. 58 с.
3. Концепция внедрения на сети железных дорог комплексной технологии интервального регулирования движения поездов : распоряжение ОАО «РЖД» от 28.09.2020 г. № 2123/р.
4. Логистика интервального регулирования движения поездов / П. В. Куренков, А. А. Шатохин, Е. Н. Розенберг, С. А. Филипенко // Рынок транспортных услуг (проблемы повышения эффективности). 2020. № 1 (13). С. 130–139. ISSN 2225-6741.
5. Системы управления движением поездов на перегонах. Ч. 3. Функции, характеристики и параметры современных систем управления / В. И. Астрахан, П. Ф. Бестемьянов, А. Е. Ваньшин [и др.]. Москва : УМЦ ЖДТ, 2016. 176 с.
6. Охотников А. Л. Применение беспилотных технологий на рельсовом транспорте // Автоматика, связь, информатика. 2022. № 10. С. 24–27. ISSN 0005-2329.
7. Осипов Н. И. Определение факторов влияния внедряемых систем интервального регулирования движения поездов на пропуск транзитного поездопотока без переработки по железнодорожным направлениям со сменой родов тягового тока // Фундаментальные и прикладные вопросы транспорта. 2022. № 1 (4). С. 53–62. DOI: 10.52170/2712-9195/2022\_1\_53. ISSN 2712-9195.
8. Климова Е. В. Пропускная и провозная способность перегонов при реализации технологии «виртуальная сцепка» грузовых поездов // Вестник УрГУПС. 2020. № 3 (47). С. 53–64. DOI: 10.20291/2079-0392-2020-3-53-64. ISSN 2079-0392.
9. Пилипушка Л. Е., Рябов В. С., Климова Е. В. Основные аспекты технологии вождения соединенных тяжеловесных поездов

## References

1. Voronin V. A., Kurenkov P. V., Solop I. A., Chebotareva E. A. Modern technological and innovative solutions aimed at increasing the flow and transportation capacities of railway directions [Sovremennye tekhnologicheskie i innovatsionnye resheniya, napravlennye na uvelichenie propusknykh i provoznykh sposobnostey zheleznodorozhnykh napravleniy]. Modern Transportation Systems and Technologies. 2021. Vol. 7. No. 2. Pp. 16–29. DOI: 10.17816/transsyst20217216-29. ISSN 2782-3733.
2. GOST 34530–2019. Railway transport. General. Terms and definitions. [Transport zheleznodorozhnyy. Osnovnye ponyatiya. Terminy i opredeleniya]. Moscow, Standardinform, 2019. 58 p.
3. Concept implementation on the railroad network of integrated technology interval control of train traffic [Konceptsiya vnedreniya na seti zheleznnykh dorog kompleksnoy tekhnologii interval'nogo regulirovaniya dvizheniya poezdov]. The Order of JSC «RZD» dated 28.09.2020 No. 2123/r.
4. Kurenkov P. V., Shatokhin A. A., Rozenberg E. N., Filipchenko S. A. Logistics of interval train regulation [Logistika interval'nogo regulirovaniya dvizheniya poezdov]. Transport services market (problems of increasing efficiency). 2020. No. 1 (13). Pp. 130–139. ISSN 2225-6741.
5. Astrakhan V. I., Bestem'yanov P. F., Van'shin A. E. [et al.]. Train control systems on running lines. Part 3. Functions, characteristics and parameters of modern control systems [Sistemy upravleniya dvizheniem poezdov na peregonakh. Ch. 3. Funktsii, kharakteristiki i parametry sovremennykh sistem upravleniya]. Moscow, 2016. 176 p.
6. Okhotnikov A. L. Application of unmanned technologies on rail transport [Primenenie bespilotnykh tekhnologiy na rel'sovom transporte]. Automation, communication, informatics. 2022. No. 10. Pp. 24–27. ISSN 0005-2329.
7. Osipov N. I. Determination of the impact factors of the interval train control systems being implemented on the unprocessed transit train traffic on railway lines with a change in traction current types [Opredelenie faktorov vliyaniya vnedryaemykh sistem interval'nogo regulirovaniya dvizheniya poezdov na propusk tranzitnogo poezdopotoka bez pererabotki po zheleznodorozhnym napravleniyam so smenoy rodov tyagovogo toka]. Fundamental and applied transport issues. 2022. No. 1 (4). Pp. 53–62. DOI: 10.52170/2712-9195/2022\_1\_53. ISSN 2712-9195.
8. Klimova E. V. Carriage and traffic capacity of railway hauls in realization of «virtual coupling» technology of freight trains [Propusknaya i provoznaya sposobnost' peregonov pri realizatsii tekhnologii «virtual'naya stsepka» gruzovykh poezdov]. Herald of USURT. 2020. No. 3 (47). Pp. 53–64. DOI: 10.20291/2079-0392-2020-3-53-64. ISSN 2079-0392.

- // Наука. Технологии. Инновации : сборник научных трудов. Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2019. С. 261–264.
10. Климова Е. В., Пилипушка Л. Е., Рябов В. С. Технология «виртуальной сцепки» поездов как инструмент повышения провозной и пропускной способности линии // Транспортная инфраструктура Сибирского региона : материалы Десятой Международной научно-практической конференции. Иркутск : ИрГУПС, 2019. С. 60–64.
  11. Пилипушка Л. Е., Климова Е. В. Переход к интервальному регулированию движения поездов при бесветофорных системах для увеличения пропускной способности участка И–М // Наука и молодежь СГУПС в третьем тысячелетии : сборник научных статей аспирантов и аспирантов-стажеров. Новосибирск : СГУПС, 2021. С. 135–139.
  12. Klimova E., Pilipushka L. Impact of «Virtual Train Coupling» Technology on Railroad Performance // International Scientific Siberian Transport Forum TransSiberia-2021. 2022. Vol. 2. Pp. 197–205. DOI: 10.1007/978-3-030-96383-5\_22. ISSN 2367-3370.
  13. Diaz de Rivera A., Dick C. T., Evans L. E. Improving Railway Operational Efficiency with Moving Blocks, Train Fleeting, and Alternative Single-Track Configurations // Transportation Research: Journal of the Transportation Research Board. 2020. Vol. 2674. Issue 2. Pp. 146–157. DOI: 10.1177/0361198120905842. ISSN 0361-1981.
  14. Relative Capacity and Performance of Fixed- and Moving-Block Control Systems on North American Freight Railway Lines and Shared Passenger Corridors / C. T. Dick, D. Mussanov, L. E. Evans [et al.] // Transportation Research: Journal of the Transportation Research Board. 2019. Vol. 2673. Issue 5. Pp. 250–261. DOI: 10.1177/0361198119841852. ISSN 0361-1981.
  15. Sogin S. L. Simulations of Mixed Use Rail Corridors: How Infrastructure Affects Interactions among Train Types. Master's Thesis. Urbana, 2013. 193 p.
  16. Diaz de Rivera A., Dick C. T., Parkes M. M. Balancing the Service Benefits and Mainline Delay Disbenefits of Operating Shorter Freight Trains // Transportation Research: Journal of the Transportation Research Board. 2021. Vol. 2675. Issue 10. Pp. 303–316. DOI: 10.1177/03611981211011484. ISSN 0361-1981.
  17. A hybrid Delphi-AHP multi-criteria analysis of Moving Block and Virtual Coupling railway signalling / J. Aoun, E. Quaglietta, R. M. P. Goverde, M. Scheidt // Transportation Research. Part C: Emerging Technologies. 2021. Vol. 129. Issue 8. Pp. 1–22. DOI: 10.1016/j.trc.2021.103250. ISSN 0968-090X.
  18. Ketphat N., Whiteing A., Liu R. State Movement for Controlling Trains Operating under The Virtual Coupling System // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part F. Journal of Rail and Rapid Transit. 2021. Vol. 236. Issue 2. Pp. 172–182. DOI: 10.1177/09544097211043747. ISSN 0954-4097.
  19. Розенберг Е. Н., Озеров А. В., Панферов И. А. Комплексный подход к решению задачи повышения пропускной способности // Автоматика, связь, информатика. 2022. № 8. С. 2–6. DOI: 10.34649/AT.2022.8.8.001. ISSN 0005-2329.
  20. Розенберг Е. Н. Основные направления развития МПСУ // Автоматика и телемеханика на железнодорожном транспорте : сборник докладов Девятой Международной научно-практической конференции «ТрансЖАТ-2018». Ростов-на-Дону : РГУПС, 2018. С. 13–22.
  21. Розенберг Е. Н. Реализация технологии интервального регулирования движения поездов // Материалы Первого между-
  9. Pilipushka L. E., Ryabov V. S., Klimova E. V. Basic aspects of the technology of driving combined heavy trains [Osnovnye aspekty tekhnologii vozheniya soedinennykh tyazhelovesnykh poezdov]. Science. Technology. Innovations. Collection of scientific works. Novosibirsk, NSTU, 2019. Pp. 261–264.
  10. Klimova E. V., Pilipushka L. E., Ryabov V. S. Technology of «virtual coupling» of trains as a tool to increase carrying and throughput capacity of line [Tekhnologiya «virtual'noy stsepki» poezdov kak instrument povysheniya provoznoy i propusknoy sposobnosti linii]. Transport Infrastructure of the Siberian Region. Proceedings of the 10th International scientific and practical conference. Irkutsk, ISTU, 2019. Pp. 60–64.
  11. Pilipushka L. E., Klimova E. V. Transition to Interval Regulation of Train Traffic with Traffic-Free Systems to Increase the Throughput of the I–M Section [Perekhod k interval'nomu regulirovaniyu dvizheniya poezdov pri bessvetofornykh sistemakh dlya uvelicheniya propusknoy sposobnosti uchastka I–M]. Science and Youth of STU in the Third Millennium. Collection of scientific papers of postgraduate students and postgraduate interns. Novosibirsk, STU, 2021. Pp. 135–139.
  12. Klimova E., Pilipushka L. Impact of «Virtual Train Coupling» Technology on Railroad Performance. International Scientific Siberian Transport Forum TransSiberia-2021. 2022. Vol. 2. Pp. 197–205. DOI: 10.1007/978-3-030-96383-5\_22. ISSN 2367-3370.
  13. Diaz de Rivera A., Dick C. T., Evans L. E. Improving Railway Operational Efficiency with Moving Blocks, Train Fleeting, and Alternative Single-Track Configurations. Transportation Research. Journal of the Transportation Research Board. 2020. Vol. 2674. Issue 2. Pp. 146–157. DOI: 10.1177/0361198120905842. ISSN 0361-1981.
  14. Dick C. T., Mussanov D., Evans L. E. [et al.]. Relative Capacity and Performance of Fixed- and Moving-Block Control Systems on North American Freight Railway Lines and Shared Passenger Corridors. Transportation Research. Journal of the Transportation Research Board. 2019. Vol. 2673. Issue 5. Pp. 250–261. DOI: 10.1177/0361198119841852. ISSN 0361-1981.
  15. Sogin S. L. Simulations of Mixed Use Rail Corridors: How Infrastructure Affects Interactions among Train Types. Master's Thesis. Urbana, 2013. 193 p.
  16. Diaz de Rivera A., Dick C. T., Parkes M. M. Balancing the Service Benefits and Mainline Delay Disbenefits of Operating Shorter Freight Trains. Transportation Research: Journal of the Transportation Research Board. 2021. Vol. 2675. Issue 10. Pp. 303–316. DOI: 10.1177/03611981211011484. ISSN 0361-1981.
  17. Aoun J., Quaglietta E., Goverde R. M. P., Scheidt M. A hybrid Delphi-AHP multi-criteria analysis of Moving Block and Virtual Coupling railway signalling. Transportation Research. Part C. Emerging Technologies. 2021. Vol. 129. Issue 8. Pp. 1–22. DOI: 10.1016/j.trc.2021.103250. ISSN 0968-090X.
  18. Ketphat N., Whiteing A., Liu R. State Movement for Controlling Trains Operating under The Virtual Coupling System. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part F. Journal of Rail and Rapid Transit. 2021. Vol. 236. Issue 2. Pp. 172–182. DOI: 10.1177/09544097211043747. ISSN 0954-4097.
  19. Rozenberg E. N., Ozerov A. V., Panferov I. A. Integrated approach to increase railway capacity [Kompleksnyy podkhod k resheniyu zadachi povysheniya propusknoy sposobnosti]. Automation, communication, informatics. 2022. No. 8. Pp. 2–6. DOI: 10.34649/AT.2022.8.8.001. ISSN 0005-2329.
  20. Rozenberg E. N. Main directions of MBCS development [Osnovnye napravleniya razvitiya MPSU]. Automatics and telemechanics on the railway transport. Collection of reports of the 9th international research and practice conference «TransZhAT-2018». Rostov-on-Don, RSTU, 2018. Pp. 13–22.
  21. Rozenberg E. N. Implementation of interval train control technology [Realizatsiya tekhnologii interval'nogo regulirovaniya dvizheniya poezdov]. Proceedings of the 1st International railway show of equipment and technology «PRO//Movement.Expo», Moscow, August 28–31, 2019. URL: <https://railwayexpo.ru/ru/arkhiv/2019>.
  22. Bushuev S. V., Gundyrev K. V., Golochalov N. S. Increasing the capacity of the railway section with the use of virtual coupling technology [Povy-

народного железнодорожного салона техники и технологий «PRO//Движение.Экспо», Москва, 28–31 августа 2019 г. URL: <https://railwayexpo.ru/ru/arkhiv/2019>.

22. Бушуев С. В., Гундырев К. В., Голочалов Н. С. Повышение пропускной способности участка железной дороги с применением технологии виртуальной сцепки // Автоматика на транспорте. 2021. Т. 7. № 1. С. 7–20. DOI: 10.20295/2412-9186-2021-7-1-7-20. ISSN 2412-9186.
23. Осипов Н. И. Определение факторов влияния внедряемых систем интервального регулирования движения поездов на работу локомотивного хозяйства на железнодорожных направлениях со сменой родов тягового тока // Железная дорога: путь в будущее : сборник материалов I Международной научной конференции аспирантов и молодых ученых. Москва : ВНИИЖТ, 2022. С. 327–331.
24. Маслюков В. Г., Голиков А. Ф. Интеллектуальная система автоматизированного вождения поездов повышенной массы и длины с распределенными по длине локомотивами грузового движения «Виртуальная сцепка» на участке Карымская — Хабаровск // Образование — наука — производство : материалы III Всероссийской научно-практической конференции. Чита : ЗаБИЖТ, 2019. С. 51–61.
25. Использование пропускной способности станций при интервальном регулировании движения поездов / А. Ф. Бородин, Г. Г. Горбунов, А. Ю. Соколов, А. Е. Смирнов [и др.] // Железнодорожный транспорт. 2021. № 2. С. 29–36. ISSN 0044-4448.
26. Капустин Н. И., Капустина Е. П., Потрахов С. Д. Интервальное регулирование движения поездов на полигонах сети железных дорог // Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте. Компьютерное и математическое моделирование (ИСУЖТ-2019) : труды Восьмой научно-технической конференции, Москва, 21 ноября 2019 г. Москва : АО «НИИАС», 2019. С. 70–74.
27. Батраев В. В. Повышение эффективности использования пропускной способности железнодорожных линий : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва, 2021. 263 с.
28. Розенберг Е. Н., Абрамов А. А., Батраев В. В. Интервальное регулирование движения поездов // Железнодорожный транспорт. 2017. № 9. С. 19–24. ISSN 0044-4448.
29. Осипов Н. И. Имитационное моделирование движения поезда по перегону с применением тяговых расчетов // Вестник УрГУПС. 2023. № 1 (57). С. 99–107. DOI: 10.20291/2079-0392-2023-1-99-107. ISSN 2079-0392.
30. Управление потоком поездов на основе интеллектуализации локомотива и цифровой радиосвязи : отчет о НИР / УрГУПС : рук. Бушуев С. В. Екатеринбург, 2020. № гос. регистрации АААА-А20-120042190034-0.
31. Бушуев С. В., Голочалов Н. С. Анализ способов повышения пропускной способности железных дорог // Транспорт Урала. 2023. № 1 (76). С. 42–50. DOI: 10.20291/1815-9400-2023-1-42-50. ISSN 1815-9400.
32. Бушуев С. В. Пути повышения провозной способности участков железных дорог // Автоматика на транспорте. 2022. Т. 8. № 4. С. 343–353. DOI: 10.20295/2412-9186-2022-8-04-343-353. ISSN 2412-9186.
33. Diaz de Rivera A., Dick C. T. Illustrating the implications of moving blocks on railway traffic flow behavior with fundamental diagrams // Transportation Research. Part C: Emerging Technologies. 2021. Vol. 123. Issue 7. Pp. 1–19. DOI: 10.1016/j.trc.2021.102982. ISSN 0968-090X.
34. Diaz de Rivera A., Dick C. T. Illustrating the implications of moving blocks on railway traffic flow behavior with fundamental diagrams. Transportation Research. Part C: Emerging Technologies. 2021. Vol. 123. Issue 7. Pp. 1–19. DOI: 10.1016/j.trc.2021.102982. ISSN 0968-090X.
35. shenie propusknoy sposobnosti uchastka zheleznoy dorogi s primeneni-em tekhnologii virtual'noy stseпки]. Automation on Transport. 2021. Vol. 7. No. 1. Pp. 7–20. DOI: 10.20295/2412-9186-2021-7-1-7-20. ISSN 2412-9186.
23. Osipov N. I. Determination of the impact factors of the interval traffic regulation systems on locomotive facilities performance on railway lines with a change in traction current types [Opredelenie faktorov vliyaniya vnedryaemykh sistem interval'nogo regulirovaniya dvizheniya poezdov na rabotu lokomotivnogo hozyaystva na zheleznodorozhnykh napravleniyakh so smenoy rodov tyagovogo toka]. Railway: the way to the future. Proceedings of the 1st International scientific conference of postgraduate students and young scientists. Moscow, VNIIZhT, 2022. Pp. 327–331.
24. Maslyukov V. G., Golikov A. F. Intelligent system of automated driving of trains of increased mass and length with cargo locomotives distributed by length «Virtual Coupling» on the Karymskaya — Khabarovsk section [Intellektual'naya sistema avtomatizirovannogo vozhdeniya poezdov povyshennoy massy i dliny s raspredelennymi po dline lokomotivami gruzovogo dvizheniya «Virtual'naya stseпка» na uchastke Karymskaya – Khabarovsk]. Education — science — production. Proceedings of the 3rd All-Russian research and practice conference. Chita, ZabIZhT, 2019. Pp. 51–61.
25. Borodin A. F., Gorbunov G. G., Sokolov A. Yu., Smirnov A. E. [et al.]. Utilization of traffic capacity of stations at interval control of train movement [Ispol'zovanie propusknoy sposobnosti stantsiy pri interval'nom regulirovanii dvizheniya poezdov]. Railway Transport. 2021. No. 2. Pp. 29–36. ISSN 0044-4448.
26. Kapustin N. I., Kapustina E. P., Potrakhov S. D. Interval control of train movement on railway polygons [Interval'noe regulirovanie dvizheniya poezdov na poligonakh seti zheleznykh dorog]. Intelligent control systems on railway transport. Computer and mathematical modeling (ISUZhT-2019). Proceedings of the 8th scientific and technical conference, Moscow, November 21, 2019. Pp. 70–74.
27. Batraev V. V. Increasing the efficiency of railway line capacity utilization [Povyshenie effektivnosti ispol'zovaniya propusknoy sposobnosti zheleznodorozhnykh liniy]. PhD in Engineering Thesis. Moscow, 2021. 263 p.
28. Rozenberg E. N., Abramov A. A., Batraev V. V. Interval train control [Interval'noe regulirovanie dvizheniya poezdov]. Railway Transport. 2017. No. 9. Pp. 19–24. ISSN 0044-4448.
29. Osipov N. I. Simulation of train movement along the running line using traction calculations [Imitatsionnoe modelirovanie dvizheniya poezda po peregonu s primeneniem tyagovykh raschetov]. Herald of USURT. 2023. No. 1 (57). Pp. 99–107. DOI: 10.20291/2079-0392-2023-1-99-107. ISSN 2079-0392.
30. Control of train traffic on the basis of intellectualization of a locomotive and digital radio communications [Upravlenie potokom poezdov na osnove intellektualizatsii lokomotiva i tsifrovoy radiosvyazi]. Report on research. USURT. Project chairman Bushuev S. V. Ekaterinburg, 2020. State registration No. АААА-А20-120042190034-0.
31. Bushuev S. V., Golochalov N. S. Analysis of ways to increase traffic capacity of railways [Analiz sposobov povysheniya propusknoy sposobnosti zheleznykh dorog]. Transport of the Urals. 2023. No. 1 (76). Pp. 42–50. DOI: 10.20291/1815-9400-2023-1-42-50. ISSN 1815-9400.
32. Bushuev S. V. Ways to increase the carrying capacity of railway sections [Puti povysheniya provoznoy sposobnosti uchastkov zheleznykh dorog]. Automation on Transport. 2022. Vol. 8. No. 4. Pp. 343–353. DOI: 10.20295/2412-9186-2022-8-04-343-353. ISSN 2412-9186.
33. Diaz de Rivera A., Dick C. T. Illustrating the implications of moving blocks on railway traffic flow behavior with fundamental diagrams. Transportation Research. Part C: Emerging Technologies. 2021. Vol. 123. Issue 7. Pp. 1–19. DOI: 10.1016/j.trc.2021.102982. ISSN 0968-090X.
34. Mekhedov M. I., Muginshteyn L. A. On problems of organization of service and efficiency of utilization of traffic capacities of stations [O problemakh organizatsii dvizheniya i effektivnosti ispol'zovaniya propusknykh sposobnostey stantsiy]. Railway Transport. 2015. No. 7. Pp. 20–27. ISSN 0044-4448.

2021. Vol. 123. Issue 7. Pp. 1–19. DOI: 10.1016/j.trc.2021.102982. ISSN 0968-090X.
34. Мехедов М. И., Мугинштейн Л. А. О проблемах организации движения и эффективности использования пропускных способностей станций // Железнодорожный транспорт. 2015. № 7. С. 20–27. ISSN 0044-4448.
  35. Мугинштейн Л. А., Мехедов М. И. Вопросы организации стабильного пропуска транзитных грузовых поездов на направлениях железных дорог с учетом технических и технологических особенностей работы технических станций и перегонов // Вестник ВНИИЖТ. 2016. Т. 75. № 1. С. 3–11. ISSN 2223-9731.
  36. Мугинштейн Л. А., Мехедов М. И. Методические подходы к выявлению факторов, влияющих на стабильность пропуска поездопотоков // Вестник ВНИИЖТ. 2014. № 2. С. 24–33. ISSN 2223-9731.
  37. Мехедов М. И. Повышение эффективности управления и использования локомотивного парка в условиях насыщения пропускных способностей // Проблемы проектирования и строительства железных дорог : межвузовский сборник научных трудов. Хабаровск : ДВГУПС, 2011. С. 138–150.
  38. Мехедов М. И., Корниенко Н. В., Ададунов А. С. Зависимость участковой скорости от обеспеченности транзитных поездов локомотивами на железнодорожном участке Кошта — Бабаево // Вестник ВНИИЖТ. 2023. Т. 82. № 1. С. 80–88. DOI: 10.21780/2223-9731-2023-82-1-80-88. ISSN: 2223-9731.
  39. Мехедов М. И., Мугинштейн Л. А. О процессе взаимодействия технических станций и перегонов при пропуске поездопотоков // Вестник ВНИИЖТ. 2020. Т. 79. № 2. С. 59–65. DOI: <http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2020-79-2-59-65>. ISSN 2223-9731.
  40. Roscoe G., Dick C. T. Evaluating Fixed, Virtual, and Moving Block Control Systems on a Double Track North American Freight Rail Corridor // International Journal of Transport Development and Integration. 2022. Vol. 6. Issue 3. Pp. 271–282. DOI: 10.2495/TDI-V6-N3-271-282. ISSN 2058-8313.
  35. Muginshtein L. A., Mekhedov M. I. Issues of organization of stable passage of transit freight trains on the railway lines in accordance with technical and technological features of operation of technical stations and running sections [Voprosy organizatsii stabil'nogo propuska tranzitnykh gruzovykh poezdov na napravleniyakh zheleznykh dorog s uchetom tekhnicheskikh i tekhnologicheskikh osobennostey raboty tekhnicheskikh stantsiy i peregonov]. Russian Railway Science Journal. 2016. Vol. 75. No. 1. Pp. 3–11. ISSN 2223-9731.
  36. Muginshtein L. A., Mekhedov M. I. Methodological approaches to revelation of factors influencing the stability of train flow handling [Metodicheskie podkhody k vyyavleniyu faktorov, vliyayushhikh na stabil'nost' propuska poezdopotokov]. Russian Railway Science Journal. 2014. No. 2. Pp. 24–33. ISSN 2223-9731.
  37. Mekhedov M. I. Improving the efficiency of management and use of the locomotive fleet under conditions of saturation of carrying capacity [Povyshenie effektivnosti upravleniya i ispol'zovaniya lokomotivnogo parka v usloviyakh nasyshheniya propusknykh sposobnostey]. Challenges in railway design and construction. Inter-university collection of scientific papers. Khabarovsk, FESTU, 2011. Pp. 138–150.
  38. Mekhedov M. I., Kornienko N. V., Adadurov A. S. Dependence of the service speed on the provision of transit trains with locomotives on the Koshta — Babaev railway section [Zavisimost' uchastkovoy skorosti ot obespechennosti tranzitnykh poezdov lokomotivami na zheleznodorozhnom uchastke Koshta — Babaevo]. Russian Railway Science Journal. 2023. Vol. 82. No. 1. Pp. 80–88. DOI: 10.21780/2223-9731-2023-82-1-80-88. ISSN 2223-9731.
  39. Mekhedov M. I., Muginshtein L. A. On the process of interaction of technical stations and hauls when passing train flows [O protsesse vzaimodeystviya tekhnicheskikh stantsiy i peregonov pri propuske poezdopotokov]. Russian Railway Science Journal. 2020. Vol. 79. No. 2. Pp. 59–65. DOI: <http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2020-79-2-59-65>. ISSN 2223-9731.
  40. Roscoe G., Dick C. T. Evaluating Fixed, Virtual, and Moving Block Control Systems on a Double Track North American Freight Rail Corridor. International Journal of Transport Development and Integration. 2022. Vol. 6. Issue 3. Pp. 271–282. DOI: 10.2495/TDI-V6-N3-271-282. ISSN 2058-8313.

Объем статьи 1,5 авторских листа

УДК 656.021.8

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

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

## ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ПОВЫШЕНИЯ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ СТАНЦИИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИИ ВИРТУАЛЬНОЙ СЦЕПКИ

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

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

### Technical solutions for increasing the station capacity using virtual coupling technology

#### Аннотация

Обоснована необходимость разработки технических решений, которые позволят выполнять попутное отправление поездов в виртуальной сцепке с интервалом времени, меньшим, чем существующий расчетный интервал, при трехблочном разграничении поездов. Описан особый режим работы станции при попутном отправлении поездов в виртуальной сцепке. Представлены методика расстановки дополнительных светофоров, алгоритм их работы, а также алгоритм кодирования маршрута отправления. Разработанные технические решения могут применяться для перспективного расширения функционала электрической централизации.

**Ключевые слова:** пропускная способность, виртуальная сцепка, электрическая централизация, автоматическая блокировка, интервал попутного отправления

#### Abstract

The necessity of developing technical solutions that will allow trains to travel in virtual coupling with a time interval less than the existing calculated interval, with three-block separation of trains, is justified. A special mode of operation of the station is described for passing train departure in virtual coupling. The method of placing additional traffic lights, the algorithm of their operation, as well as the algorithm for coding the departure route are presented. The developed technical solutions can be used for the prospective expansion of electrical centralization functionality.

**Keywords:** capacity, virtual coupling, electrical centralization, automatic blocking, interval of passing departure

DOI: 10.20291/1815-9400-2023-3-46-55

#### ВВЕДЕНИЕ

Сокращение дистанции между поездами в пути следования является перспективным способом повышения пропускных способностей участков. Этому способствует развитие современных локомотивных систем безопасности движения. Вместе с тем существующие станционные интервалы попутного отправления и места установки проходных светофоров автоблокировок рассчитываются исходя из необходимости обеспечивать движение поездов по сигналам трехзначной автоблокировки с трехблочным интервалом разграничения. При исправном оборудовании и отсутствии технологических задержек такое разграничение позволяет поездам двигаться с установленной скоростью на зеленые сигналы проходных светофоров. Можно сказать, что движение поездов с трехблочным разграничением с установленной максимальной скоростью происходит при наличии трехкратного запаса по тормозному пути. Уменьшение этого запаса не предусматривается ни существующими нормативными документами, ни, как следствие, графиками движения поездов. Однако уже сегодня существуют железнодорожные системы автоматики и телемеханики, которые дают возможность поездам ехать друг к другу ближе, чем при классическом трехблочном разграничении движения, без потери скорости.

В полной мере использовать обозначенные запасы позволят координатная система интервального регулирования [1, 2] и/или технология автоведения по стандарту GoA4 [3], в значительной степени — автоблокировка с подвижным блок-участком [4, 5]. Но эти решения требуют кардинальной замены всех систем автоматики на участке железной дороги, что нецелесообразно без значительного увеличения интенсивности пассажирского движения. Частично использовать обозначенные запасы и тем самым обеспечить потребность в росте объема грузовых перевозок в большинстве случаев позволит технология виртуальной сцепки — за счет перехода к двухблочному разграничению при движении по участкам с трехзначной автоблокировкой [6].



Виртуальная сцепка поездов (ВСЦ) — технология, при которой два и более попутно следующих поезда связаны по радиоканалу, между локомотивами производится обмен информацией о параметрах движения, на основании чего система автоведения строит кривую допустимой скорости движения. При этом впередиидущий поезд называют ведущим, а следующий за ним — ведомым [7].

На данный момент технология виртуальной сцепки позволяет сблизить поезда при движении по перегону с установленной скоростью до двух блок-участков, т.е. использовать ранее недоступные резервы пропускной способности. При этом для повышения пропускной способности участка необходимо сближение поездов уже на этапе отправления со станции — за счет сокращения интервала попутного отправления. На рис. 1 представлена смоделированная ситуация попутного отправления поездов в виртуальной сцепке с интервалом 8 мин, последующего сближения поездов на перегоне и отправления с интервалом 5 мин. Сближение на перегоне достигается за счет замедления хода ведущего поезда. Такой подход позволяет получить между двумя поездами интервал, соответствующий двухблочному разграничению движения, но при этом снижается техническая скорость и не образуется новых ниток в графике движения поездов. Для увеличения показателей пропускной способности за счет использования технологии виртуальной сцепки потребуется сокращение интервала попутного отправления.

Отдельное внимание следует уделить проблеме безопасности при отказе системы автоведения (виртуальной сцепки) в процессе отправления с уменьшенным межпоездным интервалом. Дело в том, что при движении по перегону с двухблочным разграничением цепочка резервирования функции безопасности уже существует: система автоведения — система

локомотивной безопасности (САУТ, КЛУБ, БЛОК) — машинист и проходные светофоры автоблокировки. В то же время существующие системы автоматики, запрограммированные для обеспечения движения поездов с трехблочным разграничением, не позволят отправить ведомый поезд с требуемым интервалом. Поэтому необходимо разработать технологические решения по отправлению ВСЦ поездов при интервале попутного отправления, уменьшенном относительно запрограммированного на участке, на основании которых будут определены и реализованы требования к техническим решениям систем электрической централизации (ЭЦ) и автоматической блокировки.

Предварительно по кривым скорости расчетных поездов в виртуальной сцепке необходимо определить момент выхода поездов на движение с заданным межпоездным интервалом, тем самым оценить эффективность существующих тяговых возможностей реализации заданного межпоездного интервала, а также целесообразность будущих изменений систем автоматики.

### ТЕХНОЛОГИЯ ОТПРАВЛЕНИЯ ПЕЗДОВ В ВИРТУАЛЬНОЙ СЦЕПКЕ

Перед отправлением поездов по технологии виртуальной сцепки между локомотивами устанавливается связь по радиоканалу и в соответствии с регламентом ВСЦ настраивается локомотивное оборудование. Далее происходит отправление ведущего поезда в режиме автоведения также согласно общепринятому порядку отправления на станции. Принципиальные отличия возникают при отправлении ведомого (ведомых) поезда (поездов). Для обеспечения требуемого интервала важны точность момента отправления и соблюдение ведомым поездом расчетной кривой скорости, что может быть реализовано только в режиме автоведения.

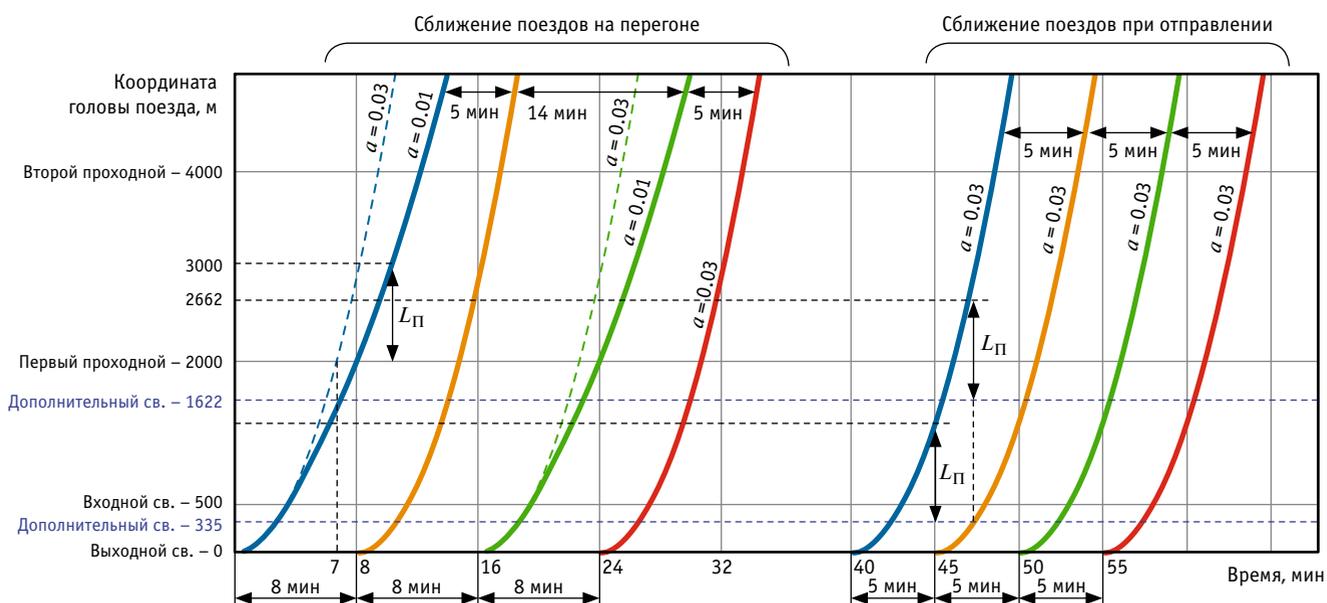


Рис. 1. Сближение поездов за счет применения технологии виртуальной сцепки:

$a$  — ускорение разгона поезда,  $m/c^2$ ;  $L_{п}$  — длина поезда, м

Из-за недостаточного ускорения разгона грузовых поездов отправление ведомого поезда будет происходить в момент времени, когда хвост ведущего поезда еще находится на станции. Поэтому системы автоматики не должны препятствовать набору скорости ведомым поездом, но должны по-прежнему обеспечивать достаточный для торможения безопасный интервал между ВСЦ поездами и автоматическое торможение ведомого поезда в случае нештатных ситуаций. Это невозможно без пересмотра технических решений станционной системы автоматики и алгоритмов установки и кодирования маршрута отправления. Важно обеспечить передачу на ведомый локомотив кодов АЛС, позволяющих выполнять набор скорости в случае исправной работы устройств, а также передачу кода «КЖ», требующего от машиниста выполнения полной остановки в случае возникновения нештатной ситуации (отказ напольных устройств или системы автоведения). Однако при отказе или сбое систем виртуальной сцепки машинисту ведомого поезда неочевидна точка остановки, поэтому возникает необходимость предусмотреть установку дополнительных светофоров. Количество и места установки дополнительных светофоров определяются для заданного межпоездного интервала конкретного участка. Причем если по результатам расчетов требуется более двух дополнительных светофоров, то предлагается рассматривать вариант изменения всей системы автоблокировки на перегоне, поскольку это означает, что поезда заданного веса и длины не могут выйти на движение с двухблочным разграничением достаточно быстро (в начале перегона).

Важно, чтобы работа дополнительных светофоров не оказывала влияния на безопасность движения поездов, не использующих технологию виртуальной сцепки.

Решением обозначенных вопросов может стать специальный режим работы ЭЦ станции «отправление поездов в виртуальной сцепке». При его активации устройства автоматики и телемеханики на станции и участках удаления будут функционировать по специальным алгоритмам, учитывающим особенности работы с поездами, отправляющимися в виртуальной сцепке, до тех пор, пока поезда в виртуальной сцепке не покинут переоборудованные под отправление ВСЦ поездов участки удаления.

### **СПЕЦИАЛЬНЫЙ РЕЖИМ РАБОТЫ СТАНЦИИ «ОТПРАВЛЕНИЕ ПОЕЗДОВ В ВИРТУАЛЬНОЙ СЦЕПКЕ»**

Включение режима должно осуществляться по первому классу надежности с проверкой таких условий, как отсутствие маршрутов приема или сквозного пропуска, наличие двух и более поездов на приемо-отправочных путях. После доклада машинистов о готовности к отправлению в режиме ВСЦ дежурный по станции включает специальный режим ЭЦ и задает несколько маршрутов отправления в требуемой последовательности, которые накапливаются системой ЭЦ и начинают последовательно реализовываться по мере отправления ВСЦ поездов. До завершения реализации всех накопленных маршрутов возможность установки новых враждебных маршрутов должна быть исключена. После реализации всех накопленных маршрутов специальный режим отменяется автоматически.

При этом маршруты отправления поездов заканчиваются у последнего дополнительного светофора. Часть путевых секций станут общими для всех маршрутов. Поэтому после установки маршрутов выходные светофоры открываются в той последовательности, в которой были заданы маршруты, по мере освобождения хвостом уходящего поезда общих секций пути, а дополнительные светофоры включаются сразу и работают в режиме двузначных проходных сигнальных точек автоблокировки. После открытия первого выходного светофора разрешается движение ведущего поезда только в режиме автоведения. Машинист ведущего поезда контролирует движение в режиме автоведения, руководствуясь показаниями локомотивного и проходных светофоров, работа которых при отправлении ведущего поезда не отличается от работы в обычном режиме. Отправление ведомых поездов происходит только в режиме автоведения, после выдержки заданного в алгоритмах автоведения ВСЦ интервала попутного отправления, соответствующего межпоездному интервалу в пакете ВСЦ поездов, при этом машинист контролирует движение поезда по сигналам локомотивных, дополнительных и проходных светофоров. Своевременное переключение дополнительных светофоров является для машиниста ведомого поезда еще одним источником информации о движении ведущего поезда. После реализации всех накопленных маршрутов специальный режим ЭЦ выключается, дополнительные светофоры гаснут.

По мере освобождения хвостом ведущего поезда путевых секций происходит перевод общих стрелок в маршрутах отправления ведущего и ведомого поездов и их замыкание в маршруте отправления ведомого поезда по принципу накопления маршрутов [8]. Применение данного метода позволяет сократить время подготовки маршрута и является необходимым, потому что отправление ведомого поезда происходит в момент, когда маршрут отправления ведущего поезда не разомкнулся до конца, так как хвост поезда еще находится на станции.

Поскольку в момент отправления хвост ведущего поезда находится на станции, потребуется также изменить принципы кодирования маршрута отправления ведомого поезда. Необходима реализация кодирования секций в маршруте отправления по принципу, схожему с применением подвижных блокучастков. При этом первая рельсовая цепь за хвостом ведущего поезда кодируется кодом «КЖ», а все последующие навстречу голове ведомого поезда кодируются кодом «Ж». При таком подходе не требуется значительно увеличивать число дополнительных светофоров, функционирующих только в специальном режиме «отправление поездов в виртуальной сцепке», но следует удостовериться, что длин существующих участков достаточно, чтобы машинист ведомого поезда мог отреагировать на изменение кодирования и выполнить полную остановку поезда к дополнительному светофору в случае получения кода «КЖ» на локомотивном светофоре.

После того как хвост последнего ведомого поезда освободит участки удаления, специальный режим функционирования станции «отправление поездов в виртуальной сцепке» автоматически выключается, а схемы управления объектами автоматики возвращаются в исходное состояние.

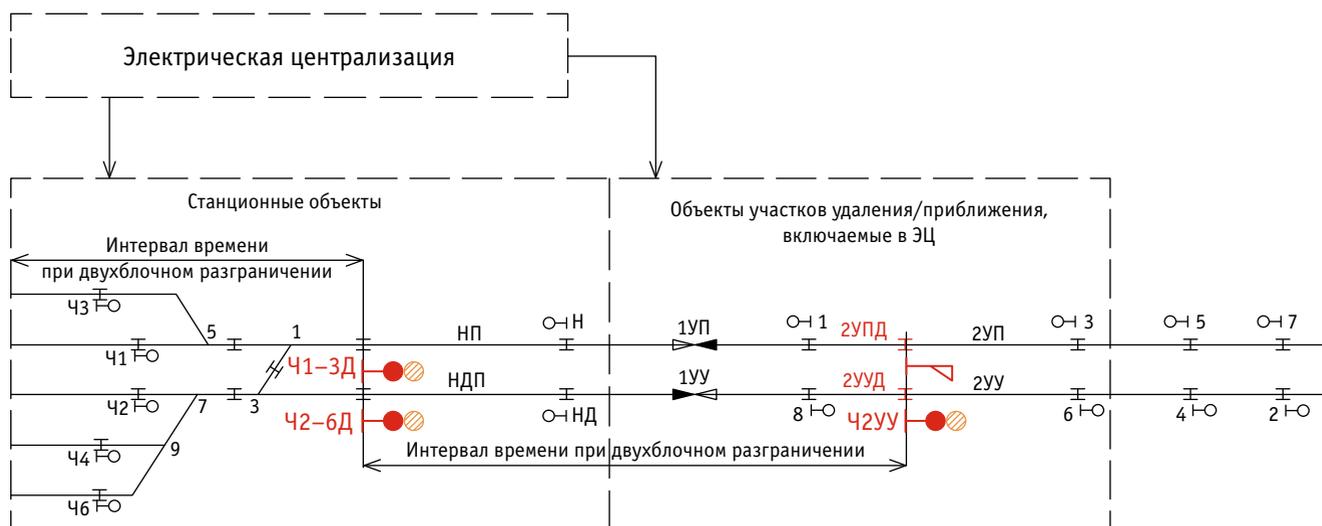


Рис. 2. Структурная схема предлагаемых технических решений

## ТЕХНИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

Исходя из рассмотренных принципов функционирования электрической централизации в режиме «отправление поездов в виртуальной сцепке» можно определить ее техническую структуру (рис. 2).

Новые дополнительные светофоры (Ч1–3Д, Ч2–6Д, Ч2УУ на рис. 2) устанавливаются по кривой скорости расчетного поезда с использованием интервалов времени для поездов с двухблочным разграничением движения. Точки установки таких дополнительных светофоров могут образовывать новые участки путей. Количество новых дополнительных светофоров зависит от динамических свойств расчетных поездов. Новые дополнительные светофоры требуется устанавливать до тех пор, пока между попутно следующими поездами в виртуальной сцепке не будут располагаться два свободных блок-участка (т.е. пока поезд не выйдут на движение с двухблочным разграничением). При этом, если для выхода поездов на движение с двухблочным разграничением недостаточно горловины станции и двух участков удаления, целесообразно рассмотреть вариант модернизации всей автоблокировки перегона. Например, оборудовать участок системой интервального регулирования с подвижными блок-участками.

На схеме рис. 2 показан пример установки одного дополнительного светофора в горловине станции (светофор Ч2–6Д) и одного на втором участке удаления (светофор Ч2УУ) для отправления поездов в виртуальной сцепке по правильному пути двухпутного перегона, а также одного дополнительного светофора в горловине станции (светофор Ч1–3Д) и знака «граница блок-участка» на втором участке удаления для отправления на неправильный путь двухпутного перегона.

Поскольку для ведомых поездов требуются специальный алгоритм кодирования секций и работа дополнительных светофоров, часть оборудования перегона предлагается включить в электрическую централизацию. На схеме рис. 2 показано включение в ЭЦ оборудования первого и второго участков удаления. То есть в данном примере принято, что ускорения

поездов ВСЦ достаточно, чтобы при достижении головной ведомого поезда светофора Ч2УУ расстояние до хвоста ведущего поезда было равно интервалу двухблочного разграничения движения поездов.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕСТ УСТАНОВКИ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ СВЕТОФОРОВ

Чтобы определить места установки дополнительных светофоров, необходимо модифицировать известную методику расстановки проходных сигналов по интервалам времени при проектировании автоблокировки [9].

Методика определения мест установки дополнительных светофоров сводится к следующему:

1) определяется наибольшее время хода по двум смежным блок-участкам существующего участка, на котором будет внедряться технология виртуальной сцепки. Полученное значение представляет собой временной интервал двухблочного разграничения поездов  $I_{2бл}$ ;

2) на кривой скорости расчетного поезда с помощью временных засечек откладывается полученный интервал времени  $I_{2бл}$ ;

3) от засечек в сторону станции откладывается половина длины расчетного поезда. Эти точки будут обозначать места установки дополнительных светофоров (первый светофор первой серии);

4) от точек установки светофоров в сторону станции откладывается половина длины расчетного поезда. Далее от этих точек снова откладывается полученный по пункту 2 интервал двухблочного разграничения. Затем повторяется пункт 3, полученные точки обозначают места установки дополнительных светофоров (второй светофор первой серии).

Расстановка дополнительных светофоров продолжается до той точки пути, в которой расстояние между поездами будет больше чем два свободных блок-участка существующей автоблокировки. Однако, как уже было отмечено, если возникает потребность в установке более двух дополнительных светофоров, то эффективность применения данных технических

решений вызывает сомнение — необходимо проверить рациональность выбора тяги (локомотива) для заданного веса поезда.

Установка дополнительных светофоров второй и третьей серий не требуется, так как безопасность движения обеспечивается автоведением технологии виртуальной сцепки, резервируемой специальным алгоритмом кодирования маршрутов отправления ведомых поездов.

Схематический пример расстановки дополнительных светофоров представлен на рис. 3а. Наибольшим временем движения по двум смежным блок-участкам (между проходными светофорами № 6 и № 2) стал интервал 6 мин, именно его и необходимо

использовать для определения мест установки дополнительных светофоров. Уменьшение данного интервала нецелесообразно, поскольку поезда начнут нагонять друг друга на перегоне. В данном примере, для того чтобы обеспечить безопасный разгон поездов в виртуальной сцепке и набор ими дистанции, соответствующей двухблочному разграничению движения поездов к концу второго участка удаления, достаточно установки двух дополнительных светофоров первой серии.

Возможен вариант расстановки дополнительных светофоров по тормозным путям расчетного поезда (светофор Ч2УУ на рис. 3б) [10].

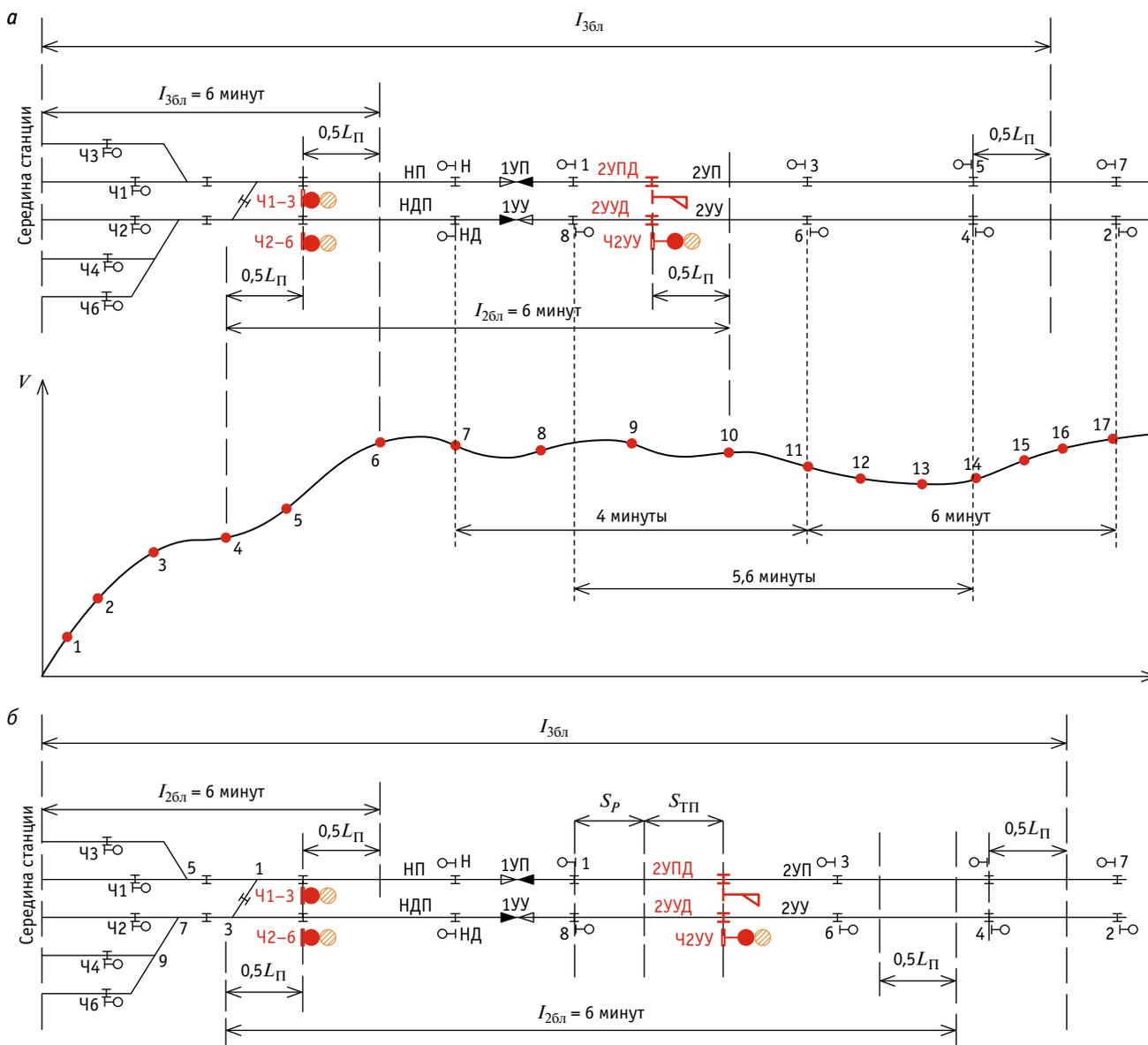


Рис. 3. Расстановка дополнительных светофоров:

а — установка первого и второго светофора I серии по интервалам времени; б — установка второго светофора I серии по тормозному пути;  $I_{3бл}$  — интервал времени при трехблочном разграничении поездов;  $I_{2бл}$  — интервал времени при двухблочном разграничении поездов в виртуальной сцепке;  $0,5L_{п}$  — половина длины поезда;  $S_p$  — пройденный путь поезда за время реакции машиниста и восприятия смены кодов на локомотиве;  $S_{ТП}$  — тормозной путь поезда

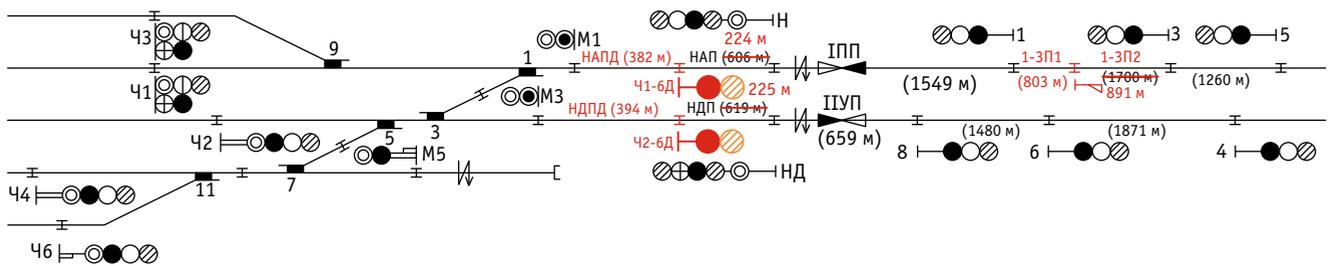


Рис. 4. Оборудование промежуточной станции дополнительными светофорами

После того как определены места установки дополнительных светофоров, необходимо произвести проверку того, что длин существующих и новых изолированных участков пути достаточно, чтобы отправляющийся со станции ведомый поезд мог выполнить торможение.

Принципы расстановки дополнительных светофоров на малых и участковых станциях будут одинаковыми, но из-за разницы в длине горловин возможны различные варианты установки дополнительных светофоров в створе с существующими поездными или маневровыми светофорами.

На рис. 4 представлена часть схематического плана реальной станции, на которой предложено применение дополнительных светофоров, установленных по описанной методике, для интервала попутного отправления (и интервала двухблочного разграничения), равно 6 мин. При отправлении на правильный путь перегона длины существующих изолированных участков пути таковы, что достаточно установки только одного дополнительного светофора (Ч2–6Д), чтобы отправляемые со станции ВСЦ поезда безопасно выходили на дистанцию при двухблочном разграничении к тому моменту, когда голова ведомого поезда достигнет ординаты установки дополнительного светофора в горловине станции (Ч2–6Д). При отправлении на неправильный путь перегона к моменту достижения головой ведомого поезда ординаты установки дополнительного светофора Ч1–6Д поезда не выходят на движение с двухблочным разграничением, поэтому требуется разделение существующего второго участка приближения на две рельсовых цепи. Точка разделения второго участка приближения определяется как точка установки дополнительного светофора. Поскольку

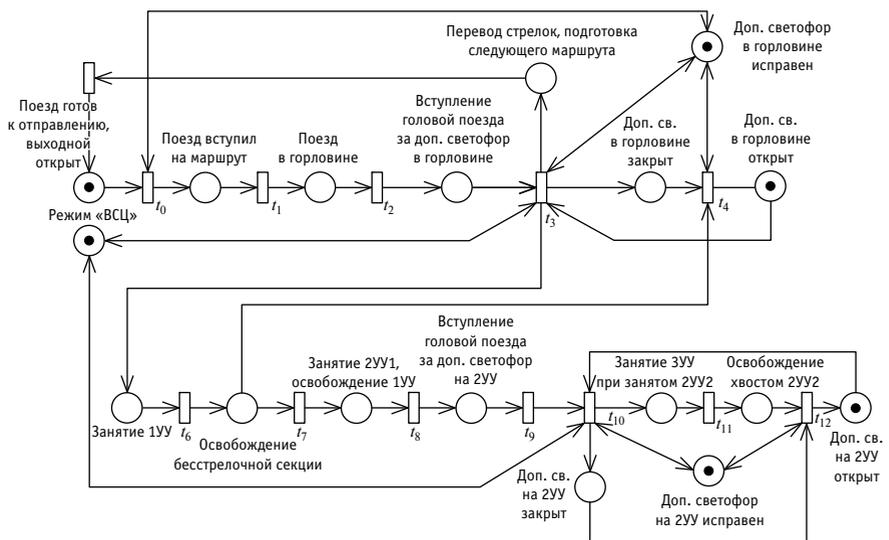


Рис. 5. Алгоритм работы светофоров:

доп. св. — дополнительный светофор; режим «ВСЦ» — особый режим работы станции при отправлении поездов в виртуальной сцепке; 1У — первый участок удаления; 2У — второй участок удаления; 3У — третий участок удаления

ку отправление происходит на неправильный путь, вместо дополнительного светофора на втором участке приближения можно использовать знак «граница блок-участка», который будет обозначать место остановки ведомого поезда в случае остановки впередиидущего поезда или при возникновении неполадок с аппаратурой виртуальной сцепки. Дополнительные светофоры (Ч1–6Д и Ч2–6Д) разделяют существующие бесстрелочные участки за входными светофорами на две части (НАП и НАПД, НДП и НДПД), при этом работа данных рельсовых цепей как индивидуальных осуществляется только в рамках активированного режима «отправление поездов в виртуальной сцепке». Во всех остальных схемах электрической централизации необходимо включить общий повторитель путевого реле разделенных рельсовых цепей. Аналогична

ситуация с разделением второго участка приближения на две рельсовых цепи, каждая из которых работает индивидуально при отправлении поездов в виртуальной сцепке и совместно — при штатной работе автоблокировки.

**АЛГОРИТМ РАБОТЫ СВЕТОФОРОВ**

Представить алгоритм работы двух дополнительных светофоров (одного в горловине станции и одного на втором участке удаления) в режиме «отправление поездов в виртуальной сцепке» можно в виде сети Петри двудольного ориентированного графа (рис. 5). Аппарат сетей Петри используется для моделирования различных систем, в том числе и железнодорожных, имеющих параллельные процессы. Например, в работах [11, 12] описывается построение моделей железнодорожных участков, а в работе [13] — модель оценки времени устранения неисправностей

в системах железнодорожной автоматики и телемеханики.

Исходное состояние сети:

ведущий поезд находится на приемо-отправочном пути, выходной светофор открыт;

включен режим «отправление поездов в виртуальной сцепке»;

дополнительные светофоры включены и исправны;

таймер, отсчитывающий интервал отправления ведомого поезда, выключен.

Длительности переходов  $t_0, t_1, t_2, t_6, t_7, t_8, t_9, t_{11}$  описывают передвижение поезда, а длительности переходов  $t_3, t_4, t_5, t_{10}, t_{12}$  — время работы устройств автоматики при переключении светофоров и установке маршрутов.

Переход  $t_3$  создает такие параллельные процессы, как движение поезда, включение красного сигнала на дополнительном светофоре в горловине станции, подготовка маршрута для следующего ведомого поезда. Переход  $t_{11}$  создает следующие параллельные процессы: включение красного на дополнительном светофоре на участке удаления, движение поезда.

Начало работы сети происходит со срабатывания перехода  $t_0$ , первым проследует ведущий поезд, запуская цикл работы для ведомых поездов. Остановка работы данной сети не предусматривается (не определено количество поездов, а также предполагается безотказная работа устройств), поскольку цель создания сети — отработка алгоритмов работы светофоров.

На основании предложенной сети Петри можно разрабатывать схемы увязки дополнительных светофоров с релейной, релейно-процессорной системами электрической централизации, а также программный код для микропроцессорной централизации.

### АЛГОРИТМ КОДИРОВАНИЯ

Кодирование маршрута отправления ведущего поезда осуществляется согласно существующим правилам. Кодирование секций в маршруте отправления ведомого поезда осуществляется за хвостом уходящего ведущего поезда по принципу подвижных блок-участков. Алгоритм кодирования в виде блок-схемы представлен на рис. 6.

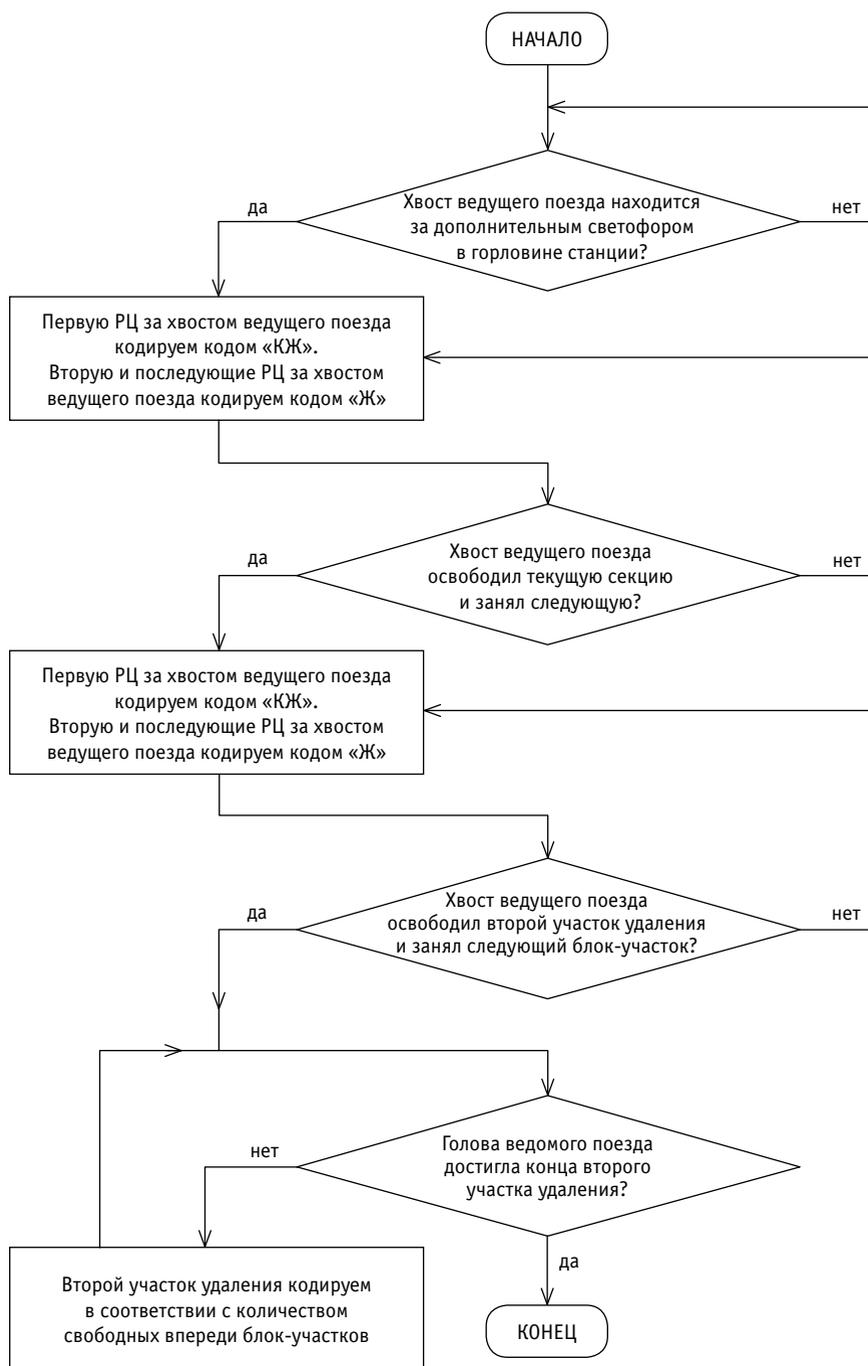


Рис. 6. Алгоритм кодирования маршрута отправления ведомого поезда

В момент трогания ведомого поезда при исправной работе устройств первая рельсовая цепь за хвостом ведущего поезда кодируется кодом «КЖ», вторая и последующие — кодами «Ж». В нормальном режиме, когда все функционирует исправно, на локомотив ведомого поезда поступают коды «Ж» на протяжении все-

го пути — от выходного до точки, в которой поезда начинают ехать с двухблочным разграничением (рис. 7). Если не удастся организовать кодирование ведомого поезда при движении по стрелочной улице, на локомотивном светофоре согласно действующим правилам кодирования будет отображаться код «Б» (рис. 8).

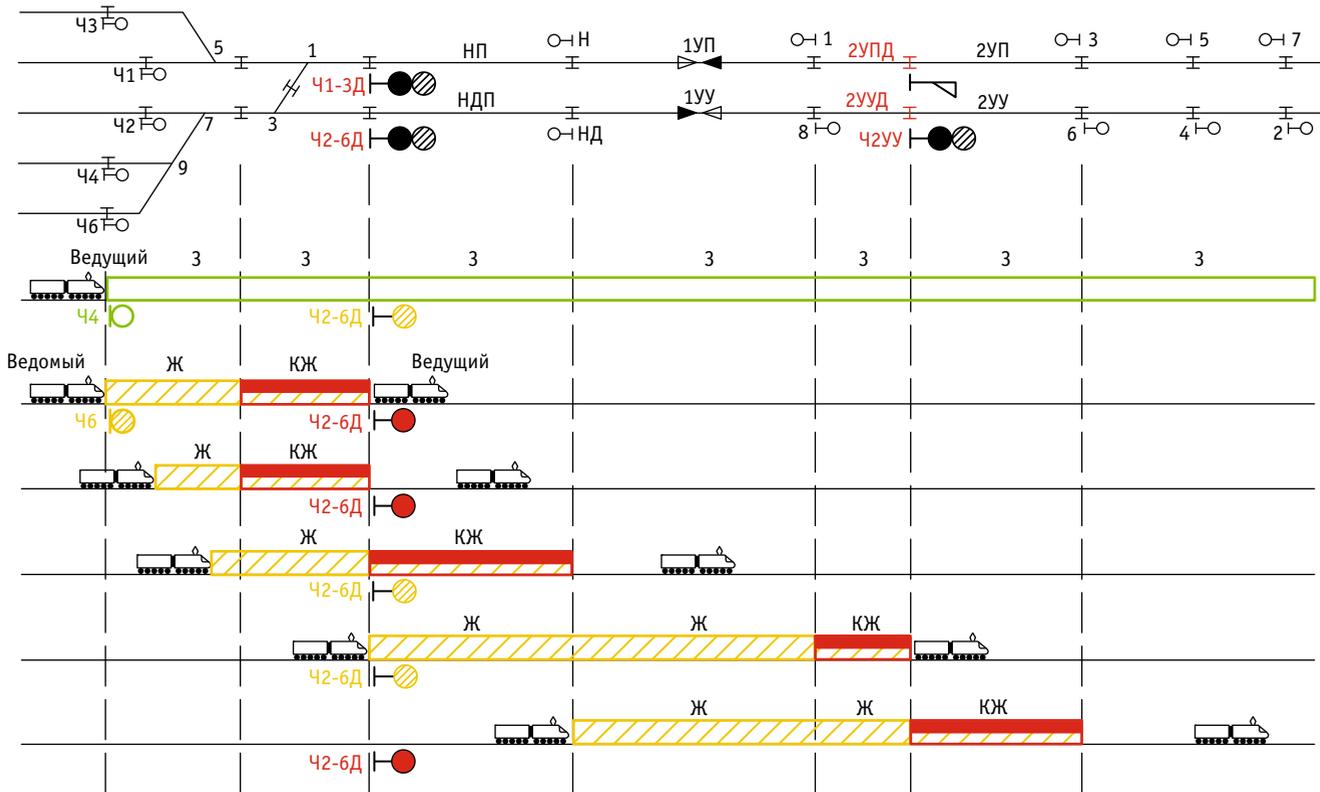


Рис. 7. Кодирование всех секций в маршруте отправления ведомого поезда

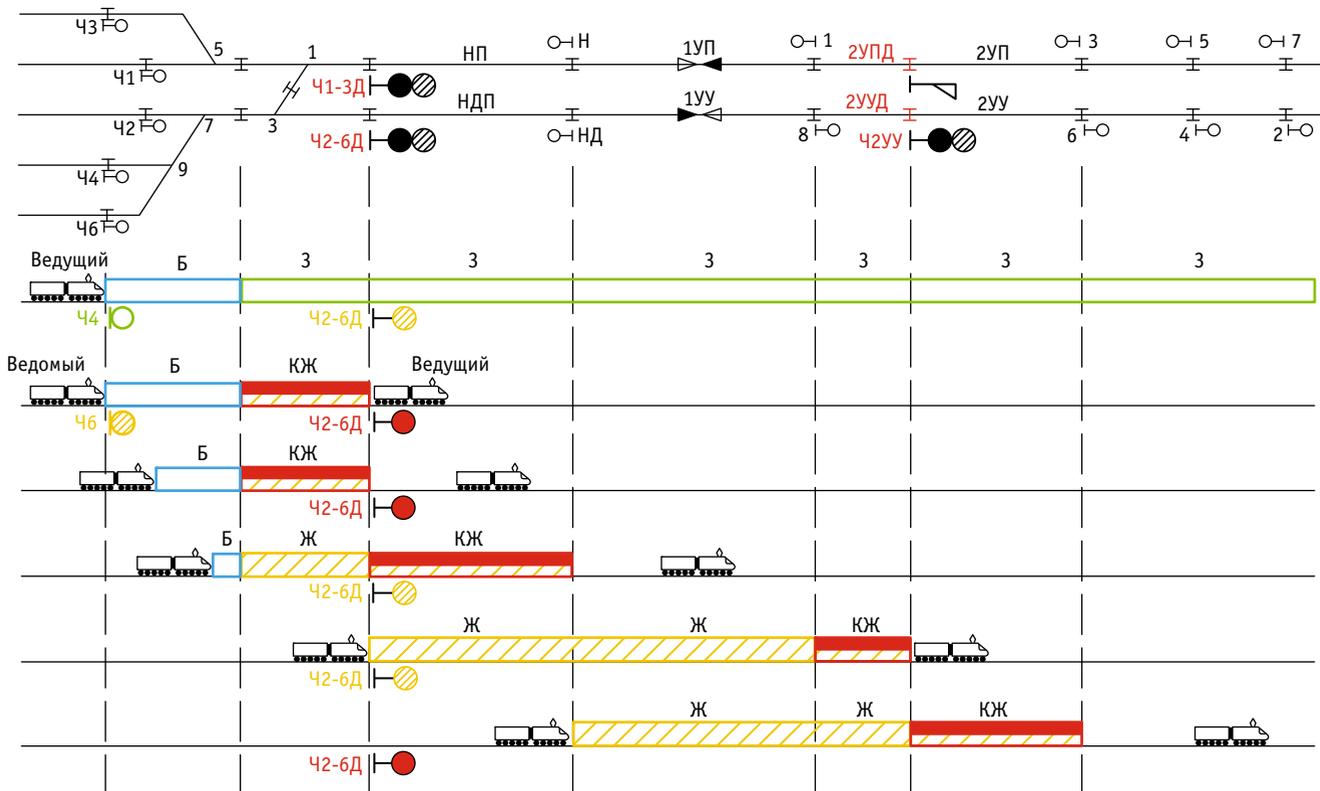


Рис. 8. Кодирование маршрута отправления при отсутствии кодов на стрелочной улице

Если при движении поездов происходит отказ устройств автоматики или систем виртуальной сцепки, разработанный алгоритм кодирования предоставит машинисту информацию о необходимости выполнить торможение. Если машинист не успевает среагировать на получение кода «КЖ», поезд должен быть остановлен локомотивными системами безопасности (БЛОК, САУТ). Отсюда вытекает требование о том, что при использовании технологии виртуальной сцепки в состав локомотивной аппаратуры должна входить система автоматического управления торможением.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагаемая технология отправления грузовых поездов в виртуальной сцепке и технические решения для соответствующих станционных систем автоматики включают в себя:

описание особого режима функционирования станции при отправлении поездов в виртуальной сцепке;

методику определения мест установки дополнительных светофоров, необходимых для обеспечения безопасности движения при отправлении поездов в виртуальной сцепке;

алгоритм работы светофоров при отправлении поездов в виртуальной сцепке;

алгоритм кодирования маршрута отправления ведомых поездов.

Представленные подходы могут быть использованы разработчиками систем электрических централизаций для создания технических решений по увязке станционных и перегонных устройств автоматики и телемеханики при отправлении поездов в виртуальной сцепке.

## Литература

1. Розенберг Е. Н., Абрамов А. А., Батраев В. В. Интервальное регулирование движения поездов // Железнодорожный транспорт. 2017. № 9. С. 19–24. ISSN 0044-4448.
2. Новиков В. Г. Координатная система интервального регулирования движения поездов с расширенными функциональными возможностями локомотивного устройства : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва, 2011. 23 с.
3. Уровень автоматизации GoA4: перспективы на железных дорогах России и мира / В. Е. Андреев, В. А. Гапанович, А. Ю. Маняхин, Я. Хардер // Вестник Института проблем естественных монополий: Техника железных дорог. 2021. № 1 (53). С. 12–17. ISSN 1998-9318.
4. Куренков П., Солоп И., Чеботарева Е. Подвижные блок-участки и виртуальные сцепки как инновационные составляющие транспортно-логистической инфраструктуры // Логистика. 2021. № 1 (170). С. 30–34. ISSN 2219-7222.
5. Воронин В. А. Многозначная АЛС на участках АЛСО с ПБУ // Автоматика, связь, информатика. 2022. № 7. С. 2–5. ISSN 0005-2329.
6. Бушуев С. В. Пути повышения провозной способности участков железных дорог // Автоматика на транспорте. 2022. Т. 8. № 4. С. 343–353. DOI: 10.20295/2412-9186-2022-8-04-343-353. ISSN 2412-9186.
7. Бушуев С. В., Голочалов Н. С. Анализ способов повышения пропускной способности железных дорог // Транспорт Урала. 2023. № 1 (76). С. 42–50. DOI: 10.20291/1815-9400-2023-1-42-50. ISSN 1815-9400.
8. Кононов В. А., Лыков А. А., Никитин А. Б. Основы проектирования электрической централизации промежуточных станций. Москва : УМЦ ЖДТ, 2014. 346 с.
9. Неугасов Н. М., Степанов Н. М., Новиков В. Д. Проектирование автоматической блокировки на железнодорожном транспорте. Москва : Трансжелдориздат, 1958. 348 с.
10. Кокурин И. М., Пушкин И. А. Технология определения длин фиксированных блок-участков // Автоматика, связь, информатика. 2022. № 10. С. 9–14. DOI: 10.34649/AT.2022.10.10.002. ISSN 0005-2329.
11. Борисенко А. П. Моделирование дискретно-событийных моделей железнодорожных сетей // Научные труды КубГТУ. 2016. № 10. С. 236–244. ISSN 2312-9409.

## References

1. Rozenberg E. N., Abramov A. A., Batraev V. V. Interval control of train movement [Interval'noe regulirovaniye dvizheniya poezdov]. Railway Transport. 2017. No. 9. Pp. 19–24. ISSN 0044-4448.
2. Novikov V. G. Coordinate system of interval control of train movement with extended functional possibilities of a locomotive device [Koordinatnaya sistema interval'nogo regulirovaniya dvizheniya poezdov s rasshirennyimi funktsional'nymi vozmozhnostyami lokomotivnogo ustroystva]. Synopsis of PhD in Engineering Thesis. Moscow, 2011. 23 p.
3. Andreev V. E., Gapanovich V. A., Manyakhin A. Yu., Kharder Yan. GoA automation Level 4: prospects on the railways of Russia and the world [Uroven' avtomatizatsii GoA4: perspektivy na zheleznnykh dorogakh Rossii i mira]. Railway Equipment. 2021. No. 1 (53). Pp. 12–17. ISSN 1998-9318.
4. Kurenkov P., Solop I., Chebotareva E. Mobile block sections and virtual hitches as innovative components of transport and logistics infrastructure [Podvizhnye blok-uchastki i virtual'nye stseпки kak innovatsionnye sostavlyayushhie transportno-logisticheskoy infrastruktury]. Logistics. 2021. No. 1 (170). Pp. 30–34. ISSN 2219-7222.
5. Voronin V. A. Multivalued ACS on sections with movable block sections [Mnogoznachnaya ALS na uchastkakh ALSO s PBU]. Automation, communication, informatics. 2022. No. 7. Pp. 2–5. ISSN 0005-2329.
6. Bushuev S. V. Ways to rise carrying capacity of railway sections [Puti povysheniya provoznoy sposobnosti uchastkov zheleznnykh dorog]. Automation on Transport. 2022. Vol. 8. No. 4. Pp. 343–353. DOI: 10.20295/2412-9186-2022-8-04-343-353. ISSN 2412-9186.
7. Bushuev S. V., Golochalov N. S. Analysis of ways to increase traffic capacity of railways [Analiz sposobov povysheniya propusknoy sposobnosti zheleznnykh dorog]. Transport of the Urals. 2023. No. 1 (76). Pp. 42–50. DOI: 10.20291/1815-9400-2023-1-42-50. ISSN 1815-9400.
8. Kononov V. A., Lykov A. A., Nikitin A. B. Fundamentals of design of electrical centralization of intermediate stations [Osnovy proektirovaniya elektricheskoy tseпtralizatsii promezhutochnykh stantsiy]. Moscow, 2014. 346 p.
9. Neugasov N. M., Stepanov N. M., Novikov V. D. Design of automatic locking on railway transport [Proektirovaniye avtomaticheskoy blokirovki na zheleznodorozhnom transporte]. Moscow, 1958. 348 p.
10. Kokurin I. M., Pushkin I. A. Technology for the automatic blocks fixed lengths determination [Tekhnologiya opredeleniya dlin fiksirovannykh blok-uchastkov]. Automation, communication, informatics. 2022. No. 10. Pp. 9–14. DOI: 10.34649/AT.2022.10.10.002. ISSN 0005-2329.
11. Borisenko A. P. Modeling of discrete-event model railway networks [Modelirovaniye diskretno-sobytiynnykh modeley zheleznodorozhnykh setey]. Scientific Works of the Kuban State Technological University. 2016. No. 10. Pp. 236–244. ISSN 2312-9409.



12. Кузнецов С. К., Потехин А. И. Применение сетей Петри для моделирования железнодорожных систем (обзор) // XII всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2014, Москва, 16–19 июля 2014 г. / Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова Российской академии наук. Москва : ИПУ РАН, 2014. С. 4937–4946.
13. Булавский П. Е., Ваисов О. К. Моделирование и оценка времени поиска неисправностей в системах интервального регулирования движения поездов на базе иерархических цветных сетей Петри // Автоматика на транспорте. 2020. Т. 6. № 3. С. 356–376. DOI: 10.20295/2412-9186-2020-6-3-356-376. ISSN 2412-9186.

12. Kuznetsov S. K., Potekhin A. I. Application of Petri nets for modeling railway systems (overview) [Primenenie setey Petri dlya modelirovaniya zheleznodorozhnykh sistem (obzor)]. The 12th All-Russian meeting on management problems, Moscow, July 16–19, 2014. Moscow, ISC RAS, 2014. Pp. 4937–4946.
13. Bulavskiy P. E., Vaisov O. K. Modeling and estimation of failure detection period in systems of railway traffic interval control based on hierarchy colored Petri nets [Modelirovanie i otsenka vremeni poiska neispravnostey v sistemakh interval'nogo regulirovaniya dvizheniya poezdov na baze ierarkhicheskikh tsvetnykh setey Petri]. Automation on Transport. 2020. Vol. 6. No. 3. Pp. 356–376. DOI: 10.20295/2412-9186-2020-6-3-356-376. ISSN 2412-9186.

*Объем статьи 1,2 авторских листа*

УДК 656.253

Артём Валерьевич Пашуков, старший преподаватель кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» Российского университета транспорта РУТ (МИИТ), Москва, Россия

## МЕТОДИКА СИНТЕЗА СТАНЦИОННЫХ СИСТЕМ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ АВТОМАТИКИ И ТЕЛЕМЕХАНИКИ С ПРОГРАММИРУЕМОЙ ЛОГИКОЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ МОДЕЛИ КОНЕЧНЫХ АВТОМАТОВ

Artyom Valeryevich Pashukov, Senior Lecturer, Railway Automation, Remote Control and Communication Department, Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia

### The method of synthesis of station systems of railway automation and remote control with programmable logic using the model of finite state machines

#### Аннотация

Показаны основные преимущества микропроцессорных систем железнодорожной автоматики и телемеханики по отношению к релейным системам, а также преимущества использования программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) по сравнению с микропроцессорами для решения задач синтеза систем управления. Приведены примеры применения ПЛИС в устройствах и системах железнодорожной автоматики и телемеханики. Рассмотрена возможность синтеза конечного автомата на ПЛИС, реализующего маршрутные зависимости на произвольной станции. Для этого описана логика работы устройств железнодорожной автоматики и телемеханики, выявлены все возможные состояния проектируемого устройства и записаны условия переходов между ними. Сформирована методика синтеза конечного автомата, реализующего маршрутные зависимости, основанная на наращивании графов типовых устройств. Достоинством подхода является синтез устройств железнодорожной автоматики и телемеханики по заданным логическим алгоритмам с использованием современной элементной базы.

**Ключевые слова:** железнодорожная автоматика и телемеханика, сигнализация, централизация и блокировка, напольное технологическое оборудование, граф переходов, программируемые логические интегральные схемы

#### Abstract

The main advantages of microprocessor systems of railway automation and remote control in relation to relay systems, as well as the advantages of using field-programmable gate array (FPGAs) in comparison with microprocessors for solving control system synthesis problems are presented. Examples of the possibility of using FPGAs in devices and systems of railway automation and remote control are given. The possibility of synthesizing a finite state machine on an FPGA that implements route dependencies at an arbitrary station is considered. For this purpose, the logic of the operation of railway automation and remote control devices is described, all possible states of the designed device are identified and the conditions of transitions between them are recorded. A method of synthesis of a finite state machine implementing route dependencies based on building up graphs of typical devices has been formed. The advantage of this approach is the possibility of synthesizing railway automation and remote control devices according to specified logical algorithms, using a modern element base.

**Keywords:** railway automation and remote control, signals and interlocking, floor-level technological equipment, graph of transitions, field-programmable gate array

DOI: 10.20291/1815-9400-2023-3-56-63

#### ВВЕДЕНИЕ

**Т**ехнические средства железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ) позволяют обеспечивать безопасное следование поездов по железнодорожным линиям и маневровую работу на станциях. Устройства и системы ЖАТ дают возможность осуществлять все виды управления перемещениями на перегонах и станциях, напрямую воздействуя на железнодорожные стрелки и передавая сигналы машинистам на поездные и локомотивные светофоры [1].

Благодаря системам и устройствам ЖАТ обеспечивается безопасность движения поездов (предотвращаются столкновения, сходы с рельсов и другие аварии). Также системы и устройства ЖАТ позволяют значительно увеличить пропускную способность участков.

Прошлый век в железнодорожной отрасли характеризовался возникновением, развитием и тотальным внедрением систем ЖАТ на основе электромагнитных реле [2, 3]. Однако в последние десятилетия эволюция компьютерной техники и информационных технологий позволяет сделать качественный скачок для перехода к реализации систем на современной микроэлектронной и микропроцессорной основе. Преимущества таких систем — высокое быстродействие, расширение функциональных возможностей, регистрация неисправностей, возникающих во время эксплуатации. Это, в свою очередь, совершенствует и процедуры их технического содержания и эксплуатации, поднимает культуру труда и снижает воздействие человеческого фактора за счет использования развитых средств самодиагностики и мониторинга ответственных параметров.

С конца 1970-х гг. внедряются системы ЖАТ на микропроцессорной основе. Их реализуют по следующим принципам. Большинство микропроцессорных систем ЖАТ имеют три функциональных уровня. Верхний уровень отвечает за ввод и отображение данных. Средний реализует сигнальные зависимости, обеспечивая формирование, замыкание и размыкание маршрутов, проверку допустимости воздействий на отдельные напольные устройства и т.д. Нижний

уровень непосредственно передает управляющие воздействия на напольные устройства.

Еще одним интересным с точки зрения реализации схем ЖАТ элементом является программируемая логическая интегральная схема (ПЛИС). По сравнению с микропроцессорами ПЛИС обладают рядом преимуществ, среди которых можно выделить параллельную обработку данных, низкие затраты электроэнергии, возможность реконфигурации в процессе эксплуатации без замены исходного элемента, простоту создания проекта.

Устройства и системы ЖАТ реализуются с высочайшим уровнем полноты функциональной безопасности, а выбор элементной базы определяет и требования к их реализации, такие как наличие резервирования узлов и программных средств, состав и охват устройств средствами тестового и рабочего диагностирования, использование самопроверяемых схем встроенного контроля, многообразие безопасных состояний и т.д. [4, 5].

В работах [6–12] изучаются особенности синтеза устройств ЖАТ на элементах программируемой логики. В частности, в [6] описана архитектура безопасных устройств, используемых на железнодорожных переездах Чехии, где для обеспечения безопасности предложено применять систему с тройной модульной избыточностью и дублированием в каждом модуле. В [7] рассмотрены станционные системы ЖАТ Чехии на основе ПЛИС. В работах [9–12] приведены примеры реализации различных напольных устройств ЖАТ на базе ПЛИС в виде конечных автоматов. В [8] рассмотрены методы синтеза логических устройств электрической централизации (ЭЦ) на базе ПЛИС. В частности, описан пример проектирования электронного реле с выдержкой времени на отключение.

Важным преимуществом использования элементов программируемой логики для реализации устройств и систем ЖАТ является возможность тесной интеграции средств диагностирования и мониторинга аналоговых параметров напольного технологического оборудования (стрелочных электроприводов, светофоров, рельсовых цепей и пр.) со средствами управления [13, 14], а также потенциальная увязка еще на этапе синтеза с системами мониторинга инженерных конструкций и сооружений объектов железнодорожной инфраструктуры [15–17]. Это, конечно, можно сделать и для уже реализованных систем путем дооснащения, что потребует существенных изменений с большим количеством согласований и получением сертификатов безопасности. Однако гораздо эффективнее данный процесс будет реализован при интеграции еще на этапе синтеза при разработке соответствующей методики [18].

При синтезе устройств ЖАТ на любой элементной базе универсальным является язык конечных автоматов (КА) [19]. В [20] раскрыты особенности синтеза схемных решений по управлению средствами автоматики на промежуточных станциях с помощью алгебры регулярных событий. Предполагается, что множество событий, соответствующих технологическим ситуациям на железнодорожном транспорте, описывается в виде регулярных выражений, а затем синтезируется КА для управления. Суть состоит в следующем. В общем виде задан конечный автомат, отказы внутренних элементов которого вызывают его превращение в автомат, соответствующий поведению с неисправностями. Таким образом, задание автомата дополняется системой регуляр-

ных выражений для опасных событий. Требуется построить автомат таким образом, чтобы реализация опасных событий при всех возможных отказах, т.е. отказах, с вероятностью возникновения которых необходимо считаться, исключалась. Существует понятие ложного перехода, который происходит тогда, когда в каком-то такте работы автомат должен перейти в определенное состояние, но из-за возникших неисправностей он перейдет в иное состояние. Неисправности выходных цепей, которые не приводят к искажению функции переходов автомата, не учитываются.

В ходе исследований автора настоящей работы была поставлена следующая задача: разработать универсальную методику синтеза схемных решений по управлению движением поездов на промежуточных станциях с применением теории конечных автоматов на основе устройств с программируемой логикой.

### ПРИНЦИПЫ ФОРМИРОВАНИЯ КОНЕЧНОГО АВТОМАТА ДЛЯ СИСТЕМЫ, РЕАЛИЗУЮЩЕЙ МАРШРУТНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ НА СТАНЦИИ

В исследованиях [9–12, 14, 20, 21] показано, что любые схемы для работы напольных устройств ЖАТ можно представить в виде КА. Для этого требуется получить логическое описание его работы. В предыдущих исследованиях автора настоящей статьи рассматривались только способы синтеза схемных решений для отдельных устройств ЖАТ, однако, как широко известно, между ними существуют взаимозависимости, а на станциях все устройства функционируют не только при индивидуальном управлении, но и при маршрутном. Само понятие «маршрут» является базовым при построении систем управления стрелками и сигналами на станции.

Различают два вида маршрутов: поездные и маневровые. Поездной — это маршрут, предназначенный для передвижения подвижного состава по станциям по подготовленным маршрутам приема, передачи, отправления или пропуска поездов. Маневровый — маршрут, предназначенный для передвижения подвижного состава (локомотива с вагонами или без них) по территории станции для выполнения различных маневровых операций.

Замыканием маршрута называется процесс замыкания всех стрелок, входящих в маршрут, и исключение враждебных маршрутов. В исправном состоянии системы ЖАТ процесс замыкания маршрута заканчивается открытием светофора. Враждебным называется маршрут, который не допускается по условиям безопасности при одновременном движении нескольких поездов или составов. Примером задания враждебных маршрутов может быть одновременный прием двух поездов на один путь.

Рассмотрим более подробно процесс реализации маршрутного управления на станциях. Для замыкания маршрута необходимо указать начальную, конечную и (при сложном путевом развитии) еще некоторые варианты точки маршрута. Далее ходовые и охранные стрелки по трассе маршрута переводятся автоматически.

Процесс размыкания маршрута происходит вследствие проезда поезда по маршруту, отмены маршрута или искусственного размыкания. В свою очередь, при искусственном размыкании нужно учитывать вид маршрута (поездной или маневровый), так как для каждого из них используется разная выдержка времени.

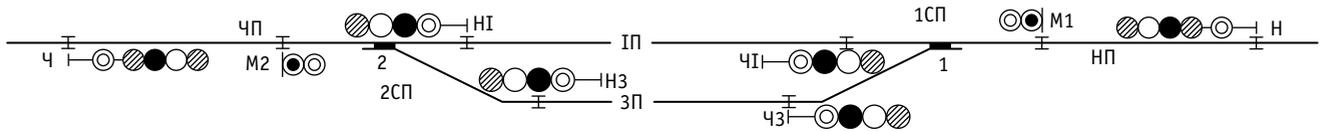


Рис. 1. Одноточный план фрагмента произвольной станции с простейшим путевым развитием

Размыкание маршрута при проследовании поезда осуществляется по следующим правилам:

первая секция в поездном маршруте размыкается при освобождении участка приближения, занятии данной секции, занятии следующей секции, освобождении данной секции и фиксации ее свободного состояния в течение 6 с;

первая секция в маневровом маршруте размыкается при занятии данной секции, занятии следующей секции, освобождении данной (первой) секции и фиксации времени ее свободного состояния в течение не менее 6 с;

любая не первая секция размыкается при занятии данной секции, занятии следующей секции, освобождении рассматриваемой (любой не первой) секции и фиксации времени ее свободного состояния в течение не менее 6 с;

если в процессе реализации поездного маршрута участок приближения не был освобожден, то размыкание маршрута происходит после прибытия поезда в конечную точку маршрута.

Выдержка времени при размыкании необходима, чтобы предотвратить перекрытие светофора на запрещающий сигнал светофора при проследовании поезда из-за возможной кратковременной потери шунтовой чувствительности.

Рассмотрим процесс задания маршрутов на примере фрагмента произвольной станции (рис. 1).

Рассматриваемая станция содержит 2 стрелочных перевода, 4 выходных, 2 входных и 2 маневровых светофора.

Требуется задать маршрут приема на путь 3 от светофора Ч. Для этого в четной горловине станции выбирается начальная точка маршрута — светофор Ч и конечная точка — участок ЗП. Затем производится автоматический перевод стрелки 2 в минусовое положение (движение поезда по отклонению), замыкание всех секций, входящих в маршрут (ЧП, 2СП, ЗП), после чего открывается входной светофор Ч. Отметим, что по-

Таблица 1

Таблица поездных маршрутов

Направление	Номер маршрута	Наименование маршрута	Светофор	Стрелки	
				2	3
Четная горловина	1	Прием на ИП	Ч	+	
	2	Прием на ЗП	Ч	-	
	3	Отправление с ИП	Н1	+	
	4	Отправление с ЗП	Н3	-	
Нечетная горловина	5	Прием на ИП	Н		+
	6	Прием на ЗП	Н		-
	7	Отправление с ИП	Ч1		+
	8	Отправление с ЗП	Ч3		-

Таблица 2

Таблица маневровых маршрутов

Направление		Номер маршрута	Наименование маршрута	Стрелки, определяющие маршрут
Четная горловина	От светофора	М2	На ИП	+2
		М2	На ЗП	-2
		Н1	За светофор М2	+2
		Н3	За светофор М2	-2
Нечетная горловина	От светофора	М1	На ИП	+1
		М1	На ЗП	-1
		Ч1	За светофор М1	+1
		Ч3	За светофор М1	-1

сле замыкания рассмотренного маршрута станет невозможно задать новый маршрут, который будет задействовать замкнутые секции.

Составим таблицы взаимозависимостей маршрутов, стрелок и светофоров для поездных и маневровых маршрутов (табл. 1 и 2), а также таблицу взаимозависимости сигнальных показаний (табл. 3). Данные таблиц необходимы для подсчета количества возможных маршрутов, указания положения стрелок и сигналов светофоров при том или ином маршруте.

Для задания конечного автомата используется модель

$$A = \langle X, Q, Z, Q_1, \varphi, \chi \rangle, \quad (1)$$

где  $Q$  — множество состояний, включающее в себя исправные, работоспособные (в том числе предотказные), неработоспособные защитные и опасные состояния (в настоящем исследовании не приводится детализации защитных состояний и увязки со средствами диагностирования и мониторинга, однако такая увязка производится аналогично предложенному в [18] принципу для средств мониторинга объектов);  $X$  — множество входных логических переменных;  $Z$  — множество выходных логических переменных;  $Q_1$  — начальное состояние; функция  $\varphi: X \times Q \rightarrow Q$  — функция переходов, отображающая множество  $X \times Q$  в множество  $Q$ ; функции  $\chi$ :

$X \times Q \rightarrow Z$  — функции переходов, отображающие множество  $X \times Q$  в множество  $Z$ .

Рассмотрим процедуру описания работы средств ЖАТ при реализации маршрутов на станции, представленной на рис. 1.

В качестве входных параметров примем следующие данные:

$x_1$  — тип маршрута (0 — не задан, 1 — поездной, 2 — маневровый);

$x_2$  — начальная точка маршрута (0 — не задана, 1 — Ч, 2 — ЧІ, 3 — ЧЗ, 4 — Н, 5 — НІ, 6 — НЗ, 7 — М2, 8 — М1);

$x_3$  — конечная точка маршрута (0 — не задана, 1 — Ч, 2 — ЧІ, 3 — ЧЗ, 4 — Н, 5 — НІ, 6 — НЗ, 7 — М2, 8 — М1);

$x_4$  — занятость участков и стрелочных секций по маршруту (0 — заняты, 1 — свободны);

$x_5$  — положение стрелки 2 (0 — плюсовое положение, 1 — минусовое положение, 2 — нет контроля);

$x_6$  — положение стрелки 1 (0 — плюсовое положение, 1 — минусовое положение, 2 — нет контроля);

$x_7$  — замыкание участков и стрелочных секций (0 — не замкнуты, 1 — замкнуты);

$x_8$  — замыкание стрелки 2 (0 — не замкнута, 1 — замкнута);

$x_9$  — замыкание стрелки 1 (0 — не замкнута, 1 — замкнута).

Выходными данными для системы будут:

$z_1$  — состояние стрелки 2;

$z_2$  — состояние стрелки 1;

$z_3$  — состояние светофора Ч (0 — закрыт, 1 — открыт, 2 — погашен);

$z_4$  — состояние светофора ЧІ (0 — закрыт, 1 — открыт, 2 — погашен);

$z_5$  — состояние светофора ЧЗ (0 — закрыт, 1 — открыт, 2 — погашен);

$z_6$  — состояние светофора Н (0 — закрыт, 1 — открыт, 2 — погашен);

$z_7$  — состояние светофора НІ (0 — закрыт, 1 — открыт, 2 — погашен);

$z_8$  — состояние светофора НЗ (0 — закрыт, 1 — открыт, 2 — погашен);

$z_9$  — состояние светофора М2 (0 — закрыт, 1 — открыт, 2 — погашен);

$z_{10}$  — состояние светофора М1 (0 — закрыт, 1 — открыт, 2 — погашен).

Состояния рассматриваемого объекта, а также условия переходов перечислены в табл. 4.

В табл. 4 для упрощения задания векторов присутствуют числа от 0 до 6. Это связано с тем, что некоторые объекты ЖАТ могут находиться более чем в двух состояниях. Например, стрелка может находиться в одном из следующих четырех состояний: плюсовое положение, минусовое положение, потеря контроля и взрез. Такие числа должны быть представлены в двоичном виде. Например, вектор  $\langle 2\ 3\ 8\ 1 \sim 1\ 0\ 0\ 0 \rangle$  примет вид  $\langle 101110001 \sim 1000 \rangle$ . Также в табл. 4 все невозможные наборы входных значений обозначены как  $\Omega_i^*$ .

На рис. 2 представлен граф переходов для маршрута приема от Ч на ИП.

Для реализации нескольких маршрутов данный граф будет каскадно увеличиваться, и конечный граф на  $N$  маршрутов будет состоять из  $N$  графов, изображенных на рис. 2, за исключением начального и защитного состояний.

На рис. 3 показан пример графа, который может задавать два маршрута: прием от Ч на ИП и прием от Ч на ЗП.

Таблица 3

Таблица взаимозависимостей сигнальных показаний

Наименование маршрута	Направление движения четное		
	Показания светофора		
	Ч	ЧІ	ЧЗ
Прием на ИП	●	●	
Прием на ЗП	●		●
Сквозной пропуск по ИП	○	○; ●	
Сквозной пропуск по ЗП	●		○; ●
Отправление с ИП		○; ●	
Отправление с ЗП			○; ●

Наименование маршрута	Направление движения нечетное		
	Показания светофора		
	Н	НІ	НЗ
Прием на ИП	●	●	
Прием на ЗП	●		●
Безостановочный пропуск по ИП	○	○; ●	
Безостановочный пропуск по ЗП	●		○; ●
Отправление с ИП		○; ●	
Отправление с ЗП			○; ●

В табл. 3 приняты следующие обозначения:

- — красное показание светофора; ● — желтое показание светофора; ○ — зеленое показание светофора;
- — показание светофора «два желтых, верхний мигающий»; ● — показание светофора «два желтых».

Таблица 4

Таблица состояний при замыкании маршрута

Состояние	Вектор параметров < $x_1, x_2, \dots, x_9$ >	Обозначение множества векторов параметров	Значения выходного вектора < $z_1, \dots, z_{10}$ >	Обозначение выходного вектора
Маршрут разомкнут	0 0 0 ~ ~ ~ 0 0 0	$X_1$	~ ~ 0 0 0 0 0 0 0 0	$Z_1$
Подготовка трассы маршрута				
Прием от Ч на ИП	1 1 5 1 ~ ~ 0 0 0	$X_2$	1 ~ 0 0 ~ ~ 0 0 0 0	$Z_2$
Прием от Ч на ЗП	1 1 2 6 ~ ~ 0 0 0	$X_3$	0 ~ 0 ~ 0 ~ 0 0 0 0	$Z_3$
Отправление с ИП за Ч	1 2 1 1 ~ ~ 0 0 0	$X_4$	1 ~ 0 0 0 ~ 0 0 0 0	$Z_4$
Отправление с ЗП за Ч	1 3 1 1 ~ ~ 0 0 0	$X_5$	0 ~ 0 0 0 ~ 0 0 0 0	$Z_5$
Прием от Н на ИП	1 4 2 1 ~ ~ 0 0 0	$X_6$	~ 0 ~ 0 0 0 0 0 0 0	$Z_6$
Прием от Н на ЗП	1 4 3 1 ~ ~ 0 0 0	$X_7$	~ 1 ~ 0 0 0 0 0 0 0	$Z_7$
Отправление с ИП за Н	1 5 4 1 ~ ~ 0 0 0	$X_8$	~ 0 ~ 0 0 0 0 0 0 0	$Z_8$
Отправление с ЗП за Н	1 6 4 1 ~ ~ 0 0 0	$X_9$	~ 1 ~ 0 0 0 0 0 0 0	$Z_9$
От М2 на ИП	2 7 2 1 ~ ~ 0 0 0	$X_{10}$	0 ~ 0 0 ~ ~ 0 0 0 ~	$Z_{10}$
От М2 на ЗП	2 7 3 1 ~ ~ 0 0 0	$X_{11}$	1 ~ 0 ~ 0 ~ 0 0 0 ~	$Z_{11}$
С 1П за светофор М2	2 5 7 1 ~ ~ 0 0 0	$X_{12}$	0 ~ 0 0 ~ ~ 0 0 0 ~	$Z_{12}$
С ЗП за светофор М2	2 6 7 1 ~ ~ 0 0 0	$X_{13}$	1 ~ 0 ~ 0 ~ 0 0 0 ~	$Z_{13}$
От М1 на ИП	2 8 5 1 ~ ~ 0 0 0	$X_{14}$	~ 0 ~ 0 0 0 0 ~ ~ 0	$Z_{14}$
От М1 на ЗП	2 8 6 1 ~ ~ 0 0 0	$X_{15}$	~ 1 ~ 0 0 0 ~ 0 ~ 0	$Z_{15}$
С 1П за светофор М1	2 2 8 1 ~ ~ 0 0 0	$X_{16}$	~ 0 ~ 0 0 0 0 ~ ~ 0	$Z_{16}$
С ЗП за светофор М1	2 3 8 1 ~ ~ 0 0 0	$X_{17}$	~ 1 ~ 0 0 0 ~ 0 ~ 0	$Z_{17}$
Замыкание маршрута				
Прием от Ч на ИП	1 1 5 1 0 ~ 0 0 0	$X_{18}$	5 ~ 1 0 ~ ~ 0 0 0 0	$Z_{18}$
Прием от Ч на ЗП	1 1 2 6 1 ~ 0 0 0	$X_{19}$	6 ~ 1 ~ 0 ~ 0 0 0 0	$Z_{19}$
Отправление с ИП за Ч	1 2 1 1 0 ~ 0 0 0	$X_{20}$	5 ~ 0 0 0 ~ 1 0 0 0	$Z_{20}$
Отправление с ЗП за Ч	1 3 1 1 1 ~ 0 0 0	$X_{21}$	6 ~ 0 0 0 ~ 0 1 0 0	$Z_{21}$
Прием от Н на ИП	1 4 2 1 ~ 0 0 0 0	$X_{22}$	~ 5 ~ 0 0 1 0 0 0 0	$Z_{22}$
Прием от Н на ЗП	1 4 3 1 ~ 1 0 0 0	$X_{23}$	~ 6 ~ 0 0 1 0 0 0 0	$Z_{23}$
Отправление с ИП за Н	1 5 4 1 ~ 0 0 0 0	$X_{24}$	~ 5 ~ 1 0 0 0 0 0 0	$Z_{24}$
Отправление с ЗП за Н	1 6 4 1 ~ 1 0 0 0	$X_{25}$	~ 6 ~ 0 1 0 0 0 0 0	$Z_{25}$
От М2 на ИП	2 7 2 1 0 ~ 0 0 0	$X_{26}$	5 ~ 0 0 ~ ~ 0 1 0 ~	$Z_{26}$
От М2 на ЗП	2 7 3 1 1 ~ 0 0 0	$X_{27}$	6 ~ 0 ~ 0 ~ 0 1 0 ~	$Z_{27}$
С 1П за светофор М2	2 5 7 1 0 ~ 0 0 0	$X_{28}$	5 ~ 0 0 ~ ~ 1 0 0 ~	$Z_{28}$
С ЗП за светофор М2	2 6 7 1 1 ~ 0 0 0	$X_{29}$	6 ~ 0 ~ 0 ~ 0 1 0 ~	$Z_{29}$
От М1 на ИП	2 8 5 1 ~ 0 0 0 0	$X_{30}$	~ 5 ~ 0 0 0 0 ~ ~ 1	$Z_{30}$
От М1 на ЗП	2 8 6 1 ~ 1 0 0 0	$X_{31}$	~ 6 ~ 0 0 0 ~ 0 ~ 1	$Z_{31}$
С 1П за светофор М1	2 2 8 1 ~ 0 0 0 0	$X_{32}$	~ 5 ~ 1 0 0 0 ~ ~ 0	$Z_{32}$
С ЗП за светофор М1	2 3 8 1 ~ 1 0 0 0	$X_{33}$	~ 6 ~ 0 1 0 ~ 0 ~ 0	$Z_{33}$
Защитное состояние	$\Omega_i^*$	$X_{34}$	~ ~ 0 0 0 0 0 0 0 0	$Z_{34}$

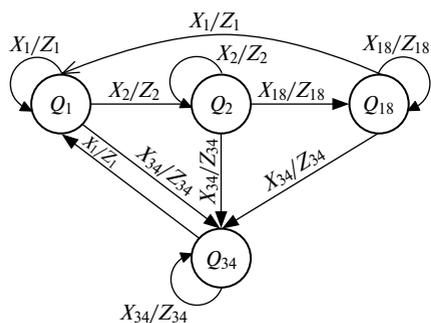


Рис. 2. Граф переходов для одного маршрута

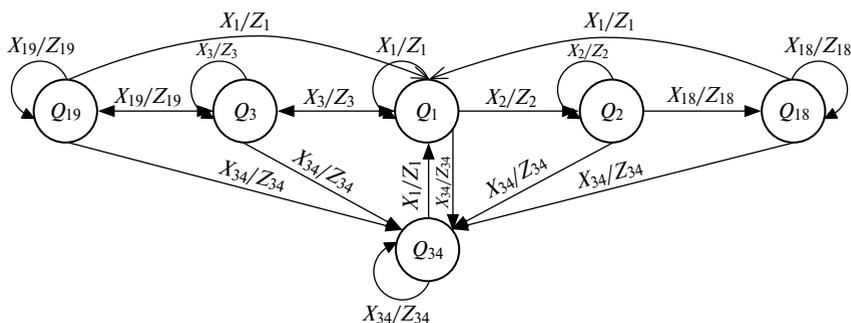


Рис. 3. Граф переходов для двух маршрутов

### МЕТОДИКА СИНТЕЗА КОНЕЧНОГО АВТОМАТА ДЛЯ СИСТЕМЫ, РЕАЛИЗУЮЩЕЙ МАРШРУТНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ НА СТАНЦИИ

Методика синтеза конечного автомата в виде графа переходов включает в себя следующие шаги (алгоритм «Последовательность синтеза графа переходов КА»).

1. Для промежуточной станции формируется таблица взаимозависимостей стрелок и сигналов на основании технической документации [22–24].

2. Для каждого отдельного маршрута создается граф, включающий в себя (см. рис. 2):

- начальное состояние (в данном случае отсутствие маршрутов на станции);
- состояние подготовки маршрута (для каждого маршрута одно состояние);
- состояние замыкания маршрута (для каждого маршрута одно состояние);
- защитное состояние.

На данном этапе уместно начальное и защитное состояния указывать только для одного маршрута. Для остальных маршрутов эти состояния можно не указывать, так как в дальнейшем они будут объединены.

3. Производится каскадное соединение всех графов. При этом все одноименные состояния (начальное и защитное) объединяются в одно, из которого (или в которое) осуществляются переходы.

4. При возможности задания нескольких маршрутов производится дополнение графа переходами между состояниями, соответствующими замкнутому маршруту и новому невраждебному маршруту. Если на станции не может быть задано больше одного маршрута одновременно, то данный шаг пропускается.

5. При необходимости осуществления мониторинга можно добавить дополнительные состояния, указывающие наличие той или иной неисправности (можно учитывать неисправности в самой системе, а также неисправности napольного оборудования), с использованием концепции из [18].

Предложенный вариант реализации системы выбора маршрута на ПЛИС напрямую зависит от количества состояний исходной системы. В рассмотренном случае для 16 маршрутов

необходимо 34 различных состояния (16 состояний для подготовки трассы, 16 состояний для замыкания маршрута, 1 состояние при отсутствии маршрутов и защитное состояние).

В рассматриваемом примере будет 34 различных состояния. Из них для каждого из 18 маршрутов — по одному состоянию подготовки трассы маршрута и по одному состоянию для замыкания маршрута, а также отдельные состояния при отсутствии маршрутов и при возникновении отказов.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Построение систем ЖАТ на базе ПЛИС в виде конечных автоматов может стать перспективным направлением. Это связано прежде всего с простотой синтеза конечного автомата по описанной логике устройств и систем ЖАТ и с преимуществами самих ПЛИС. Однако стоит отметить, что не все устройства ЖАТ легко описать логическими выражениями. Данный процесс является наиболее трудоемким, так как необходимо учесть все возможные исправные и работоспособные состояния системы или устройства, условия переходов между ними, а также увязку с устройствами диагностирования (при наличии последних).

В статье рассмотрена методика синтеза конечного автомата для системы, реализующей маршрутные зависимости, в частности подготовку и замыкание маршрута. В представленном варианте итоговый КА осуществляет управление не самими napольными объектами, а другими конечными автоматами, которые, в свою очередь, уже управляют стрелками и сигналами.

Достоинствами такого варианта синтеза являются снижение габаритов аппаратуры, сокращение времени, необходимого для задания маршрутов (благодаря параллельной обработке данных), а также возможность учета в работе КА данных от устройств диагностирования. Основным недостатком при максимальном использовании емкостей ПЛИС будет повышенное энергопотребление.

Применение ПЛИС при реализации самодиагностируемых систем управления на железных дорогах — важное и перспективное направление развития отечественных микроэлектронных компонентов, соответствующее стратегии технологического суверенитета нашей страны.

## Литература

1. Theeg G., Vlasenko S. Railway Signalling & Interlocking / 3rd edition. Germany, Leverkusen PMC Media House GmbH, 2020. 552 p.
2. Efanov D., Lykov A., Osadchy G. Testing of Relay-Contact Circuits of Railway Signalling and Interlocking // Proceedings of the 15th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2017), Novi Sad, Serbia, September 29 – October 2, 2017. Pp. 242–248. DOI: 10.1109/EWDTS.2017.8110095.
3. Лупал Н. В. Устройства сигнализации, централизации и блокировки на железных дорогах Российской империи : монография / Под ред. В. В. Сапожникова, Вл. В. Сапожникова, Д. В. Ефанова. Санкт-Петербург : Наука, 2020. 159 с.
4. Методы построения безопасных микроэлектронных систем железнодорожной автоматики / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Х. А. Христов, Д. В. Гавзов ; под ред. Вл. В. Сапожникова. Москва : Транспорт, 1995. 272 с.
5. Бестемьянов П. Ф. Методы обеспечения безопасности аппаратных средств микропроцессорных систем управления движением поездов // Электротехника. 2020. № 9. С. 2–8. ISSN 0013-5860.
6. Dobiáš R., Kubátová H. FPGA Based Design of Railway's Interlocking Equipment // Proceedings of EUROMICRO Symposium on Digital System Design, Rennes, France, 2004. Pp. 467–473. DOI: 10.1109/DSD.2004.1333312.
7. Borecky J., Kubalik P., Kubatova H. Reliable Railway Station System Based on Regular Structure Implemented in FPGA // 2009 12th Euromicro Conference on Digital System Design, Architectures, Methods and Tools, Patras, Greece, August 27–29, 2009. Pp. 348–354. DOI: 10.1109/DSD.2009.210.
8. Кабецкий А. Г., Марков Д. С. Методы и инструментальные средства построения логических устройств электрической централизации на базе программируемых логических интегральных схем // Известия ПГУПС. 2010. № 2. С. 168–173. ISSN 1815-588X.
9. Пашуков А. В. Синтез устройств управления объектами напольной автоматизации железнодорожного транспорта на программируемых логических интегральных схемах // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС). 2021. № 1. С. 61–69. DOI: 10.31114/2078-7707-2021-1-61-69. ISSN 2078-7707.
10. Пашуков А. В. Реализация устройства управления железнодорожным стрелочным электроприводом на программируемых логических интегральных схемах // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС). 2022. № 2. С. 32–39. DOI: 10.31114/2078-7707-2022-2-32-39. ISSN 2078-7707.
11. Ефанов Д. В., Пашуков А. В. Синтез устройств управления напольным технологическим оборудованием железнодорожной автоматики с обнаружением неисправностей на программируемых логических интегральных схемах // Транспорт Урала. 2022. № 2. С. 31–41. DOI: 10.20291/1815-9400-2022-2-31-41. ISSN 1815-9400.
12. Ефанов Д. В., Пашуков А. В. Синтез устройств управления объектами переездной автоматизации на программируемых логических интегральных схемах // Транспорт: наука, техника, управление. 2022. № 10. С. 17–23. DOI: 10.36535/0236-1914-2022-10-3. ISSN 0236-1914.

## References

1. Theeg G., Vlasenko S. Railway Signalling & Interlocking. 3rd edition. Germany, Leverkusen PMC Media House GmbH, 2020. 552 p.
2. Efanov D., Lykov A., Osadchy G. Testing of Relay-Contact Circuits of Railway Signalling and Interlocking. Proceedings of the 15th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2017), Novi Sad, Serbia, September 29 – October 2, 2017. Pp. 242–248. DOI: 10.1109/EWDTS.2017.8110095.
3. Lupal N. V. Devices of signals and interlocking on the railways of the Russian Empire [Ustroystva signalizatsii, tsentralizatsii i blokirovki na zheleznykh dorogakh Rossiyskoy imperii]. Ed. by V. V. Sapozhnikov, Vl. V. Sapozhnikov, D. V. Efanov. St. Petersburg, Science, 2020. 159 p.
4. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. Vl., Khristov Kh. A., Gavzov D. V. Methods of constructing safe microelectronic systems of railway automation [Metody postroeniya bezopasnykh mikroelektronnykh sistem zheleznodorozhnoy avtomatiki]. Ed. by Vl. V. Sapozhnikov. Moscow, Transport, 1995. 272 p.
5. Bestemyanov P. F. Methods of ensuring the safety of hardware of microprocessor-based train control systems [Metody obespecheniya bezopasnosti apparatnykh sredstv mikroprotsessornykh sistem upravleniya dvizheniem poezdov]. Russian Electrical Engineering. 2020. No. 9. Pp. 2–8. ISSN 0013-5860.
6. Dobiáš R., Kubátová H. FPGA Based Design of Railway's Interlocking Equipment. Proceedings of EUROMICRO Symposium on Digital System Design, Rennes, France, 2004. Pp. 467–473. DOI: 10.1109/DSD.2004.1333312.
7. Borecky J., Kubalik P., Kubatova H. Reliable Railway Station System Based on Regular Structure Implemented in FPGA. 12th Euromicro Conference on Digital System Design, Architectures, Methods and Tools, Patras, Greece, August 27–29, 2009. Pp. 348–354. DOI: 10.1109/DSD.2009.210.
8. Kabetskiy A. G., Markov D. S. Methods and tools for constructing logic devices of electric interlocking based on programmable logic integrated circuits [Metody i instrumental'nye sredstva postroeniya logicheskikh ustroystv elektricheskoy tsentralizatsii na baze programmiruemykh logicheskikh integral'nykh skhem]. Proceedings of Petersburg Transport University. 2010. No. 2. Pp. 168–173. ISSN 1815-588X.
9. Pashukov A. V. Synthesis of control devices for objects of floor-level automation of railway transport on field-programmable gate array [Sintez ustroystv upravleniya ob'ektami napol'noy avtomatizatsii zheleznodorozhnogo transporta na programmiruemykh logicheskikh integral'nykh skhemakh]. Problems of development of promising micro- and nanoelectronic systems (MES). 2021. No. 1. Pp. 61–69. DOI: 10.31114/2078-7707-2021-1-61-69. ISSN 2078-7707.
10. Pashukov A. V. Implementation of a control device for a railway switch electric drive on field-programmable gate array [Realizatsiya ustroystva upravleniya zheleznodorozhnym strelochnym elektroprivodom na programmiruemykh logicheskikh integral'nykh skhemakh]. Problems of development of promising micro- and nanoelectronic systems (MES). 2022. No. 2. Pp. 32–39. DOI: 10.31114/2078-7707-2022-2-32-39. ISSN 2078-7707.
11. Efanov D. V., Pashukov A. V. Synthesis of control devices for wayside technological equipment of railway automation with fault detection on FPGA [Sintez ustroystv upravleniya napol'nym tekhnologicheskim oborudovaniem zheleznodorozhnoy avtomatiki s obnaruzheniem neispravnostey na programmiruemykh logicheskikh integral'nykh skhemakh] // Transport of the Urals. 2022. No. 2. Pp. 31–41. DOI: 10.20291/1815-9400-2022-2-31-41. ISSN 1815-9400.
12. Efanov D. V., Pashukov A. V. Synthesis of control devices for level crossing signaling automation objects on field-programmable gate array [Sintez ustroystv upravleniya ob'ektami perezdnoy avtomatizatsii na programmiruemykh logicheskikh integral'nykh skhemakh]. Trans-

13. Ефанов Д. В., Богданов Н. А. Мониторинг параметров рельсовых цепей тональной частоты // Транспорт Урала. 2013. № 1 (36). С. 36–42. ISSN 1815-9400.
14. Efanov D. V., Pashukov A. V., Khóroshev V. V. FPGA Self-Diagnosing and Testable Control Devices for Railway Switch Point // Proceedings of the Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (2023 EIConRus), St. Petersburg, Russia, January 23–27, 2023. St. Petersburg : LETI, 2023. Pp. 66–71.
15. Monitoring System of Vibration Impacts on the Structure of Overhead Catenary of High-Speed Railway Lines / D. Efanov, G. Osadchy, D. Sedykh [et al.] // Proceedings of the 14th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2016), Yerevan, Armenia, October 14–17, 2016. Pp. 201–208. DOI: 10.1109/EWDTS.2016.7807691.
16. Actual State Monitoring of Railway Switch Point Blades Based on RFID Technology / V. Khoroshev, G. Osadchy, D. Efanov [et al.] // Proceedings of the 15th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2017), Novi Sad, Serbia, September 29 – October 2, 2017. Pp. 283–288. DOI: 10.1109/EWDTS.2017.8110084.
17. Kassa E., Saramota J., Skavhaug A. Monitoring of Switches and Crossings/Tracks Using Smart Sensors // Intelligent Quality Assessment of Railway Switches and Crossings, 2021. Pp. 149–166, DOI: 10.1007/978-3-030-62472-9\_9.
18. Ефанов Д. В., Хорошев В. В., Осадчий Г. В. Концептуальные основы синтеза безопасных систем управления движением поездов // Мир транспорта. 2022. Т. 20. № 3 (100). С. 50–57. DOI: 10.30932/1992-3252-2022-20-3-6. ISSN 1992-3252.
19. Сапожников В. В., Сапожников Вл. В. Методы синтеза надежных автоматов. Ленинград : Энергия, 1980. 93 с.
20. Сапожников Вл. В. Синтез систем управления движением поездов на железнодорожных станциях с исключением опасных отказов. Москва : Наука, 2021. 229 с.
21. Dincel E., Eris O., Kurtulan S. Automata-Based Railway Signaling and Interlocking System Design [Testing Ourselves] // IEEE Antennas and Propagation Magazine. 2013. Vol. 55. No. 4. Pp. 308–319. DOI: 10.1109/MAP.2013.6645212.
22. Gordon M. A., Vasilenko P. A., Sedykh D. V. Synthesis of Full Functional Check Programs for Train Traffic Management Systems on a Railway Station // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1680. Issue 1. Pp. 012013. DOI: 10.1088/1742-6596/1680/1/012013.
23. The using of electronic document management tools of technical documentation for the assessment of the life of the train traffic control devices / D. Sedykh, D. Zuyev, M. Vasilenko [et al.] // 2019 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2019), Batumi, September 13–16, 2019. DOI: 10.1109/EWDTS.2019.8884426.
24. Автоматизация составления таблиц маршрутов / М. Н. Василенко, М. А. Гордон, Р. А. Ковалев, Д. В. Седых // Автоматика, связь, информатика. 2017. № 5. С. 16–20. ISSN 0005-2329.
- port: science, equipment, management. 2022. No. 10. Pp. 17–23. DOI: 10.36535/0236-1914-2022-10-3. ISSN 0236-1914.
13. Efanov D. V., Bogdanov N. A. Monitoring of audio frequency track circuit parameters [Monitoring parametrov rel'sovykh tsepey tonal'noy chastoty]. Transport of the Urals. 2013. No. 1 (36). Pp. 36–42. ISSN 1815-9400.
14. Efanov D. V., Pashukov A. V., Khóroshev V. V. FPGA Self-Diagnosing and Testable Control Devices for Railway Switch Point. Proceedings of the Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (2023 EIConRus), St. Petersburg, Russia, January 23–27, 2023. St. Petersburg, LETI, 2023. Pp. 66–71.
15. Efanov D., Osadchy G., Sedykh D. [et al.]. Monitoring System of Vibration Impacts on the Structure of Overhead Catenary of High-Speed Railway Lines. Proceedings of the 14th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2016), Yerevan, Armenia, October 14–17, 2016. Pp. 201–208. DOI: 10.1109/EWDTS.2016.7807691.
16. Khoroshev V., Osadchy G., Efanov D. [et al.]. Actual State Monitoring of Railway Switch Point Blades Based on RFID Technology. Proceedings of the 15th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2017), Novi Sad, Serbia, September 29 — October 2, 2017. Pp. 283–288. DOI: 10.1109/EWDTS.2017.8110084.
17. Kassa E., Saramota J., Skavhaug A. Monitoring of Switches and Crossings/Tracks Using Smart Sensors. Intelligent Quality Assessment of Railway Switches and Crossings, 2021. Pp. 149–166, DOI: 10.1007/978-3-030-62472-9\_9.
18. Efanov D. V., Khoroshev V. V., Osadchy G. V. Conceptual foundations of synthesis of safe train traffic control systems [Konseptual'nyye osnovy sinteza bezopasnykh sistem upravleniya dvizheniem poezdov]. World of Transport and Transportation. 2022. Vol. 20. No. 3 (100). Pp. 50–57. DOI: 10.30932/1992-3252-2022-20-3-6. ISSN 1992-3252.
19. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. Vl. Methods of synthesis of reliable finite state machine [Metody sinteza nadezhnykh avtomatov]. Leningrad, Energy, 1980. 93 p.
20. Sapozhnikov V. Vl. Synthesis of train traffic control systems at railway stations with the exception of dangerous failures [Sintez sistem upravleniya dvizheniem poezdov na zheleznodorozhnykh stantsiyakh s isklyucheniem opasnykh otkazov]. Moscow, Science, 2021. 229 p.
21. Dincel E., Eris O., Kurtulan S. Automata-Based Railway Signaling and Interlocking System Design [Testing Ourselves]. IEEE Antennas and Propagation Magazine. 2013. Vol. 55. No. 4. Pp. 308–319. DOI: 10.1109/MAP.2013.6645212.
22. Gordon M. A., Vasilenko P. A., Sedykh D. V. Synthesis of Full Functional Check Programs for Train Traffic Management Systems on a Railway Station. Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1680. Issue 1. Pp. 012013. DOI: 10.1088/1742-6596/1680/1/012013.
23. Sedykh D., Zuyev D., Vasilenko M. [et al.]. The using of electronic document management tools of technical documentation for the assessment of the life of the train traffic control devices. 2019 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2019), Batumi, September 13–16, 2019. DOI: 10.1109/EWDTS.2019.8884426.
24. Vasilenko M. N., Gordon M. A., Kovalev R. A., Sedykh D. V. Automation of designing of route tables [Avtomatizatsiya sostavleniya tablits marshrutov]. Automation, communication, informatics. 2017. No. 5. Pp. 16–20. ISSN 0005-2329.

Объем статьи 0,95 авторских листа

УДК 656.078:656.223

**Виталий Сергеевич Колокольников**, доктор технических наук, профессор кафедры «Управление эксплуатационной работой» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,  
**Наталья Вячеславовна Кашеева**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление эксплуатационной работой» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,  
**Николай Евгеньевич Окулов**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление эксплуатационной работой» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПАССАЖИРСКИХ ПЕРЕВОЗОК ГОРОДСКИМ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫМ ТРАНСПОРТОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ

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

**Natalya Vyacheslavovna Kashheeva**, PhD in Engineering, Associate Professor, Operations Management Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,

**Nikolay Evgenyevich Okulov**, PhD in Engineering, Associate Professor, Operations Management Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia

### Optimization of passenger service by urban rail using simulation models

#### Аннотация

В последнее время активно проектируются и вводятся в эксплуатацию городские рельсовые транспортные системы на основе железнодорожной сети. В статье рассмотрены особенности организации пассажирских городских железнодорожных перевозок, приведены примеры расчета и оптимизации железнодорожных узлов с использованием аппарата имитационного моделирования.

**Ключевые слова:** пассажирские перевозки, тактовое движение, пропускная способность, железнодорожный узел

#### Abstract

Recently, urban rail transport systems based on the railway network have been actively designed and put into operation. The article discusses the features of organization of urban passenger rail service, provides examples of calculation and optimization of railway junctions using the simulation modeling apparatus.

**Keywords:** passenger service, clock traffic, capacity, railway junction

DOI: 10.20291/1815-9400-2023-3-64-68

**Р**ост городского населения неизбежно порождает потребность в новом строительстве. В результате площадь городов и агломераций увеличивается, а значит, повышается роль транспортного обслуживания. Как показывает мировой опыт, обеспечить городские перевозки только за счет личного транспорта невозможно. Сегодня необходимым условием для существования и развития современного, комфортно для жизни города является надежный общественный транспорт [1] — пневмоколенный (автобус, троллейбус) и рельсовый (трамвай, метрополитен, железная дорога). Наиболее массовые перевозки пассажиров эффективнее осуществлять рельсовыми видами транспорта [2].

Во всех российских городах-миллионниках (кроме Воронежа, в котором трамвайное сообщение было ликвидировано в 2009 г.) эксплуатируются трамвайные системы. Большинство этих систем обеспечивает маршрутную скорость в диапазоне 10–15 км/ч, хотя некоторые из них требуют глубокой модернизации и не способны развивать такую скорость. Но даже лучшие зарубежные примеры городского трамвая\* не могут достигать маршрутной скорости выше 18–20 км/ч из-за большого количества остановок и многочисленных перекрестков на улично-дорожной сети. Для городов с большой площадью такая скорость не покрывает потребностей населения.

В наиболее крупных мегаполисах России помимо трамвая используется и такой вид рельсового транспорта, как метро, но его сооружение и эксплуатация весьма дорогостоящи и экономически оправданы лишь в Москве и Санкт-Петербурге [3].

\* Не считая скоростного, требования к которому значительно выше.

Даже при наличии метрополитена (Казань, Нижний Новгород, Самара, Екатеринбург, Новосибирск) он покрывает не всю площадь города, а лишь одно-два направления (т.е. действуют одна-две линии метро).

Таким образом, в городах с населением 1–2 млн чел. существует проблема недостаточного обеспечения населения скоростным пассажирским транспортом.

Вместе с тем в каждом российском миллионнике имеет обширная сеть железных дорог, которая по большей части была создана в советское время. Это пути общего и необщего пользования, которые использовались тогда весьма интенсивно, а их пропускная способность была очень большой. В настоящее время многие из этих путей загружены слабо. Причины заключаются в следующем: для транзитного грузового движения построены железнодорожные обходы узлов; многие промышленные предприятия в результате активного развития грузового автотранспорта отказались от услуг железной дороги, в связи с чем объемы местной работы сократились; доступность личного автотранспорта для городских жителей привела к снижению объемов пригородного железнодорожного движения, а развитие авиаперевозок вызвало уменьшение размеров дальнего пассажирского сообщения. Все перечисленные факторы обусловили снижение загрузки железнодорожной инфраструктуры в пределах города. Некоторые пути необщего пользования оказались заброшенными или застроенными, инфраструктура общего пользования сохранилась, но из-за сокращения размеров движения имеет значительные резервы пропускной способности.

В том числе разветвленная железнодорожная сеть может быть приспособлена для организации пассажирских перевозок во внутригородском сообщении. В этом отношении железная дорога обладает рядом весомых преимуществ:

многие линии совпадают с направлением мощных пассажиропотоков;

магистральные линии, как правило, пересекаются с автотрассами в разных уровнях, в противном же случае поезд пользуется преимуществом на железнодорожном переезде;

в отличие от улично-дорожной сети, на железной дороге отсутствуют заторы, а четкое соблюдение графика движения поездов дает возможность пассажирам точно прогнозировать время поездки;

железная дорога обеспечивает высокие ходовые скорости по сравнению с остальным наземным городским пассажирским транспортом.

Указанные преимущества позволяют быстро перемещать городским железнодорожным транспортом большое количество пассажиров на значительные расстояния. Вместе с тем имеется и ряд существенных особенностей, которые накладывают определенные ограничения:

для обеспечения высокой маршрутной скорости остановочные пункты не должны располагаться слишком часто;

как правило, инфраструктура, кроме пассажирского городского сообщения, должна обеспечивать грузовые, дальние и пригородные пассажирские перевозки;

для того чтобы транспорт пользовался популярностью у населения, должна соблюдаться регулярность и частота перевозок.

С учетом этих особенностей можно сформулировать ряд основных (с точки зрения организации движения) требований, предъявляемых к городскому пассажирскому железнодорожному транспорту.

1. Строительство транспортно-пересадочных узлов в местах размещения остановочных пунктов. Должна быть обеспечена быстрая и удобная пересадка с городских и пригородных поездов на городской наземный пассажирский транспорт.

2. Обеспечение тактового движения городских поездов. Пассажиры не должны подстраивать свои планы под расписание поездов, иначе они не будут воспринимать поезд как городской транспорт, следовательно, пассажиропоток будет низким. Величина такта должна составлять 30 мин и менее в зависимости от размера пассажиропотока.

3. Для обеспечения такта городских поездов пропуск остальных (дальних и пригородных пассажирских, грузовых) должен быть согласован во времени при условии их движения по общим путям.

4. В зависимости от интенсивности движения городских поездов требуется соответствующее развитие инфраструктуры станций их оборота.

5. При запуске маршрутов городских поездов по путям необщего пользования необходимы согласования с владельцами этих путей.

В настоящее время в нескольких городах уже проектируются городские железнодорожные пассажирские маршруты. Для оценки эффективности предпроектных проработок используется метод имитационного моделирования, преимущества которого [4] позволяют выполнить такую оценку в короткие сроки и с достаточным обоснованием.

Во-первых, как следует из технологии разработки модели и проведения исследования [5], в процессе работы определяются необходимые для реализации проекта комплексные мероприятия.

Во-вторых, сама собой выстраивается этапность реконструкции, если таковая потребует. Поскольку потоки в модели нарастают постепенно, то каждая итерация расчета показывает загрузку элементов и иные показатели, позволяющие судить о достаточности пропускной способности или возникновении ее дефицита [6]. Как только пропускная способность одного или нескольких элементов становится исчерпанной либо другие показатели выходят за допустимые границы [7], принимается решение о развитии «узкого места».

В-третьих, по каждому варианту расчета формируется доказательная база, включающая количественные и качественные показатели, графики исполненного движения и работы станций (рис. 1–4). На этом основании можно сравнивать варианты, находить рациональные и выполнять для них экономическую оценку.

С применением метода имитационного моделирования выполнена оценка проектов развития городского пассажирского железнодорожного сообщения в четырех крупных узлах. Планировалась организация радиально-кольцевого движения по 3–5 маршрутам с интервалами от 20 до 40 мин. Модели узлов построены с использованием структурно-функционального подхода [8], но, несмотря на кажущуюся схожесть решаемой задачи, полученные результаты в разных узлах кардинально отличались:

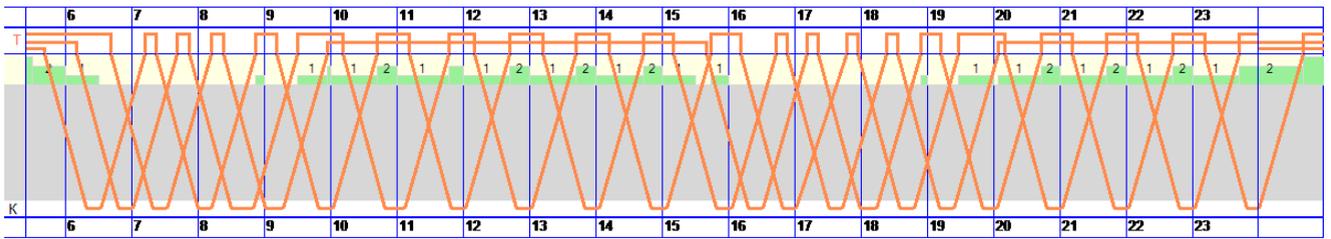


Рис. 1. График оборота городских электропоездов

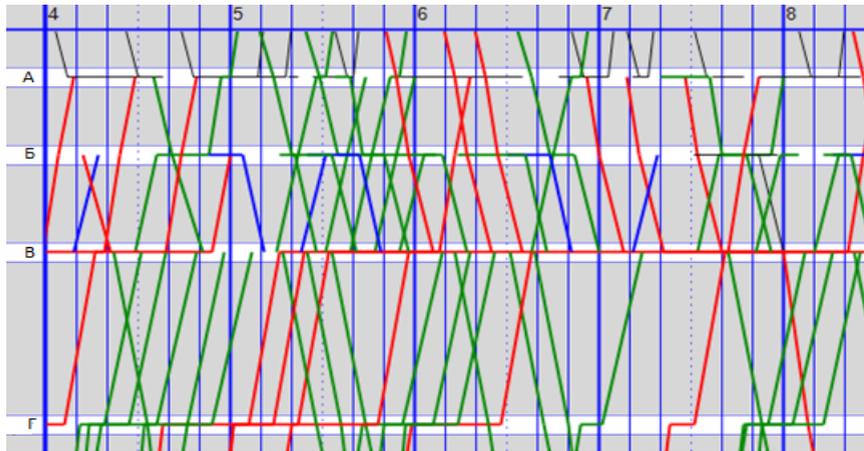


Рис. 2. Фрагмент графика движения поездов в узле

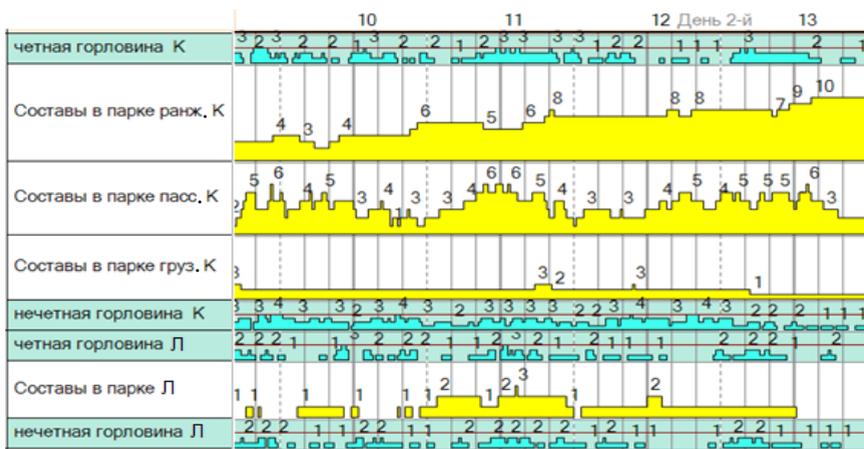


Рис. 3. Структура занятости элементов узла в динамике

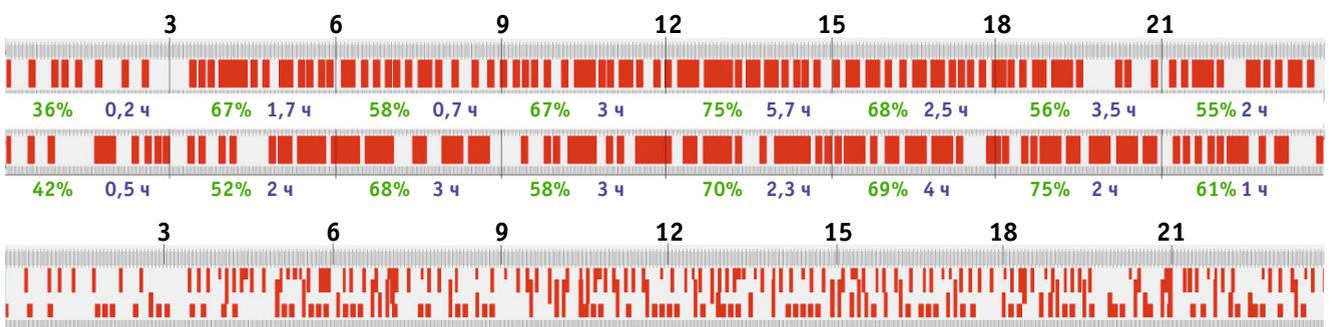


Рис. 4. Загрузка перегона и горловин станций

объемом необходимых мероприятий; экономической эффективностью проекта;

принципиальной возможностью реализации отдельных маршрутов.

В целом объем мероприятий определялся первоначальной оснащенностью участка и размерами движения. На отдельных участках резервы пропускной способности позволяли запустить городское пассажирское движение без реконструкции. На других требовалось проведение различных мероприятий, начиная от реконструкции устройств сигнализации, централизации и блокировки (для уменьшения межпоездных интервалов) и заканчивая строительством двухпутных вставок и дополнительных главных (вторых, третьих) путей на перегонах. Безусловно, необходимо и развитие станционной инфраструктуры, прежде всего приемо-отправочных путей для отстоя и оборота поездов и пассажирских платформ. Однако в ряде случаев дополнительно обеспечивали необходимые прироста пропускной способности, поскольку ограничения возникали в горловинах станций (невозможность укладки съездов либо недостаток приемо-отправочных путей).

В нескольких случаях очевидное, казалось бы, мероприятие, от реализации которого ожидали большого эффекта, на-

оборот, оказывалось ненужным. Дополнительные соединительные пути вызывали критическую враждебность маршрутов в горловинах, тем самым только снижая пропускную способность. Аналогичные аналитические расчеты и экспертная оценка показывали противоположный результат — увеличение пропускной способности, но в итоге без наглядного и должного обоснования они оказались неубедительными [9]. Все это лишний раз доказало, что расчет сложных транспортных объектов корректно можно выполнить только на имитационных моделях [10].

Стоимость реализации отдельных мероприятий (как правило, строительство путепроводных развязок) нередко вывело капитальные затраты на чрезвычайно высокий уровень, делая реализацию проекта нецелесообразной, поскольку в условиях плотной городской застройки строительство развязки привело бы к сносу зданий и сооружений. Однако для ряда узлов на модели были найдены другие, менее дорогостоящие, мероприятия, позволяющие организовать перевозку пассажиров. Одно из них — отказ от организации сквозного маршрута, который на начальном и конечном участках дублирует два других, и его замена на челночное движение. В точках соприкосновения маршрутов предложено строительство транспортно-пересадочных узлов (рис. 5).

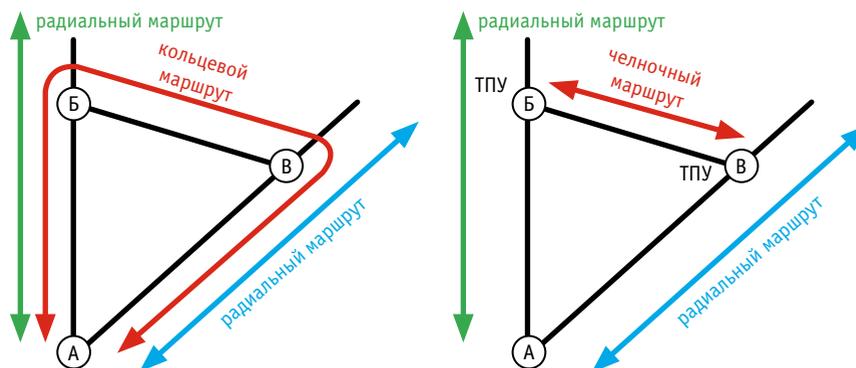


Рис. 5. Замена сквозного маршрута на челночный

Наиболее интенсивные перевозки пассажиров выполняются в часы пик. В это время в крупных агломерациях такие виды сообщений, как городское, пригородное и межобластное, дублируют друг друга. Менее всего этому подвержено дальнее сообщение. В пиковые периоды практически во всех узлах возникает дефицит пропускной способности. Инфраструктуры, спроектированной для регулярного дневного движения, в утренние и вечерние часы недостаточно, причем иногда потребность в инфраструктуре удваивается. В этих условиях грузовое движение (при использовании общей инфраструктуры), как правило, необходимо выносить за пределы часов пик. Однако для накопления грузовых поездов, поступающих в часы пик, может потребоваться строительство

дополнительных емкостей путевого развития предузловых станций. Пассажирские поезда дальнего следования в часы пиковых перевозок необходимо встраивать в тактовые графики городских перевозок с изменением времени пропуска по смежным участкам.

Выполненные работы по моделированию городского рельсового железнодорожного транспорта показали высокую эффективность, позволили снизить инвестиционные риски, найти и обосновать мероприятия, которые гарантированно обеспечат необходимую пропускную способность. В целом полученные результаты свидетельствуют о широких перспективах использования имитационного моделирования для оценки проектов развития железнодорожного транспорта в городских агломерациях.

## Литература

1. Николаев К. Ю. Технологические параметры, функциональная надежность и эффективность методов интеграции железнодорожной инфраструктуры в пассажирские транспортные системы городских агломераций (на примере транспортной системы «трамвай — поезд»): диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Екатеринбург, 2021. 215 с.
2. Ludwig D., Drechsler G. Mit der Stadtbahn auf Bundesbahnstrecken // Eisenbahntechnische Rundschau. 1991. No. 40 (8). S. 489–496.
3. Кондратенко В. В. Модернизация железнодорожных станций и узлов как фактор улучшения пассажирских перевозок в крупных городах России: диссертация на соискание ученой степени кандидата экономических наук. Москва, 2010. 155 с.
4. Козлов П. А. О методах расчета систем железнодорожного транспорта // Железнодорожный транспорт. 2014. № 12. С. 28–32. ISSN 0044-4448.

## References

1. Nikolaev K. Yu. Technological parameters, functional reliability and efficiency of methods for integrating railway infrastructure into passenger transport systems of urban agglomerations (using the example of the tram — train transport system) [Tehnologicheskie parametry, funktsional'naya nadezhnost' i effektivnost' metodov integratsii zheleznodorozhnoy infrastruktury v passazhirskie transportnye sistemy gorodskikh aglomeratsiy (na primere transportnoy sistemy «tramvay — poezd»)]. PhD in Engineering Thesis. Ekaterinburg, 2021. 215 p.
2. Ludwig D., Drechsler G. Mit der Stadtbahn auf Bundesbahnstrecken Eisenbahntechnische Rundschau. 1991. No. 40 (8). Pp. 489–496.
3. Kondratenko V. V. Modernization of railway stations and junctions as a factor in improving passenger transportation in major cities of Russia [Modernizatsiya zheleznodorozhnykh stantsiy i uzlov kak faktor uluchsheniya passazhirskikh perevozk v krupnykh gorodakh Rossii]. PhD in Economics Thesis. Moscow, 2010. 155 p.
4. 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.

5. Козлов П. А., Колокольников В. С., Тушин Н. А. О технологии расчета железнодорожных станций // Железнодорожный транспорт. 2017. № 6. С. 42–46. ISSN 0044-4448.
6. 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.
7. Мишарин А. С., Кашеева Н. В. Интерактивное исследование проектируемых железнодорожных станций // Транспорт Урала. 2014. № 2 (41). С. 3–6. ISSN 1815-9400.
8. Козлов П. А., Колокольников В. С. О согласованном структурно-функциональном построении железнодорожных станций // Наука и техника транспорта. 2017. № 3. С. 106–110. ISSN 2074-9325.
9. Козлов П. А., Колокольников В. С., Тушин Н. А. О загрузке стрелок и пропускной способности горловин // Транспорт Урала. 2016. № 4 (51). С. 3–7. DOI: 10.20291/1815-9400-2016-4-3-7. ISSN 1815-9400.
10. Козлов П. А., Осokin О. В., Колокольников В. С. Исследование проектов развития железнодорожных станций и полигонов с использованием аппарата имитационного моделирования // Железнодорожный транспорт. 2018. № 6. С. 12–16. ISSN 0044-4448.

Объем статьи 0,57 авторских листа

УДК 629.4.015:625.1.03

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

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

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

## ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗНОШЕННОГО ПРОФИЛЯ ПОВЕРХНОСТИ КАТАНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО КОЛЕСА С ПОМОЩЬЮ КРИВЫХ ИЗНОСА

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

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

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

### Investigation of a railway wheel rolling surface worn profile using wear curves

#### Аннотация

На основе данных, полученных при вычислении кривизны и радиуса изношенного профиля, а также углов наклона касательной к нему при различном прокате, рассмотрена уточненная модель износа. С этой целью построены дополнительные графики износа по профилю катания, учтен весьма сложный характер износа контактирующих поверхностей колеса и рельса при различном расположении точек отсчета. Оценены погрешности расчетов, скорректированы вычисляемые параметры, такие как износ в различных точках. Для дальнейших исследований теоретического характера использованы аналитические выражения, на основе которых построены графические зависимости. Расчеты выполнены при помощи метода конечных разностей, дана оценка погрешности вычислений. Наряду с этим использован табличный метод представления значительного количества данных. Публикуемая статья будет полезна для понимания сложности процессов и количественной оценки взаимодействия колеса и рельса в контакте.

**Ключевые слова:** износ, радиус кривизны, профиль катания, аппроксимация, аналитическое уравнение

#### Abstract

Based on the data obtained by calculating the curvature and radius of the worn profile, as well as the angles of inclination of the tangent to it at different rolling, a refined wear model is considered. For this purpose, additional wear graphs are constructed according to the rolling profile, taking into account the very complex nature of the wheel and rail contacting surface wear at different locations of the reference points. Calculation errors are estimated, calculated parameters such as wear at various points are corrected. For further research of the theoretical nature, analytical expressions are used, on the basis of which graphical dependencies are constructed. The calculations are performed using the finite difference method, and the calculation error is estimated. Along with this, a tabular method of presenting a significant amount of data was used. The published article will be useful for understanding the complexity of the processes and quantifying the interaction between the wheel and rail in contact.

**Keywords:** wear, radius of curvature, rolling profile, approximation, analytical equation

DOI: 10.20291/1815-9400-2023-3-69-74

Для того чтобы установить характер изменения радиуса кривизны по профилю катания, необходимо иметь значения износа  $z$  в точках, не только отстоящих друг от друга на 10 мм, но и значительно чаще, например  $\Delta y = 2,5$  мм [1–4]. С этой целью, используя значения  $z$  износа, указанные нами в табл. 1 [1], наносим их в системе координат  $z - y$  и полученные точки соединяем плавной кривой.

На рис. 1 ординаты  $z$  представляют собой следующие значения:

в сечениях 1–8

$$z = z_{\text{изн}} + z_{\text{укл}} = z_{\text{изн}} + (|y| - 30) \cdot \frac{1}{7} + 52,25 \cdot \frac{1}{20};$$

в сечениях 3–8

$$z = z_{\text{изн}} + (22,25 - y) \cdot \frac{1}{20};$$

в сечениях 8–10

$$z = z_{\text{изн}} - z_{\text{кр}} = z_{\text{изн}} - (14,9813 - \sqrt{225 - (y - 21,5)^2}).$$

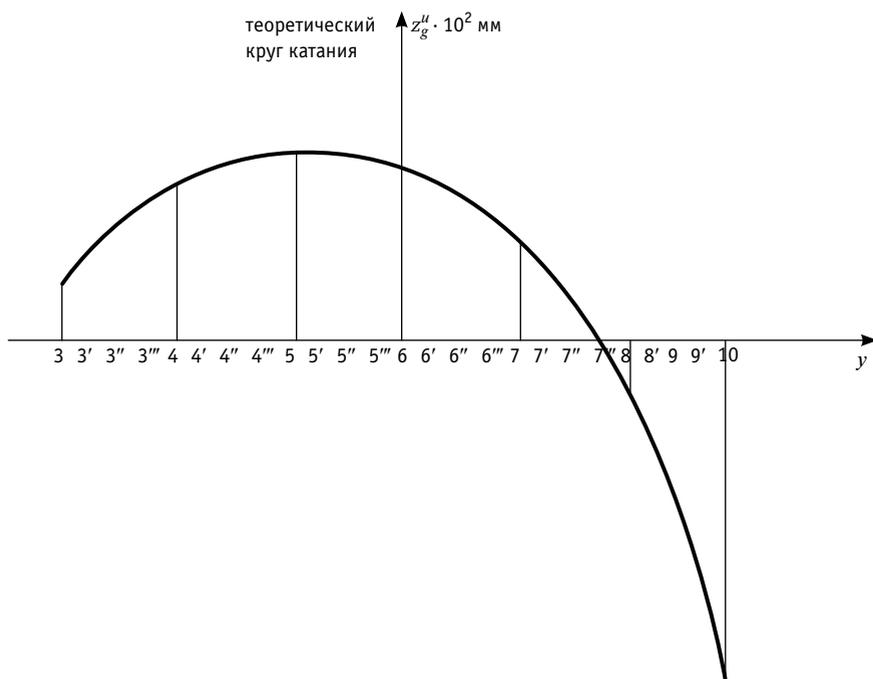


Рис. 1. Значения величин износа колеса с учетом уклона рельса

Начало координат помещено в точке 6, расположенной в плоскости теоретического круга катания. Координатная ось  $y$  проведена параллельно оси колесной пары через точку  $K$  касания прямой уклона 1:20 с выкружкой гребня ( $r_T = 15$  мм) нового колеса. Положение точки  $K$  определено аналитически, и  $y_K = 22,25$  мм по рис. 2. Значения  $z$  не только в точках замера, но и в промежуточных с шагом  $\Delta y = 2,5$  мм приведены в табл. 1. Там же даны значения радиусов кривизны изношенного профиля (с  $\Pi = 2,5$  мм), найденные по формуле

$$r = \frac{1}{z''} = \frac{(\Delta y)^2}{z_{i+1} - 2z_i + z_{i-1}},$$

используемой в [1], при шаге  $\Delta y = 2,5$  мм и  $\Delta y = 5,0$  мм.

На участке между сечениями 2'–3'' кривая износа имеет точки перегиба, и вычисления сделаны только при шаге

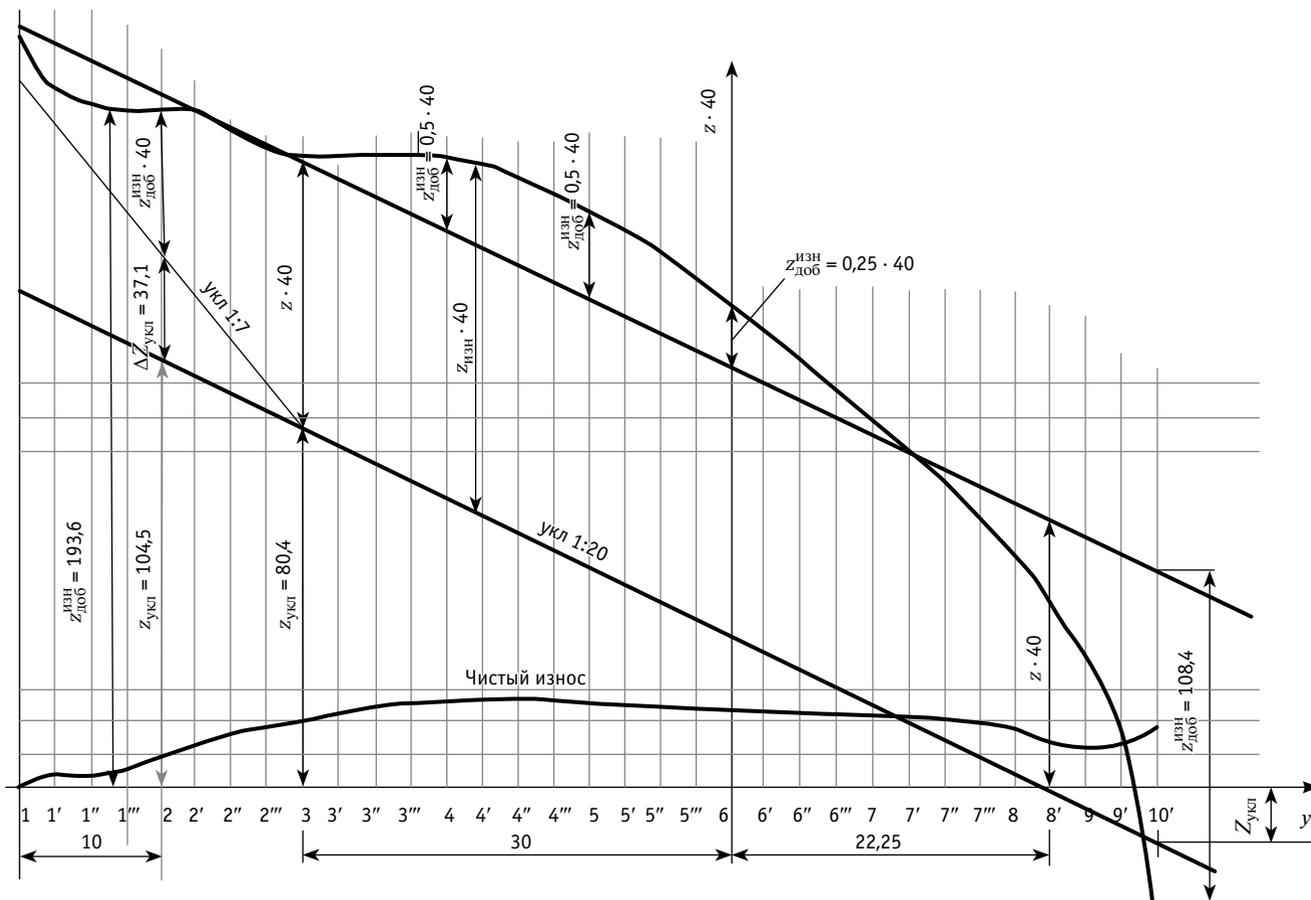


Рис. 2. Значения величин износа колеса

$\Delta y = 2,5$  мм. Значения радиусов  $r$  в одной и той же точке зависят от шага  $\Delta y$ . Обращает на себя внимание такая особенность: если в одной точке  $z_{\Delta y=2,5} > z_{\Delta y=5}$ , то в соседней точке наоборот. Очевидно, в кривой износа имеется периодичность, которую при вычислении через конечные разности установить не удастся. К тому же погрешность вычисления  $r$  при шаге  $\Delta y = 2,5$  мм весьма существенная.

Для упрощения вычислений и увеличения точности в дальнейшем всюду будем пользоваться кривой износа (см. рис. 1). На ней линия отсчета (она же и координатная ось  $y$  в дальнейших расчетах) параллельна прямой 1:20 нового профиля и смещена на 2 мм. Ординаты этой кривой вычислены по формулам:

на участке 3–8

$$z_{0и} = z_{изн} - 2;$$

на участке 8–10

$$z_{0и} = z_{изн} - 2 + (y - 22,25) - z_{кр}.$$

Здесь выражение  $z_{кр} = 14,9813 - \sqrt{15^2 - (y - 21,5)^2}$  учитывает ординаты и выкружку гребня, начальный радиус которой  $r_r = 15$  мм.

Теперь о точности вычислений радиусов кривизны изношенного профиля с помощью кривой износа по рис. 2.

Для уточнения расчетов следует верхнюю наклонную принять за линию отсчета. Опытные значения величин  $z$  износа известны лишь в точках, отстоящих на 10 мм, за исключением выкружки гребня. По этим данным весьма трудно построить довольно достоверную кривую износа. Для частичного преодоления этих трудностей и необходимо строить две кривые в разных масштабах и наклонах (см. рис. 1 и 2).

Они позволили откорректировать значения  $z_{изн}$  в промежуточных точках (отмеченных штрихами 1', ..., 2'', ..., 3''' и т.д. и удаленных друг от друга уже на 2,5 мм), соблюсти непрерывность, плавность и характер кривых.

Все дальнейшие расчеты основаны на предположении, что приведенные в табл. 1 опытные значения износа [1] определены с точностью до тысячной доли миллиметра [5–8]. При нанесении

Ординаты кривой износа и радиусы ее кривизны

№ точки	Координата $y$ , мм	$z = z_{изн} + z_{укл}$ , мм	$r = \frac{(\Delta y)^2}{z_{i+1} - 2z_i + z_{i-1}}$ , мм	
			$\Delta y = 2,5$ мм	$\Delta y = 5$ мм
1	-50	5,5696	-	-
1'	-47,5	5,3004	116	-
1''	-42,45	4,9382	125	120
1'''	-45	5,0853	92	104
2	-40	4,8411	157	132
2'	-37,5	4,7838	104	-
2''	-35	4,7867	-125	-
2'''	-32,5	4,7396	-208	-
3	-30	4,6625	96	-
3'	-27,5	4,6505	781	-
3''	-25	4,6465	-250	-
3'''	-20	4,5625	-260	-278
4	-22,5	4,6175	-240	-248
4'	-17,5	4,4835	-391	-362
4''	-15	4,3885	-481	-510
4'''	-12,5	4,2805	-891	-735
5	-10	4,1655	-893	-781
5'	-7,5	4,0435	-568	-694
5''	-5	3,9105	-893	-581
5'''	-2,5	3,7705	-347	-391
6	0	3,6125	-298	-287
6'	2,5	3,4335	-231	-281
6''	5	3,2275	-446	-312
6'''	7,5	3,0075	-250	-338
7	10	2,7625	-625	-431
7'	12,5	2,5075	-481	-472
7''	15	2,2395	-368	-368
7'''	17,5	1,9545	-298	-165
8	20	1,6785	-68	-71
8'	22,5	1,2500	-42	-46
9	25	0,7047	-39	-29
9'	27,5	0,000	-16	-
10	30	-1,0971	-	-

ординат  $z_{доп}^{изн} - 2$  мм для построения кривой износа на рис. 1 вполне допустима ошибка  $\pm 0,1$  мм. При стократном увеличении масштаба рис. 1 ординаты во всех точках будут найдены с максимальной погрешностью  $\pm 0,001$  мм.

Тогда абсолютная ошибка при вычислении  $\Delta z_i = (z_{i+1} - z_{i-1})$  и  $\Delta^2 z_i = -2z_i + z_{i+1} + z_{i-1}$  будет соответственно  $\delta(\Delta z) = \pm 2 \cdot 0,001$  мм и  $\delta(\Delta^2 z) = \pm 4 \cdot 0,001$  мм.

Относительная ошибка при вычислении производных

$$\varepsilon(z') = \frac{\delta(z')}{z'} = \frac{\delta\left(\frac{\Delta z}{2\Delta y}\right)}{\frac{\Delta z}{2\Delta y}} = \pm \frac{0,002}{\Delta z};$$

$$\varepsilon(z'') = \frac{\delta(z'')}{z''} = \pm \frac{0,004}{\Delta^2 z}$$

тем больше, чем меньше шаг  $\Delta y$ . При этом первая производная (или тангенс угла наклона касательной к кривой износа) вычисляется значительно точнее, чем кривизна (почти в 10 раз). В табл. 2 приведены для точки 8' значения  $z'$  и  $z''$  и относительные их ошибки, обусловленные точностью определения  $z_{\text{доп}}^{\text{ИЗН}}$  по рис. 2. Здесь же приведены поправочные коэффициенты  $K_i = (1 + (z'_i)^2)^{\frac{3}{2}}$ , на которые надо умножать ранее найденные величины  $r_i \approx \frac{1}{z''_i}$ , чтобы учесть влияние первой производной. Даже при больших углах наклона кривой износа влияние первой производной  $z'$  на величину  $r$  мало и в дальнейшем не учитывается.

Таблица 2

Оценка параметров определения радиуса кривизны в точке 8'

Определяемая величина	Шаг $\Delta y$ , мм		
	2,5	5,0	7,5
$z' = \frac{\Delta z}{2\Delta y}$	-0,1388	-0,1455	-0,1725
$\pm \varepsilon(z')$	0,00288	0,00137	0,00077
$z'' = \frac{\Delta^2 z}{(\Delta y)^2}$	-0,02368	-0,02188	-0,02416
$\pm \varepsilon(z'')$	0,0270	0,0073	0,0029
$K_i = (1 + (z'_i)^2)^{\frac{3}{2}}$	1,029	1,032	1,045

На точность вычислений методом конечных разностей, особенно при малом шаге, большее влияние оказывают даже тысячные доли миллиметра [2]. Оценить же погрешность самого метода конечных разностей можно только сопоставлением со значениями  $z'$  и  $z''$  (или  $r$ ), вычисленными аналитически. Для этой цели подберем аналитическое уравнение, которое бы с достаточно высокой точностью позволило аппроксимировать «опытную» кривую износа, представленную на рис. 1 в работе [1].

Вид кривой на рис. 1 показывает, что для ее аппроксимации на участке 3–10 можно попытаться взять уравнение параболы

$$z''_0 = ay^2 + by + c. \quad (1)$$

Значения  $y$  образуют арифметическую прогрессию с разностью  $h = 2,5$  мм. Запишем уравнение (1) для двух соседних точек с  $y = y_i$  и  $y = y_i + h$ :

$$\begin{aligned} z_i &= ay_i^2 + by_i + c; \\ z_{i+1} &= a(y_i + h)^2 + b(y_i + h) + c. \end{aligned}$$

Вычитая первое из второго, имеем

$$\zeta = z_{i+1} - z_i = 2ahy_i + (ah^2 + bh) = E \cdot y_i + D, \quad (2)$$

где  $a, b, c, E, D$  — постоянные, подлежащие определению.

Вычислив по нашим данным (столбец 2 табл. 3) значения  $\zeta$  (столбец 6) и отложив их на графике, убеждаемся, что точки (значения  $\zeta$ ) удовлетворительно располагаются около прямой, за исключением значений  $\zeta_7 - \zeta_{10}$ . Следовательно, для участка 7''–10'' потребуется другое аппроксимирующее уравнение. Вначале из уравнений (2) после их деления на две группы находим постоянные  $E = -0,5962$  и  $D = -6,2190$ , а по ним  $a = -0,1192$  и  $b = -2,190$ . Затем из уравнений вида (1) вычисляем  $c = 47,87$ . Подставляем найденные значения в (1). Тогда уравнение, аппроксимирующее добавочные величины по рис. 1, будет иметь вид

$$10^2 \cdot z_{\text{доб}}^{\text{ИЗН}} = -0,1192 \cdot y^2 - 2,190 \cdot y + 47,870. \quad (3)$$

Полный износ составит  $z = 2 + z_{\text{доб}}^{\text{ИЗН}}$  мм.

Вычисленные по (3) значения  $z_{\text{доб}}^{\text{ИЗН}}$  и отклонения от опытных величин представлены в столбцах 3, 4 табл. 3. Разница между полными опытными и расчетными значениями ординат кривой износа невелика, максимальная величина в точке 6' составляет  $\frac{2,75 \cdot 10^{-2} \cdot 100\%}{2,444} = 1,12\%$ .

Казалось бы, можно этим и ограничиться. Однако при такой аппроксимации кривая износа представляет дугу окружности радиуса  $r \approx 1/z'' = 416$  мм = const — постоянное значение на всем участке 3''–7''. Но даже приближенные вычисления по методу конечных разностей свидетельствуют о сложном характере кривой износа с резко переменным вдоль образующей поверхности катания радиусом  $r(y)$  [9–14]. Учитывая, что тысячные доли миллиметра ординат  $z$  кривой износа существенно влияют на величину  $r$ , следует продолжить подбор аппроксимирующего уравнения. Для этой цели изображаем кривую рис. 3, ординаты которой равны  $\Delta_1 z \cdot 10^2$  мм. Характер этой кривой указывает на то, что она может быть описана уравнением  $\Delta_1 z = a + by + A \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{\alpha} y + \varphi\right)$ .

Постоянные  $a, b, A, \alpha, \varphi$  определяем непосредственно по чертежу. После их вычисления дополнительное уравнение запишем в виде

$$\Delta_1 z \cdot 10^2 = 2,45 \cdot \sin(0,2327 \cdot y + 0,745) + 0,044y + 0,12. \quad (4)$$

Вычисленные по нему значения  $\Delta_1 z \cdot 10^2$  представлены в столбце 5 табл. 3 ( $\Delta_1 z = \Delta_1 z_7^{\text{оп}} - \Delta_1 z_8^{\text{расч}}$ ).

Осредненные значения  $\Delta_2 z$  (столбец 7 табл. 3) можно описать с помощью уравнения

$$\Delta_2 z = -0,000968 \cdot y^2 - 0,01068 \cdot y + 0,1952, \quad (5)$$

постоянные которого были найдены аналогично тому, как это сделано при первой аппроксимации. Расчетные значения  $\Delta_2 z$  по этому уравнению приведены в столбце 8 табл. 3. Суммируя все три уравнения и учитывая, что полная величина износа  $z = 2 + z_0''$ , окончательно получаем следующее расчетное уравнение:

$$z = 2 + (48,1852 - 2,15668y - 0,120168y^2 + 2,45 \times \sin(0,2327 \cdot y + 0,745)) \cdot 10^2. \quad (6)$$

Здесь  $z$  и  $y$  имеют размерность в миллиметрах, начальные координаты расположены в точке 6. Вычисленные по нему значения  $z'$  приведены в столбце 10,

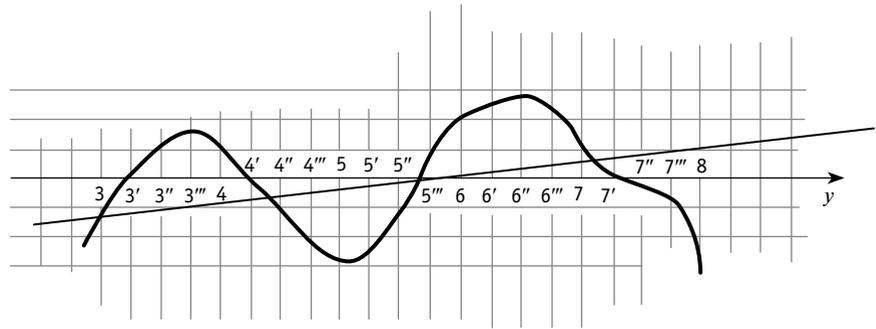


Рис. 3. Данные для аппроксимации, вычисленные по уравнению (4)

а опытные величины  $z''$  — в столбце 9 табл. 3. Разница между ними в процентах по отношению к опытной величине дана в столбце 2 табл. 3. На отрезке 3''–6'' эта разница не превышает 0,08 %,

за исключением точки 5'', в которой она составляет 0,14 %. На участке 6'''–8' и далее к гребню различие между опытными и расчетными значениями постепенно нарастает с 0,12 до 0,98 % в точке 8.

Таблица 3

Исходные и расчетные данные по аппроксимации ординат кривой износа при  $\Pi = 2,5$  мм

№ точки на профиле	z, мм		$\Delta_1 z = z_{оп} - z$	$\Delta_1 z$ по (4)	$\zeta = z_{оп} - z_i$	$\Delta_2 z$	$\Delta_2 z$ по (5)	$z''$	$z'$	Разница, %
	Опытные	Расчетные по (6)								
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
3	5,0	6,20	1,29	-1,08	12,8	-0,37	-0,356	2,050	2,048	0,07
3'	17,8	17,95	-0,15	0,35	11,6	-	-0,243	2,178	2,181	-0,12
3''	29,4	28,12	1,28	1,31	9,0	-0,16	-0,143	2,294	2,293	0,05
3'''	38,4	36,80	1,60	1,52	6,6	-	-0,055	2,384	2,383	0,04
4	45,0	43,99	1,01	0,94	4,6	0,00	0,022	2,450	2,450	0
4'	49,6	49,69	-0,09	-0,107	2,8	-	0,086	2,496	2,496	0
4''	52,4	53,90	-1,50	-1,48	1,8	0,11	0,138	2,524	2,526	-0,06
4'''	54,2	56,62	-2,42	-2,46	1,0	-	0,177	2,542	2,543	-0,04
5	55,2	57,85	-2,65	-2,77	0,3	+0,18	0,205	2,552	2,553	-0,03
5'	55,5	57,57	-2,07	-2,27	-0,9	-	0,221	0,555	2,555	0
5''	54,6	55,84	-1,24	-1,10	-1,4	+0,21	0,224	2,546	2,550	-0,14
5'''	53,2	52,60	0,60	0,40	-3,2	-	0,216	2,532	2,532	0
6	50,0	47,87	2,13	1,78	-5,6	+0,18	0,195	2,500	2,498	0,06
6'	44,4	41,65	2,75	2,61	-7,9	-	0,162	2,444	2,444	0
6''	36,5	33,94	2,56	2,65	-9,5	+0,11	0,118	2,365	2,367	0,08
6'''	27,0	24,74	2,26	1,94	-12,0	-	0,061	2,240	2,267	0,13
7	15,0	14,03	0,97	0,73	-13,0	-0,02	-0,008	2,150	2,148	0,12
7'	2,0	1,87	0,13	-0,53	-14,0	-	-0,090	2,020	0,012	0,37
7''	-12,0	-11,80	-0,20	-1,40	-16,0	-0,20	-0,118	1,880	1,866	0,74
7'''	-28,0	-26,96	-1,04	-1,55	-17,0	-	-0,288	1,720	1,720	0,46
8	-46,4	-43,61	-2,79	-0,895	-18,0	-1,90	-0,406	1,536	1,551	-0,98

## Литература

1. Кротов С. В., Кононов Д. П., Буйносов А. П. Влияние проката колеса грузового вагона на контактно-усталостную долговечность // Транспорт Урала. 2022. № 4 (75). С. 11–15. DOI: 10.20291/1815-9400-2022-4-11-15. ISSN 1815-9400.
2. Кротов С. В., Кононов Д. П., Воробьев А. А. Контакт железнодорожного колеса с рельсом. Казань : Бук, 2023. 146 с.
3. Кротов С. В., Кононов Д. П. Анализ зоны контакта железнодорожного колеса и рельса // Известия ПГУПС. 2022. Т. 19. № 2. С. 221–231. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-19-2-221-231. ISSN 1815-588X.
4. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия. Москва : Мир, 1989. 510 с.
5. Fromm H. Arbeitsverlust, Formänderungen und Schlupf beim Rollen von treibenden und gebremsten Rädern oder Scheiben. Beitrag zur Analyse der Reibungsgasetee. Z. f. techn. Phys. 9 Jg. 1928. 299 s.
6. Пинегин С. В. Контактная прочность и сопротивление качению. Москва : Машиностроение, 1969. 243 с.
7. Кротов С. В., Кононов Д. П. Исследование напряженно-деформированного состояния при контакте цилиндрических поверхностей деталей железнодорожного подвижного состава // Бюллетень результатов научных исследований. 2022. № 1. С. 33–47. DOI: 10.20295/2223-9987-2022-1-33-47. ISSN 2223-9987.
8. Кротов С. В., Кононов Д. П., Соболев А. А. Влияние трения на контактно-усталостную долговечность образцов из рельсовой и колесной стали // Известия ПГУПС. 2019. Т. 16. № 2. С. 212–219. DOI: 10.20295/1815-588X-2019-16-2-212-219. ISSN 1815-588X.
9. Krotov S. V., Krotov V. P. Application of the discriminant analysis at research of bearing ability of the wheel pair of the car // Transport problems. 2011. Vol. 6. Issue 1. Pp. 43–49.
10. Кротов С. В., Кононов Д. П., Соболев А. А. Показатели контактно-усталостной долговечности при взаимодействии колеса с рельсом в кривых участках пути // Бюллетень результатов научных исследований. 2019. № 3. С. 56–66. DOI: 10.20295/2223-9987-2019-3-56-66. ISSN 2223-9987.
11. Кротов С. В., Кононов Д. П. Контактная усталостная долговечность рельсовой и колесной сталей // Известия ПГУПС. 2018. Т. 15. № 1. С. 54–61. DOI: 10.20295/1815-588X-2018-15-1-54-61. ISSN 1815-588X.
12. Кротов С. В. Основы теории несущей способности прессовых соединений колесных пар железнодорожных вагонов. Москва : УМЦ ЖДТ, 2011. 152 с.
13. Кротов С. В., Кононов Д. П. Исследование напряженного состояния в колесе вагона // Бюллетень результатов научных исследований. 2020. № 3. С. 26–40. DOI: 10.20295/2223-9987-2020-3-26-40. ISSN 2223-9987.
14. Кротов С. В., Сладковски А. Факторный анализ расчета несущей способности колесной пары вагона // Транспорт Урала. 2012. № 2 (33). С. 36–40. ISSN 1815-9400.

## References

1. Krotov S. V., Kononov D. P., Buynosov A. P. Influence of freight car wheel mileage on contact and fatigue durability [Vliyanie prokata koleasa gruzovogo vagona na kontaktno-ustalostnuyu dolgovechnost']. Transport of the Urals. 2022. No. 4 (75). Pp. 11–15. DOI: 10.20291/1815-9400-2022-4-11-15. ISSN 1815-9400.
2. Krotov S. V., Kononov D. P., Vorobyev A. A. Contact of railway wheel with rail [Kontakt zheleznodorozhnogo koleasa s rel'som]. Kazan, 2023. 146 p.
3. Krotov S. V., Kononov D. P. Analysis of contact zone of railway wheel and rail [Analiz zony kontakta zheleznodorozhnogo koleasa i rel'sa]. Proceedings of Petersburg Transport University. 2022. Vol. 19. No. 2. Pp. 221–231. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-19-2-221-231. ISSN 1815-588X.
4. Johnson K. Mechanics of contact interaction [Mekhanika kontaktnogo vzaimodeystviya]. Moscow, World, 1989. 510 p.
5. Fromm H. Arbeitsverlust, Formänderungen und Schlupf beim Rollen von treibenden und gebremsten Rädern oder Scheiben. Beitrag zur Analyse der Reibungsgasetee. Z. f. techn. Phys. 9 Jg. 1928. 299 s.
6. Pinegin S. V. Contact strength and rolling resistance [Kontakt'naya prochnost' i soprotivlenie kacheniyu]. Moscow, Machinery, 1969. 243 p.
7. Krotov S. V., Kononov D. P. Investigation of stress-strain state at contact of cylindrical surfaces of parts of railway rolling stock [Issledovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya pri kontakte tsilindricheskikh poverkhnostey detaley zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava]. Bulletin of scientific research results. 2022. No. 1. Pp. 33–47. DOI: 10.20295/2223-9987-2022-1-33-47. ISSN 2223-9987.
8. Krotov S. V., Kononov D. P., Sobolev A. A. The influence of friction on contact fatigue endurance of samples from rail and wheel steel [Vliyanie treniya na kontaktno-ustalostnuyu dolgovechnost' obrabztsov iz rel'sovoy i kolesnoy stali]. Proceedings of Petersburg Transport University. 2019. Vol. 16. No. 2. Pp. 212–219. DOI: 10.20295/1815-588X-2019-16-2-212-219. ISSN 1815-588X.
9. Krotov S. V., Krotov V. P. Application of the discriminant analysis at research of bearing ability of the wheel pair of the car. Transport problems. 2011. Vol. 6. Issue 1. Pp. 43–49.
10. Krotov S. V., Kononov D. P., Sobolev A. A. Contact fatigue endurance indices of the wheel-rail interaction at curved sections of the track [Pokazateli kontaktno-ustalostnoy dolgovechnosti pri vzaimodeystvii koleasa s rel'som v krivykh uchastkakh puti]. Bulletin of scientific research results. 2019. No. 3. Pp. 56–66. DOI: 10.20295/2223-9987-2019-3-56-66. ISSN 2223-9987.
11. Krotov S. V., Kononov D. P. Contact fatigue durability of track and wheel steel [Kontakt'naya ustalostnaya dolgovechnost' rel'sovoy i kolesnoy staliy]. Proceedings of Petersburg Transport University. 2018. Vol. 15. No. 1. Pp. 54–61. DOI: 10.20295/1815-588X-2018-15-1-54-61. ISSN 1815-588X.
12. Krotov S. V. Using fractal characteristics to analyze the development of the destruction of solid-rolled wheels [Osnovy teorii nesushhey sposobnosti pressovykh soedineniy kolesnykh par zheleznodorozhnykh vagonov]. Moscow, 2011. 152 p.
13. Krotov S. V., Kononov D. P. Car wheel stress state study [Issledovanie napryazhennogo sostoyaniya v kolese vagona]. Bulletin of scientific research results. 2020. No. 3. Pp. 26–40. DOI: 10.20295/2223-9987-2020-3-26-40. ISSN 2223-9987.
14. Krotov S. V., Sładkowski A. Factor analysis of bearing capacity calculation of railcar's wheel set [Faktorny analiz rascheta nesushhey sposobnosti kolesnoy pary vagona]. Transport of the Urals. 2012. No. 2 (33). Pp. 36–40. ISSN 1815-9400.

Объем статьи 0,58 авторских листа

УДК 629.424.3: 621.039.542.5

**Андрей Васильевич Старцев**, доктор технических наук, профессор филиала Уральского государственного университета путей сообщения в Тюмени, Тюмень, Россия,  
**Иван Иванович Сторожев**, кандидат технических наук, доцент филиала Уральского государственного университета путей сообщения в Тюмени, Тюмень, Россия,  
**Игорь Станиславович Цихалевский**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрическая тяга» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,  
**Ярослав Александрович Мишин**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрическая тяга» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,  
**Александр Тахирович Шарапов**, ассистент кафедры «Электрическая тяга» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ПЕРЕВОДА ТЯГОВОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА НА ГАЗОМОТОРНОЕ ТОПЛИВО

**Andrey Vasilyevich Startsev**, DSc in Engineering, Professor, the Tyumen branch of Ural State University of Railway Transport (USURT), Tyumen, Russia,

**Ivan Ivanovich Storozhev**, PhD in Engineering, Associate Professor, the Tyumen branch of Ural State University of Railway Transport (USURT), Tyumen, Russia,

**Igor Stanislavovich Tikhalevskiy**, PhD in Engineering, Associate Professor, Electric Traction Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,

**Yaroslav Alexandrovich Mishin**, PhD in Engineering, Associate Professor, Electric Traction Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,

**Alexander Takhirovich Sharapov**, Assistant Lecturer, Electric Traction Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia

### Theoretical background of the transfer of traction rolling stock to gas engine fuel

#### Аннотация

Согласно стратегии развития ОАО «РЖД», к 2024 г. замещение потребления дизельного топлива природным газом должно составить 11 %, а к 2030 г. — 25 %. Для реализации этих целей необходимо проведение комплекса научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по переводу тягового подвижного состава на газомоторное топливо. В статье представлен тепловой расчет тепловозного дизельного двигателя серии Д-50, которым оснащается большинство маневровых тепловозов типа ТЭМ18. Проведенный расчет показывает возможность перевода исследуемого двигателя на газодизельный цикл при удовлетворительном сохранении его технических параметров.

**Ключевые слова:** тяговый подвижной состав, двигатель, рабочий цикл, дизель, природный газ

DOI: 10.20291/1815-9400-2023-3-75-78

#### Abstract

The development strategy of JSC «Russian Railways» provides by 2024, the replacement of diesel fuel consumption with natural gas should be 11 %, and by 2030 should be 25 %. In order to implement this strategy, it is necessary to carry out researches for the transfer of traction rolling stock to gas motor fuel. The article presents the thermal calculation of the D-50 series diesel locomotive engine, which is equipped with most shunting locomotives of the TEM18 type. The performed calculation shows the possibility of transferring this engine to the gas-diesel cycle while maintaining its technical parameters satisfactorily. It is pointed out that it is necessary to conduct experimental (exploratory) studies on a real engine to confirm the results of the theoretical studies carried out.

**Keywords:** traction rolling stock, engine, duty cycle, diesel, natural gas

**Р**азвитие транспорта неизбежно приводит к увеличению расхода топлива даже при улучшении экономичности двигателей. Поэтому сокращение расхода топлива, поиск его альтернативных видов — важная научная и народно-хозяйственная задача.

В соответствии с годовым отчетом ОАО «РЖД» на конец 2021 г. эксплуатируемый парк локомотивов, принадлежащих холдингу, составил 13 292 ед. В 2021 г. ОАО «РЖД» закупило 277 электровозов и 258 тепловозов. Сегодня доля тепловозов в эксплуатируемом тяговом подвижном составе составляет около 40–50 %. Для создания экологически чистого тягового подвижного состава компания предложила разработать компоновочные решения и выбрать основное оборудование для модернизации маневровых и магистральных тепловозов, работающих на природном газе. Реализация этих предложений, согласно последним данным, к 2024 г. обеспечит замещение дизельного топлива природным газом на 11 %, а к 2030 г. — на 25 % [1].

Использование природного газа как топлива для тепловозов имеет свои особенности. В частности, дизельный двигатель тепловоза невозможно перевести на газ. Несмотря на то что природный газ можно применять в качестве топлива, он не способен самовоспламеняться при сжатии, так как температура его самовоспламенения выше, чем у дизельных топлив: около 480 °С, что в 1,5 раза больше, чем у дизеля (320 °С). Безусловно, температуру воздуха (газовоздушной смеси) в конце такта сжатия в дизельном двигателе можно поднять, если увеличить, например, степень сжатия, однако, учитывая габаритные размеры и частоту вращения коленчатого вала тепловозного дизельного двигателя, это практически невозможно. Поэтому для работы дизеля на чистом природном газе следует демонтировать дизельную топливную аппаратуру, заменить форсунки на свечи зажигания и смонтировать газобаллонное оборудование для подачи газа во впускной коллектор. Однако после такой переделки все преимущества дизеля будут потеряны.

Выходом из создавшейся ситуации может служить техническое решение, разработанное во времена СССР и успешно опробованное на автомобилях «КАМАЗ». Суть этого решения состоит в следующем: в цилиндры дизельного двигателя впрыскивается небольшое количество дизельного топлива (от 20 до 30 %) в качестве запальной дозы, а оставшаяся часть топлива заменяется природным газом (от 70 до 80 %). Таким образом, дизельный процесс замещается газодизельным. При реализации газодизельного процесса в цилиндры двигателя подается газозадушенная смесь (так как природный газ хорошо смешивается с воздухом), а затем впрыскивается запальная доза дизельного топлива.

Для изучения возможности использования природного газа в качестве газомоторного топлива в тепловозном дизельном двигателе серии 50 выполнен проверочный тепловой расчет с применением искрового зажигания. В качестве методических рекомендаций использованы материалы источников [2–9].

Поскольку дизельный двигатель при переводе на газомоторное топливо остается тепловым двигателем, основным показателем для оценки эффективности его работы принят термический КПД:

$$\eta_t = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}, \quad (1)$$

где  $Q_1$  — теплота, полученная рабочим телом от нагревателя (в нашем случае — теплота, выделившаяся от сгорания топлива в цилиндре двигателя), МДж;  $Q_2$  — теплота, отданная рабочим телом холодильнику (в нашем случае — все потери теплоты, за исключением отданной на нагрев рабочего тела), МДж;  $T_1$  и  $T_2$  — температура нагревателя и холодильника соответственно, °С.

Эффективность использования теплоты в двигателе в течение рабочего процесса оценивалась с помощью индикаторного КПД:

$$\eta_i = \frac{Q_i}{Q} = \frac{3600 \cdot N_i}{G_T \cdot H_{и}} = \frac{3600}{g_i \cdot H_{и}}, \quad (2)$$

где  $Q_i$  — теплота, равная выполненной индикаторной работе двигателя, МДж;  $Q$  — теплота, полученная от сгорания топлива, МДж;  $N_i$  — мощность двигателя (индикаторная), кВт;  $G_T$  — расход топлива (часовой), м<sup>3</sup>/ч;  $H_{и}$  — теплота сгорания топлива (низшая), МДж/м<sup>3</sup>;  $g_i$  — индикаторный расход топлива (удельный), м<sup>3</sup>/(кВт·ч).

Эффективность сгорания топлива в двигателе определена при помощи эффективного КПД:

$$\eta_e = \frac{Q_e}{Q} = \frac{3600 \cdot N_e}{G_T \cdot H_{и}} = \frac{3600}{g_e \cdot H_{и}}, \quad (3)$$

где  $Q_e$  — теплота, равная выполненной эффективной работе двигателя, МДж;  $N_e$  — мощность двигателя (эффективная), кВт;  $g_e$  — эффективный расход топлива (удельный), м<sup>3</sup>/(кВт·ч).

В настоящее время природный газ используют в основном в сжатом состоянии, которое называют компримированным (КПГ). Основным параметром при оценке качества КПГ как газомоторного топлива является его элементный состав (табл. 1).

Таблица 1

Объемные доли компонентов природного газа (моторного топлива), м<sup>3</sup>

CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>
0,82–0,95	0,02–0,08	До 0,015	До 0,01	До 0,01	До 0,018	0,01–0,09

Низшая теплота сгорания газообразного топлива  $H_{и}$  рассчитана следующим образом, кДж/м<sup>3</sup>:

$$H_{и} = \left[ 35,7 \text{CH}_4 + 63,3 \text{C}_2\text{H}_6 + 90,9 \text{C}_3\text{H}_8 + \right] \cdot 10^3. \quad (4)$$

$$\left[ +119,7 \text{C}_4\text{H}_{10} + 146,2 \text{C}_5\text{H}_{12} \right]$$

Основные параметры рабочего тела приведены в табл. 2. Параметры процессов впуска, сжатия, сгорания и расширения для разных типов современных двигателей представлены в табл. 3.

Таблица 2

Основные параметры рабочего тела

$H_{и}$ , кДж/м <sup>3</sup>	Теоретически необходимое количество воздуха $L_{0r}$ , м <sup>3</sup> возд./м <sup>3</sup> топл.	Действительное количество воздуха $L_r$ , м <sup>3</sup> возд./ м <sup>3</sup> топл.	Изменение количества рабочего тела $\Delta M$ при сгорании, м <sup>3</sup> прод. сгор./м <sup>3</sup> топл.
35859	9,642	13,50	-0,005

Таблица 3

Параметры процессов в современных двигателях

Тип двигателя	Значения параметров процесса впуска			
	Потери давления во впускном трубопроводе $\Delta p_{вр}$ , МПа	Коэффициент остаточных газов $\gamma_r$	Температура в конце впуска $T_{вр}$ , К	Коэффициент наполнения $\eta_v$
Газовый	0,01–0,02	0,04–0,10	340–400	0,70–0,95
Двигатель серии Д-50	0,0239	0,039	382	0,864
Тип двигателя	Значения параметров процесса сжатия			
	Показатель политропы сжатия $n_1$	Давление в конце сжатия $p_{ср}$ , МПа	Температура в конце сжатия $T_{ср}$ , К	
Газовый	1,36–1,39	1,2–4,0	650–900	
Двигатель серии Д-50	1,349	4,473	882	
Тип двигателя	Значения параметров процесса сгорания			
	Степень повышения давления цикла $\lambda$	Степень предварительного расширения $\rho$	Максимальное давление в конце сгорания $p_{zr}$ , МПа	Температура в конце видимого сгорания $T_{zr}$ , К
Газовый	2,0–3,0	1,0	3,0–10,0	2200–2500
Двигатель серии Д-50	2,638	1,0	11,801	2328
Тип двигателя	Значения параметров процесса расширения			
	Показатель политропы расширения $n_2$	Давление в конце процесса расширения $p_{br}$ , МПа	Температура в конце процесса расширения $T_{br}$ , К	
Газовый	1,20–1,30	0,30–0,50	1300–1800	
Двигатель серии Д-50	1,241	0,601	1306	

Таблица 4

Результаты проверочных расчетов

Тип двигателя	Значения эффективных показателей		
	Эффективный КПД $\eta_e$	Механический КПД $\eta_m$	Удельный расход теплоты $q_{ев}$ , кДж/(кВт·ч)
Газовый	0,22–0,38	0,70–0,80	10000–17000
Двигатель серии Д-50	0,359	0,873	10040
Тип двигателя	Значения индикаторных показателей		
	Удельный расход теплоты $q_{иr}$ , кДж/(кВт·ч)	Индикаторный КПД $\eta_i$	Среднее индикаторное давление $p_i$ , МПа
Газовый	8000–14000	0,30–0,45	0,60–1,40
Двигатель серии Д-50	8758	0,411	1,337

Для оценки правильности выполненного теплового расчета произведено сравнение принятой  $T_r$  и рассчитанной  $T_r^{расч}$  температуры остаточных газов:

$$T_r^{расч} = \frac{1306}{\sqrt[3]{\frac{0,601}{0,16}}} = 842 \text{ К}; \quad (5)$$

$$\Delta T_r = \left| \frac{842 - 845}{842} \right| \cdot 100\% = 0,36\% < 10\%. \quad (6)$$

Таким образом, рассчитанные параметры газовых процессов можно считать приемлемыми для практического использования. Проверочные расчеты эффективных и индикаторных показателей тепловозного дизельного двигателя, переведенного на работу на газомоторном топливе (КПГ), приведены в табл. 4.

Таблица 5

Значения составляющих теплового баланса, %

Тип двигателя	Параметры			
	Теплота, эквивалентная эффективной работе, $q_e$	Теплота, отданная охлаждающей среде, $q_{\text{охл}}$	Теплота, унесенная из двигателя с отработавшими газами, $q_r$	Неучтенные потери теплоты $q_{\text{ост}}$
Газовый	25–42	15–32	30–45	3–10
Двигатель серии Д-50	31,62	15,42	34,32	18,64

Удельный эффективный расход топлива составит,  $\text{м}^3/(\text{кВт}\cdot\text{ч})$ :

$$v_e = \frac{3600}{H_{\text{и}} \cdot \eta_e} = \frac{3600}{35859 \cdot 0,359} = 0,280. \quad (7)$$

Газообразное топливо, расходуемое за 1 ч при эффективной мощности двигателя  $N_e = 882$  кВт, определено следующим образом,  $\text{м}^3/\text{ч}$ :

$$V_T = v_e \cdot N_e = 0,280 \cdot 882 = 246,960. \quad (8)$$

Очевидно, что с учетом допустимой ошибки расчета 10–15 % часовой расход топлива может быть повышен до 280–300  $\text{м}^3/\text{ч}$ . Поэтому часовой расход топлива принят равным 280  $\text{м}^3/\text{ч}$ .

Результаты расчета теплового баланса тепловозного двигателя серии Д-50, переведенного на работу на газомоторном топливе, в относительных показателях представлены в табл. 5.

Исследования теоретических аспектов рабочего процесса дизельного двигателя, проведенные для тягового подвижного состава ОАО «РЖД» с применением подачи КПГ в систему питания, носят предварительный характер. Тем не менее, как видно из расчета, перевод тепловозного дизеля серии Д-50 на газомоторное топливо возможен — эффективные показатели двигателя находятся на вполне приемлемом уровне. Окончательное решение может быть принято только после проведения экспериментальных (поисковых) исследований на реальном двигателе или на его модели, так как двигатель серии Д-50 является достаточно дорогостоящим.

## Литература

1. Повышение эффективности тягового подвижного состава. URL: <https://ar2021.rzd.ru/ru/performance-overview/analysis-operating-results/railway-transportation-infrastructure/efficiency-rolling-stock> (дата обращения: 17.06.2023).
2. Гайворонский А. И. Перспективы совершенствования рабочих процессов газовых двигателей // Автогазозаправочный комплекс + Альтернативное топливо. 2004. № 5. С. 56–58. ISSN 2073-8323.
3. Двигатели внутреннего сгорания. В 3 кн. Кн. 1. Теория рабочих процессов / В. Н. Луканин, К. А. Морозов, А. С. Хачиян [и др.] ; под ред. В. Н. Луканина. Москва : Высшая школа, 1995. 368 с.
4. Колчин А. И., Демидов В. П. Расчет автомобильных и тракторных двигателей. Москва : Высшая школа, 2002. 496 с.
5. Луканин В. Н., Карпов В. П., Гогиберидзе О. Э. Особенности горения газовых топлив. Деп. в ВИНТИ. № 3579-B97.
6. Лучев П. Расчетное определение параметров газового двигателя // Автогазозаправочный комплекс + Альтернативное топливо. 2002. № 5. С. 14–15. ISSN 2073-8323.
7. Тепловой расчет и тепловой баланс дизельного двигателя без наддува и с турбонаддувом. Расчет основных деталей двигателя / В. М. Мелисаров, М. А. Каменская, П. П. Беспалько, А. М. Каменский. Тамбов : Изд-во ТГТУ, 2011. 100 с.
8. Разработка и реализация принципа конвертации дизелей в газовые двигатели с искровым зажиганием / И. Г. Багдасаров, А. С. Хачиян и др. Тема № Б551891. Москва : МАДИ, 1991.
9. Перевод дизелей на питание природным газом / А. С. Хачиян, И. Г. Багдасаров [и др.] // Повышение эффективности автомобильных и тракторных двигателей : сборник научных трудов МАДИ. Москва, 1995.

## References

1. Improving the efficiency of traction rolling stock [Povyshenie effektivnosti tyagovogo podvizhnogo sostava]. URL: <https://ar2021.rzd.ru/ru/performance-overview/analysis-operating-results/railway-transportation-infrastructure/efficiency-rolling-stock> (access date: 17.06.2023).
2. Gayvoronskiy A. I. Prospects for improving the working processes of gas engines [Perspektivy sovershenstvovaniya rabochikh protsessov gazovykh dvigateley]. AutoGas Filling Complex + Alternative fuel. 2004. No. 5. Pp. 56–58. ISSN 2073-8323.
3. Lukanin V. N., Morozov K. A., Khachiyani A. S. [et al.]. Internal combustion engine. In 3 books. Book 1. Working processes theory [Dvigateli vnutrennego sgoraniya. V 3 kn. Kn. 1. Teoriya rabochikh protsessov]. Ed. by V. N. Lukanin. Moscow, Higher School, 1995. 368 p.
4. Kolchin A. I., Demidov V. P. Calculation of automobile and tractor engines [Raschet avtomobil'nykh i traktornykh dvigateley]. Moscow, Higher School, 2002. 496 p.
5. Lukanin V. N., Karpov V. P., Gogiberidze O. E. Peculiarities of gas burning [Osobennosti goreniya gazovykh topliv]. Deposited in VINITI. No. 3579-B97.
6. Luchev P. Calculation of parameters of a gas engine [Raschetnoe opredelenie parametrov gazovogo dvigatelya]. AutoGas Filling Complex + Alternative fuel. 2002. No. 5. Pp. 14–15. ISSN 2073-8323.
7. Melisarov V. M., Kamenskaya M. A., Bepalko P. P., Kamenskiy A. M. Thermal calculation and thermal balance of a diesel engine without supercharging and with turbocharging. Calculation of main parts of an engine [Teplovoy raschet i teplovoy balans dizel'nogo dvigatelya bez nadduva i s turbonadduvm. Raschet osnovnykh detaley dvigatelya]. Tambov, Publishing House of TSTU, 2011. 100 p.
8. Bagdasarov I. G., Khachiyani A. S. [et al.]. Development and realization of a principle of conversion of diesel engines into gas engines with spark ignition [Razrabotka i realizatsiya printsipa konvertatsii dizeley v gazovye dvigateli s iskrovym zazhiganiem]. Moscow, MADI, 1991.
9. Khachiyani A. S., Bagdasarov I. G. [et al.]. Conversion of diesel engines on natural gas feeding. Increase of efficiency of automobile and tractor engines [Perevod dizeley na pitanie prirodnym gazom]. Collection of scientific words of MADI. Moscow, 1995.

Объем статьи 0,4 авторских листа

УДК 656.259.9:625.14:519.2

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

Мария Леонидовна Попова, старший преподаватель кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия

## КОНТРОЛЬ ЦЕЛОСТНОСТИ РЕЛЬСОВЫХ НИТЕЙ ПРОТЕКАЮЩИМ ТОКОМ

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

Mariya Leonidovna Popova, Senior Lecturer, Railway Automation, Telemechanics and Communication Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia

### Monitoring the integrity of rails by flowing current

#### Аннотация

Нарушения целостности рельсов на участках железных дорог представляют серьезную угрозу безопасности движения, становятся причиной аварий и крушений, приводят к значительному экономическому ущербу и человеческим жертвам. Целостность рельсовых нитей контролируется методами дефектоскопии, а также особым режимом работы рельсовых цепей за счет обтекания рельсовых нитей сигнальным током. Широкое распространение рельсовых цепей переменного тока, надежно выполняющих контрольный режим, позволило организовать простой способ контроля целостности на значительном протяжении железнодорожных линий.

Трудоемкость содержания и низкая надежность рельсовых цепей, в свою очередь, привели к появлению альтернативных технических решений для контроля свободности участков железнодорожного пути. Однако эти решения не способны контролировать целостность рельсовых нитей, что не позволяет отказаться от рельсовых цепей. С другой стороны, совместное использование непрерывного контроля целостности рельсовых нитей и малообслуживаемых решений по контролю свободности участков пути как раз и сможет обеспечить снижение эксплуатационных затрат при неизменном уровне безопасности движения.

В статье проанализированы технические решения по контролю целостности рельсовых нитей за счет непрерывного обтекания током. Установлена предельная длина контура, образованного двумя рельсами, для контроля целостности рельсовых нитей. Показана перспективность решений контроля целостности рельсовых нитей на основе электрического контура, образованного рельсовыми нитями и кабелем, идущим вдоль них.

**Ключевые слова:** рельсовые цепи, контрольный режим работы, сопротивление передачи рельсовых цепей, автоблокировка, полуавтоматическая блокировка

#### Abstract

Violations of the integrity of rails on railway sections pose a serious threat to traffic safety, cause accidents and wrecks, lead to significant economic damage and human casualties. The integrity of rails is controlled by flaw detection methods, as well as by a special mode of operation of rail circuits due to the signal current flow around track circuits. The widespread use of AC rail circuits which reliably perform the control mode made it possible to organize a simple method of integrity control over a significant length of railway lines.

The complexity of maintenance and low reliability of track circuits, in turn, led to emergence of alternative technical solutions for monitoring the vacancy of railway sections. However, these solutions are not able to control the integrity of rails and prevent elimination of track circuits. On the other hand, the joint use of continuous monitoring of rails and low-maintenance solutions for monitoring the vacancy of track sections will ensure reduction in operating costs with a constant level of traffic safety.

The article analyzes technical solutions for monitoring the integrity of rails due to continuous current flow. The maximum length of the contour formed by two rails is set to control the integrity of the rails. The prospects of solutions for monitoring the integrity of rails based on the electrical circuit formed by rails and a cable running along them are shown.

**Keywords:** rail circuits, control mode of operation, transmission resistance of rail circuits, auto-locking, semi-automatic locking

DOI: 10.20291/1815-9400-2023-3-79-83

Срок эксплуатации систем железнодорожной автоматики и телемеханики (СЖАТ) исчисляется десятками лет. При этом доля затрат на эксплуатацию сопоставима с расходами на строительство самих систем. Поэтому для развития СЖАТ необходимо решить задачу по снижению требуемых на эксплуатацию ресурсов.

Одна из самых затратных статей эксплуатации — обслуживание рельсовых цепей [1], именно поэтому периодически поднимается вопрос об отказе от их использования. Основным и пока непреодолимым аргументом в пользу сохранения рельсовых цепей служит возможность с их помощью определять повреждение рельсов [2–4].

Например, в статье [5] приводится такое рассуждение: «...лет тридцать назад была поставлена задача сделать электрический контроль целостности РЦ независимым от рельсовой цепи, т.е. требовалось «протестировать» отдельно каждый рельс от станции до станции электрическим сигналом. Для перегонов с ПАБ (это около 20 тыс. км пути), наверное, это продолжает оставаться актуальным и сейчас». Следует отметить, что на участках железных дорог, оборудованных автоблокировкой (АБ), решение указанной задачи также имеет значение для снижения затрат на содержание устройств ЖАТ за счет сокращения количества используемого оборудования и уменьшения числа операций по его обслуживанию. Поэтому интерес представляет исследование возможности снижения затрат на эксплуатацию рельсовых цепей в результате разделения их функций по определению свободности участка пути от подвижного состава и по контролю за целостностью рельсовых нитей. Контроль целостности рельсов осуществляется на основе их непрерывного обтекания сигнальным током, а контроль свободности участка пути производится при помощи альтернативных решений, таких, например, как использование датчиков счета осей.

Контроль целостности рельсов обтеканием электрическим током может быть реализован электрической цепью, образованной:

- двумя рельсами, или рельсовыми нитями и кабелем, идущим вдоль них.

Электрическая цепь, образованная двумя рельсами, представляет собой рельсовую цепь, для которой не требуется проверок по выполнению шунтового режима, а длина контролируемой зоны определяется эксплуатационными задачами и загрузкой соответствующего участка железной дороги. Первоочередной вопрос, требующий ответа, заключается в определении ограничений по длине рельсовой цепи, к которой не предъявляется требование выполнения шунтового режима.

Рассмотрим, чем ограничивается длина контролируемого участка пути для рельсовой цепи и для устройства контроля целостности рельсов. Отметим, что вопросы расчета рельсовых цепей подробно исследованы в работах [6–8].

Принцип действия рельсовой цепи заключается в определении путевого приемником состояния рельсовой линии по изменению тока, которое обусловлено изменением структуры электрической цепи, образованной рельсовой линией при ее шунтировании колесной парой подвижного состава или при повреждении рельса. Появление колесной пары приводит

к протеканию по рельсовой линии значительной доли тока источника, питающего рельсовую цепь, и соответствующему снижению доли тока, протекающего через путевое реле. При повреждении рельса в месте его излома увеличивается электрическое сопротивление, что также приводит к снижению тока через путевое реле. Структурные изменения электрической цепи можно представить как изменение сопротивления передачи рельсовой линии — отношения напряжения источника питания к току путевого реле.

В нормальном режиме сопротивление передачи обозначается  $Z_{\text{по}}$ , а в контрольном режиме —  $Z_{\text{пок}}$ . Сопротивления передачи определяются по известным [6–8] выражениям:

$$Z_{\text{по}} = 2AZ_{\text{вх.к}} + B + (CZ_{\text{вх.к}} + D)Z'_{\text{вх.н}}; \quad (1)$$

$$Z_{\text{пок}} = 2A_{\text{к}}Z_{\text{вх.к}} + B_{\text{к}} + (C_{\text{к}}Z_{\text{вх.к}} + D_{\text{к}})Z'_{\text{вх.н}}; \quad (2)$$

где  $A, B, C, D$  — коэффициенты четырехполюсника рельсовой линии в нормальном режиме;  $A_{\text{к}}, B_{\text{к}}, C_{\text{к}}, D_{\text{к}}$  — коэффициенты четырехполюсника рельсовой линии в контрольном режиме;  $Z_{\text{вх.к}}$  — входное сопротивление релейного конца, Ом;  $Z'_{\text{вх.н}}$  — обратное входное сопротивление питающего конца, Ом.

При условии равенства сопротивлений по концам  $Z_{\text{вх.к}} = Z'_{\text{вх.н}} = Z_{\text{вх.о}}$  и после преобразований (1) и (2) запишем:

$$Z_{\text{по}} = 2Z_{\text{вх.о}} \cdot \text{ch}(\gamma l) + \left( \frac{Z_{\text{вх.о}}^2}{Z_{\text{б}}} + Z_{\text{б}} \right) \cdot \text{sh}(\gamma l); \quad (3)$$

$$Z_{\text{пок}} = 2Z_{\text{вх.о}} \cdot \text{ch}(\gamma_{\text{кр}} l) + \left( \frac{Z_{\text{вх.о}}^2}{Z_{\text{вкр}}} + Z_{\text{вкр}} \right) \cdot \text{sh}(\gamma_{\text{кр}} l), \quad (4)$$

где  $\gamma_{\text{кр}}$  — волновой коэффициент распространения рельсовой линии при критическом сопротивлении изоляции;  $Z_{\text{вкр}}$  — волновое сопротивление рельсовой линии при критическом сопротивлении изоляции, Ом;  $l$  — длина рельсовой линии, км.

Сопротивление передачи рельсовой цепи в различных режимах рассчитывается для наихудших значений вторичных параметров рельсовой линии — волнового сопротивления и волнового коэффициента распространения линии. Оба вторичных параметра являются функциями сопротивления изоляции между рельсами. Для выполнения нормального режима наихудшим является минимально возможное значение сопротивления изоляции, а для выполнения контрольного режима — критическое сопротивление изоляции, т.е. такое сопротивление, при котором сопротивление передачи в контрольном режиме будет минимальным для заданной длины рельсовой линии.

Наибольшей длиной обладает кодовая рельсовая цепь 50 Гц — до 2600 м. Поэтому дальнейшее исследование целесообразно выполнять именно для рельсовых цепей этого типа. Зависимость критического сопротивления изоляции от длины кодовой рельсовой цепи 50 Гц представлена на рис. 1.

При критическом сопротивлении, значение которого меньше нормативного, его принимают равным нормативному, т.е. 1 Ом·км, что показано на рис. 1 пунктирной линией.

На сопротивление передачи оказывает влияние сопротивление аппаратуры, подключенной по концам рельсовой линии. График зависимости сопротивления передачи рельсовой цепи в нормальном режиме от длины рельсовой линии при различных значениях сопротивлений аппаратуры по концам показан на рис. 2.

Чем выше сопротивление аппаратуры по концам, тем больше сопротивление передачи при одинаковой длине линии.

Зависимость сопротивления передачи рельсовой цепи в контрольном режиме от длины рельсовой линии при различных сопротивлениях по концам растет практически линейно (рис. 3).

Нелинейность в области малых длин рельсовой линии обусловлена тем, что значения критического сопротивления изоляции, меньшие чем нормативное, заменены сопротивлением 1 Ом·км. Линейный рост сопротивления передачи рельсовой цепи на рис. 3 по сравнению с рис. 2 обусловлен величиной сопротивления в месте излома, которое существенно превышает сопротивление рельсовой линии.

Приемник, как указано выше, определяет изменение состояния рельсовой цепи по увеличению сопротивления передачи. Из рис. 2 видно, что с увеличением длины рельсовой линии рост сопротивления передачи ускоряется и при некоторой длине будет превышать сопротивление передачи рельсовой цепи в случае излома рельса. Следовательно, приемник не сможет фиксировать изменение состояния рельсовой цепи.

Характер изменения сопротивлений передачи в зависимости от длины рельсовой линии во всех основных режимах работы рельсовой цепи (нормальном, шунтовом и контрольном) представлен на рис. 4.

Как видно из рис. 4, длина рельсовой цепи ограничена точкой пересечения сопротивления изоляции в нормальном и шунтовом (контрольном) режимах. Поэтому невозможно создать электрическую цепь, образованную двумя рельсами, для контроля целостности рельсов произвольной длины. Расположение кривых на рис. 4 справедливо для наихудших условий выполнения режимов рельсовой цепи. При улучшении условий кривые будут отдаляться друг от друга, увеличивая предельную длину.

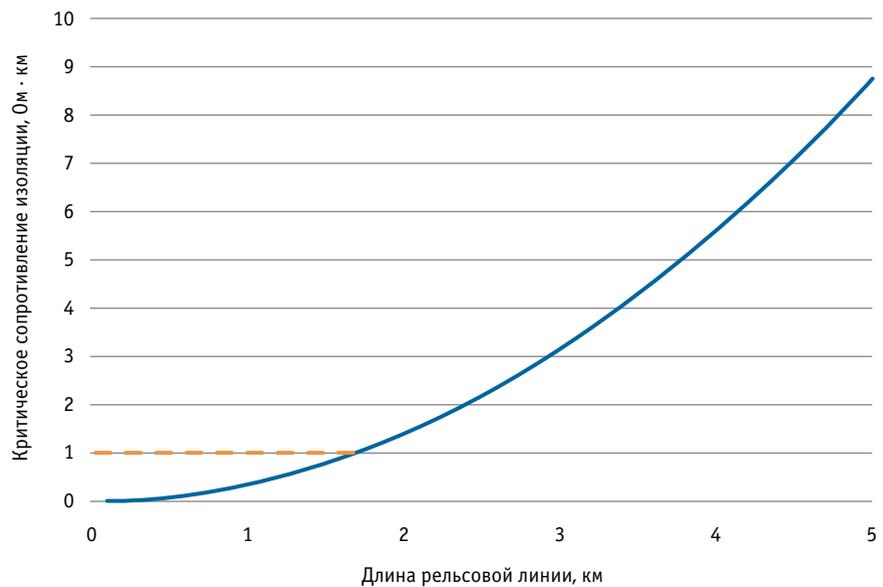


Рис. 1. Зависимость критического сопротивления изоляции от длины рельсовой цепи

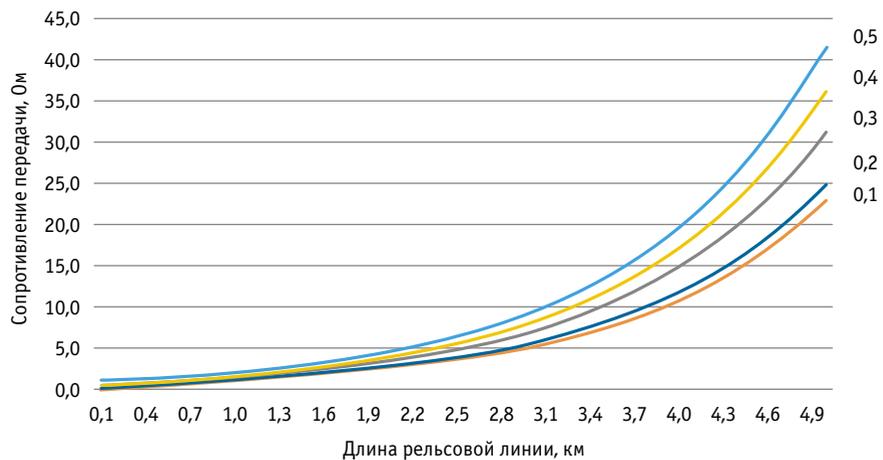


Рис. 2. Зависимость сопротивления передачи рельсовой цепи в нормальном режиме от длины рельсовой линии при различных значениях сопротивления аппаратуры по концам

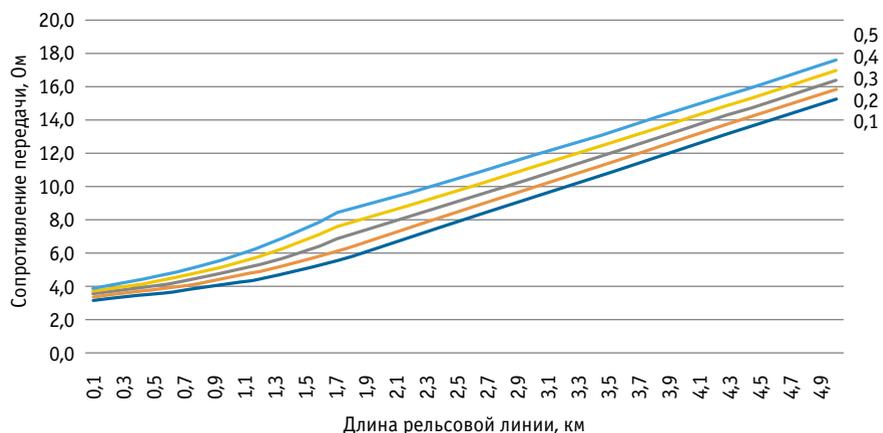
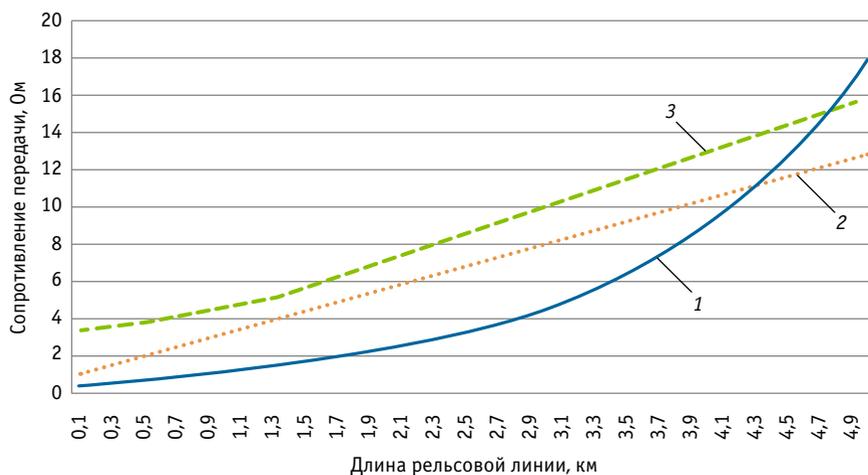
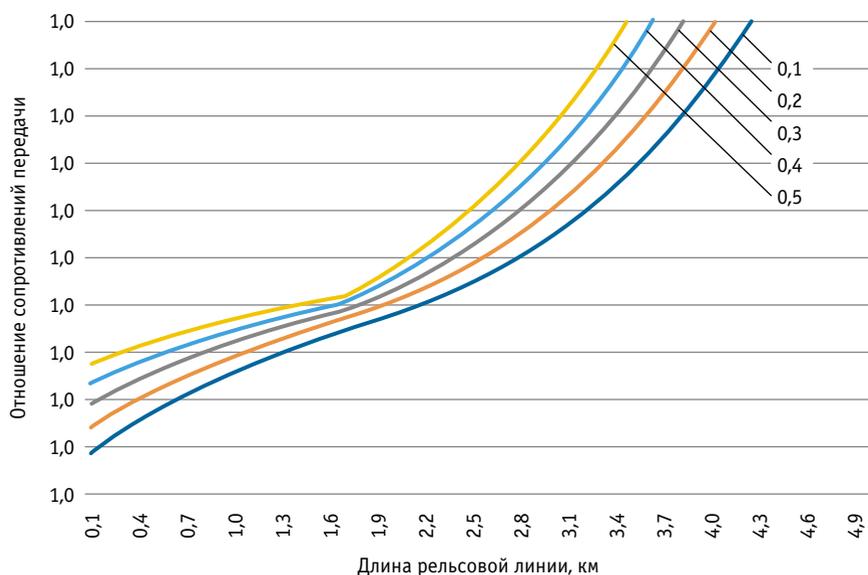


Рис. 3. Зависимость сопротивления передачи рельсовой цепи в контрольном режиме от длины рельсовой линии при различных сопротивлениях по концам



**Рис. 4. Сопротивление передачи в различных режимах работы рельсовой цепи:**  
1 — нормальный режим; 2 — шунтовой; 3 — контрольный



**Рис. 5. Отношение сопротивлений передачи в нормальном и контрольном режимах от длины рельсовой линии при различных сопротивлениях по концам**

Рассмотрим отношение сопротивлений передачи рельсовой цепи в нормальном и контрольном режимах. В соответствии с рис. 5 наибольшая длина зоны контроля, при которой обеспечивается работоспособность цепи, составляет около 4,3 км. Уменьшение сопротивления аппаратуры по концам линии позволяет увеличивать длину контролируемой зоны. Необходимо отметить, что 4,3 км — длина линии, при которой сопротивления передачи в нормальном и контрольном режимах равны между собой и не могут быть разделены по уровню тока на приемном конце. Реальная же длина линии будет меньше, что обусловлено коэффициентом возврата приемника и другими влияющими факторами.

Конструкции электрических цепей, образованных рельсовыми нитями и идущим вдоль них кабелем, представлены, например, в патентах [9, 10]. К концам каждой рельсовой нити кабелем подключаются генератор и приемник, что позволяет обеспечить гораздо более высокое сопротивление изоляции и увеличить общую длину контролируемой зоны. При возникновении излома рельса происходит разрыв рельсовой цепи, что приводит к выключению приемника.

Таким образом, как показывают выполненные исследования, по сравнению с действующими рельсовыми цепями способы контроля целостности рельсов, основанные на непрерывном обтекании током всей рельсовой петли, не позволяют существенно увеличить длину контролируемой зоны. Наиболее перспективно для этих целей использовать контуры, образованные рельсовыми нитями и кабелем.

## Литература

1. Бушуев С. В., Попов А. Н., Попова М. Л. Оценка экономической эффективности средств контроля свободности участков пути // Автоматика на транспорте. 2019. Т. 5. № 2. С. 202–220. ISSN 2412-9186.
2. Попова М. Л., Бушуев С. В., Попов А. Н. Анализ влияния эксплуатационных параметров на образование дефектов и изломов с целью внедрения альтернативных систем контроля свободности участков пути // Вестник транспорта Поволжья. 2020. № 6. С. 34–46. ISSN 1997-0722.
3. Попова М. Л., Попов А. Н., Бушуев С. В. Оценка вероятностей возникновения изломов и их выявления рельсовыми цепями // Транспорт Урала. 2021. № 3 (70). С. 8–14. DOI: 10.20291/1815-9400-2021-3-8-14. ISSN 1815-9400.

## References

1. Bushuev S. V., Popov A. N., Popova M. L. Evaluation of the economic efficiency of track occupation monitoring means [Otsenka ekonomicheskoy effektivnosti sredstv kontrolya svobodnosti uchastkov puti]. Automation on Transport. 2019. Vol. 5. No. 2. Pp. 202–220. ISSN 2412-9186.
2. Popova M. L., Bushuev S. V., Popov A. N. Analysis of the impact of operational parameters on the formation of defects and fractures in order to introduce alternative systems for track occupancy control [Analiz vliyaniya ekspluatatsionnykh parametrov na obrazovanie defektov i izlomov s tsel'yu vnedreniya al'ternativnykh sistem kontrolya svobodnosti uchastkov puti]. Bulletin of transport of the Volga region. 2020. No. 6. Pp. 34–46. ISSN 1997-0722.
3. Popova M. L., Popov A. N., Bushuev S. V. Assessment of probabilities of rail failures and their detection by rail circuits [Otsenka veroyatnostey

4. Бушуев С. В., Попов А. Н., Попова М. Л. Средства контроля свободности участков пути и изломы рельсов // Транспорт Урала. 2020. № 3 (66). С. 43–50. DOI: 10.20291/1815-9400-2020-3-43-50. ISSN 1815-9400.
5. Балувев Н. Н. Рельсовые цепи — вчера, сегодня, завтра // Автоматика, связь, информатика. 2019. № 2. С. 30–31. ISSN 0005-2329.
6. Котляренко Н. Ф. Электрические рельсовые цепи. Москва : Всесоюзное издательско-полиграфическое объединение Министерства путей сообщения, 1961. 328 с.
7. Брылеев А. М., Кравцов Ю. А., Шишляков А. В. Теория, устройство и работа рельсовых цепей. Москва : Транспорт, 1978. 344 с.
8. Бушуев А. В., Бушуев В. И., Бушуев С. В. Рельсовые цепи: теоретические основы и эксплуатация : монография. Екатеринбург : Изд-во УрГУПС, 2014. 311 с.
9. Устройство контроля целостности рельсовой линии / А. Б. Никитин, О. А. Абрамов, В. В. Ходырев : патент 2762973 Российская Федерация. № 2021117766 ; заявл. 16.06.2021 ; опубл. 24.12.2021, Бюл. № 36.
10. Устройство контроля целостности рельса / С. Р. Гимаев, Е. А. Малыгин, Е. В. Пуговкин : патент 2629730 Российская Федерация. № 2016122801 ; заявл. 08.06.2016 ; опубл. 31.08.2017, Бюл. № 25.

4. Bushuev S. V., Popov A. N., Popova M. L. Means for track availability checkup and rail failures [Sredstva kontrolya svobodnosti uchastkov puti i izlomy rel'sov]. Transport of the Urals. 2020. No. 3 (66). Pp. 43–50. DOI: 10.20291/1815-9400-2020-3-43-50. ISSN 1815-9400.
4. Bushuev S. V., Popov A. N., Popova M. L. Means for track availability checkup and rail failures [Sredstva kontrolya svobodnosti uchastkov puti i izlomy rel'sov]. Transport of the Urals. 2020. No. 3 (66). Pp. 43–50. DOI: 10.20291/1815-9400-2020-3-43-50. ISSN 1815-9400.
5. Baluev N. N. Rail circuits — yesterday, today, tomorrow [Rel'sovye tsepi — vchera, segodnya, zavtra]. Automation, communication, informatics. 2019. No. 2. Pp. 30–31. ISSN 0005-2329.
5. Baluev N. N. Rail circuits — yesterday, today, tomorrow [Rel'sovye tsepi — vchera, segodnya, zavtra]. Automation, communication, informatics. 2019. No. 2. Pp. 30–31. ISSN 0005-2329.
6. Kotlyarenko N. F. Electric rail circuits [Elektricheskie rel'sovye tsepi]. Moscow, 1961. 328 p.
6. Kotlyarenko N. F. Electric rail circuits [Elektricheskie rel'sovye tsepi]. Moscow, 1961. 328 p.
7. Bryleev A. M., Kravtsov Yu. A., Shishlyakov A. V. Theory, design and operation of rail circuits [Teoriya, ustroystvo i rabota rel'sovykh tsepey]. Moscow, Transport, 1978. 344 p.
7. Bryleev A. M., Kravtsov Yu. A., Shishlyakov A. V. Theory, design and operation of rail circuits [Teoriya, ustroystvo i rabota rel'sovykh tsepey]. Moscow, Transport, 1978. 344 p.
8. Bushuev A. V., Bushuev V. I., Bushuev S. V. Rail circuits: theoretical foundations and operation [Rel'sovye tsepi: teoreticheskie osnovy i ekspluatatsiya]. Ekaterinburg, Publishing House of USURT, 2014. 311 p.
8. Bushuev A. V., Bushuev V. I., Bushuev S. V. Rail circuits: theoretical foundations and operation [Rel'sovye tsepi: teoreticheskie osnovy i ekspluatatsiya]. Ekaterinburg, Publishing House of USURT, 2014. 311 p.
9. Nikitin A. B., Abramov O. A., Khodyrev V. V. Rail line integrity monitoring device [Ustroystvo kontrolya tselostnosti rel'sovoy linii]. Patent 2762973 Russian Federation. No. 2021117766 ; filed 16.06.2021 ; publ. 24.12.2021, Bulletin No. 36.
9. Nikitin A. B., Abramov O. A., Khodyrev V. V. Rail line integrity monitoring device [Ustroystvo kontrolya tselostnosti rel'sovoy linii]. Patent 2762973 Russian Federation. No. 2021117766 ; filed 16.06.2021 ; publ. 24.12.2021, Bulletin No. 36.
10. Gimaev S. R., Malygin E. A., Pugovkin E. V. Rail integrity monitoring device [Ustroystvo kontrolya tselostnosti rel'sa]. Patent 2629730 Russian Federation. No. 2016122801 ; filed 08.06.2016 ; publ. 31.08.2017, Bulletin No. 25.
10. Gimaev S. R., Malygin E. A., Pugovkin E. V. Rail integrity monitoring device [Ustroystvo kontrolya tselostnosti rel'sa]. Patent 2629730 Russian Federation. No. 2016122801 ; filed 08.06.2016 ; publ. 31.08.2017, Bulletin No. 25.

Объем статьи 0,56 авторских листа

УДК 62-144.3

**Леонид Валерьевич Плотников**, доктор технических наук, профессор кафедры «Турбины и двигатели» Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина (УрФУ), Екатеринбург, Россия,  
**Данил Алексеевич Давыдов**, бакалавр кафедры «Турбины и двигатели» Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина (УрФУ), Екатеринбург, Россия,  
**Дмитрий Николаевич Красильников**, бакалавр кафедры «Турбины и двигатели» Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина (УрФУ), Екатеринбург, Россия,  
**Александр Дмитриевич Лаптев**, бакалавр кафедры «Турбины и двигатели» Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина (УрФУ), Екатеринбург, Россия,  
**Владимир Андреевич Следнев**, бакалавр кафедры «Турбины и двигатели» Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина (УрФУ), Екатеринбург, Россия,  
**Владислав Александрович Шурупов**, бакалавр кафедры «Турбины и двигатели» Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина (УрФУ), Екатеринбург, Россия

## МОДЕРНИЗАЦИЯ ВПУСКНОГО ТРАКТА ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ КВАДРАТНЫХ И ТРЕУГОЛЬНЫХ КАНАЛОВ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К АВТОМОБИЛЬНОМУ ДВИГАТЕЛЮ РАЗМЕРНОСТИ 8,2/7,1

**Leonid Valeryevich Plotnikov**, DSc in Engineering, Professor, Turbines and Engines Department, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin (UrFU), Ekaterinburg, Russia,  
**Danil Alexeevich Davydov**, bachelor, Turbines and Engines Department, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin (UrFU), Ekaterinburg, Russia,  
**Dmitriy Nikolaevich Krasilnikov**, bachelor, Turbines and Engines Department, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin (UrFU), Ekaterinburg, Russia,  
**Alexander Dmitrievich Laptev**, bachelor, Turbines and Engines Department, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin (UrFU), Ekaterinburg, Russia,  
**Vladimir Andreevich Slednev**, bachelor, Turbines and Engines Department, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin (UrFU), Ekaterinburg, Russia,  
**Vladislav Alexandrovich Shurupov**, bachelor, Turbines and Engines Department, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin (UrFU), Ekaterinburg, Russia

## Modernization of the intake tract by using square and triangular channels in relation to an automobile engine with dimensionality 8.2/7.1

### Аннотация

Статья посвящена газодинамическому совершенствованию процессов в цилиндре двигателя внутреннего сгорания (ДВС) за счет применения профилированных каналов во впускном тракте. На основе экспериментальных исследований газодинамики стационарных потоков воздуха получены термограммы распределения газового потока внутри цилиндра для впускного тракта с каналами, имеющими поперечные сечения в форме круга, квадрата и треугольника, для различных начальных скоростей. Структура потока внутри цилиндра изучена при помощи метода тепловизуализирующей съемки, средняя скорость потока воздуха определена с использованием метода тепловой анемометрии. Установлено, что применение профилированных каналов во впускном тракте приводит к существенному изменению структуры потока внутри цилиндра, улучшению равномерности распределения поля скоростей и уменьшению застойных зон, а в перспективе позволит увеличить удельную мощность ДВС, снизить удельный расход топлива и сократить количество вредных веществ в отработавших газах.

**Ключевые слова:** автомобильный двигатель, система впуска, профилированный трубопровод, цилиндр, аэродинамика, структура потока, тепловизуализирующая съемка

### Abstract

The article is devoted to the gas-dynamic improvement of processes in the cylinder of an internal combustion engine by using profiled channels in the intake tract. Based on experimental studies of the gas dynamics of stationary air flows, thermograms of distribution of the gas flow inside the cylinder for the intake tract with channels having cross sections in the form of a circle, square and triangle for various initial velocities were obtained. The flow structure inside the cylinder was studied using the method of thermal survey, the average air flow velocity was determined using the method of thermal anemometry. It is established that the use of profiled channels in the intake tract leads to a significant change in the flow structure inside the cylinder, improving uniformity of distribution of the velocity field and reducing stagnant zones, and in the future it will increase the specific power of the internal combustion engine, reduce specific fuel consumption and the amount of harmful substances in the exhaust gases.

**Keywords:** automobile engine, intake system, profiled pipeline, cylinder, aerodynamics, flow structure, thermal survey

DOI: 10.20291/1815-9400-2023-3-84-90

e-mail: plotnikovlv@mail.ru, dda\_2003@bk.ru, dima\_krasitnikov\_2017@mail.ru, noelll@bk.ru, vovik\_super\_45@mail.ru, shurupov.vladislav@yandex.ru

ТРАНСПОРТ УРАЛА / № 3 (78) / 2023

Дата поступления: 12.04.2023

## ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день поршневой двигатель внутреннего сгорания (ДВС) — один из самых распространенных источников энергии, который используется в различных отраслях жизнедеятельности человека (от бытовых потребностей и транспорта до энергетики и авиации) и в разных климатических условиях (от Арктики до экватора). Поэтому улучшение эксплуатационных и экологических показателей ДВС путем настройки параметров рабочего цикла и доводки основных систем является актуальной задачей в развитии тепловых двигателей [1]. В частности, газодинамическое совершенство конструкции впускной системы определяет распределение потока внутри цилиндра и соответственно качество перемешивания топлива и воздуха, а также эффективность и экологичность работы поршневого двигателя в целом [2, 3].

Обзор литературы показывает, что изучением газодинамических и тепловых процессов в газозвуковых трактах ДВС активно занимаются отечественные и зарубежные специалисты. Проведем краткий анализ основных результатов по данной тематике. Существуют исследования, направленные на решение перманентной проблемы впускной системы — выбор оптимального диаметра и длины коллектора и подающих каналов [4, 5]. Показано, что подбор правильной геометрии приводит к росту удельной мощности, снижению удельного расхода топлива и снижению выбросов вредных веществ на определенных режимах работы поршневого двигателя. Также существуют исследования по газодинамическому совершенствованию системы газообмена путем модернизации конструкции трубопроводов и каналов [6, 7]. Обычно это связано с доводкой отдельных элементов впускной системы (сглаживание углов, уменьшение шероховатости поверхности, лимитированное изменение геометрии и т.д.). Эти меры способствуют незначительному улучшению эксплуатационных показателей ДВС. В некоторых случаях специалисты целенаправленно стремятся создать закрутку потока во впускной системе с целью улучшения перемешивания топлива и воздуха в цилиндре двигателя [8]. Установлено, что управляемые вихри на впуске вызывают рост мощности поршневого двигателя на величину до 6 %. При этом известно, что, помимо конфигурации впускной системы, на технико-экономические показатели двигателя оказывают существенное влияние свойства потока воздуха в процессе впуска, такие как температура, высота над уровнем моря (давление), частота и амплитуда пульсаций, величина начальной скорости и др. [9–11]. Многие ученые и специалисты работают над выявлением закономерностей между параметрами рабочего цикла и внешними факторами (начальными условиями на впуске). Более того, за счет изучения и поиска способов управления газодинамикой потоков во впускной системе можно снизить шум и создать эффект волнового (динамического) наддува в поршневом ДВС [12, 13]. Отдельное направление исследований посвящено улучшению газодинамики впускного и выпускного трактов поршневого двигателя с системой турбонаддува [14, 15]. В данном случае на качество процесса впуска оказывает влияние ряд дополнительных факторов, связанных с работой турбокомпрессора (частота вращения ротора, степень повышения давления, количество лопаток, инерци-

онность и т.д.). Таким образом, проектирование газозвукового тракта ДВС с турбонаддувом является важной наукоемкой задачей, связанной с выполнением большого количества расчетов, математическим моделированием, стендовыми испытаниями и лабораторными экспериментами.

Цель исследования, представленного в данной статье, заключалась в проверке предположения, что профилирование трубопровода впускного тракта автомобильного ДВС (размерность 8,2/7,1) оказывает положительное влияние на структуру потока (поля скоростей) внутри цилиндра и на секвестирование застойных зон, а значит, потенциально должно привести к увеличению удельной мощности, уменьшению удельного расхода топлива и снижению концентрации вредных веществ в отработавших газах автомобильного двигателя. Это экспериментальное исследование является логическим продолжением предыдущих, в которых аналогичные задачи изучались с помощью численного моделирования газодинамики стационарных потоков во впускной системе и цилиндре поршневого двигателя [16, 17].

## ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ АППАРАТУРА И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ОПЫТОВ

Распределение потока внутри цилиндра при подаче воздуха через разные конфигурации впускных систем изучали на экспериментальном стенде (рис. 1). Он состоял из четырех продувочных агрегатов, двух канальных нагревателей с тэнами мощностью 1,2 и 2 кВт (установленных последовательно), впускного тракта с разными трубопроводами, впускного клапана, а также прозрачного цилиндра с сеткой внутри, служащей для визуализации потока с помощью метода тепловизирующей съемки.

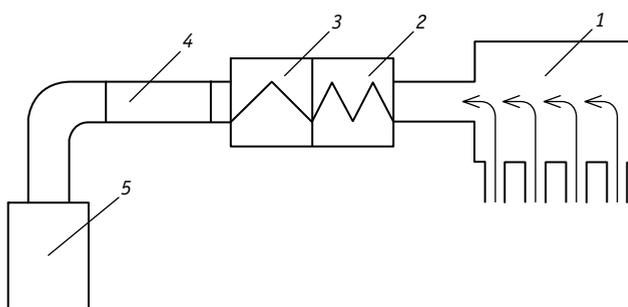


Рис. 1. Схема экспериментального стенда:

- 1 — ресивер; 2 — нагреватель мощностью 1,2 кВт;
- 3 — нагреватель мощностью 2 кВт; 4 — впускной трубопровод;
- 5 — исследуемый цилиндр с сеткой

Опыты проводили при стационарном режиме течения воздуха во впускном тракте и цилиндре. При этом впускной клапан зафиксирован в полностью открытом положении (высота подъема клапана 10 мм), а движение воздуха соответственно создавалось продувочными агрегатами, подающими его через нагреватель во впускной трубопровод и затем в цилиндр. Температура воздуха после нагревателей была примерно 60–65 °С. Значения средней скорости потока во впускном трубопроводе и, создаваемой продувочными агрегатами 1–4, соответственно 21, 33, 45 и 62 м/с.

Распределение потока воздуха внутри цилиндра исследовали для впускных трактов с каналами разной формы поперечного сечения: в виде круга (базовая конфигурация), квадрата и равностороннего треугольника. Известно, что в таких каналах возникают устойчивые продольные вихревые структуры, оказывающие существенное влияние на газодинамические характеристики газового потока [18]. Для исследуемого впускного тракта внутренний диаметр круглого трубопровода составлял 32 мм, сторона квадрата — 32 мм, треугольника — 55 мм. Геометрические размеры профилированных каналов определяли, исходя из равенства эквивалентного гидравлического диаметра для всех конфигураций трактов. Следует отметить, что длина профилированного канала составляла примерно 30 % (150 мм) от длины всей впускной системы (450 мм). Трубопроводы с квадратным и треугольным каналами изготавливали на 3D-принтере из ABS-пластика. Все конфигурации впускных каналов имели технически гладкую поверхность (средняя шероховатость 6,3 мкм).

Тепловизионные измерения проводили в двух контрольных сечениях (рис. 2). Продольное сечение I–I (рис. 2а) располагалось внутри цилиндра и проходило через центр впускного клапана вдоль впускного тракта. Поперечное сечение II–II (рис. 2б) также располагалось внутри цилиндра и проходило через его центр перпендикулярно сечению I–I.

При проведении экспериментов измерительной базой служило следующее оборудование:

тепловизор (модель Testo 890–2), с помощью которого были получены термограммы распределения газового потока внутри цилиндра;

термоанемометр постоянной температуры (модель Ирвис ТА-5.1), посредством которого были определены начальные средние скорости потока воздуха во впускном трубопроводе  $v$  (перед цилиндром).

Методика тепловизирующей съемки более подробно описана в статье [19].

### РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для исследования распределения газового потока внутри цилиндра двигателя в качестве базовой конфигурации был выбран впускной тракт с традиционным трубопроводом круглого сечения (рис. 3).

На рис. 4 представлены термограммы эксперимента распределения газового потока внутри цилиндра с впускным трубопроводом круглого сечения при скорости потока, равной 33 и 45 м/с. На рис. 4а и 4б отчетливо виден газовый поток в продольном сечении, визуализированный с помощью тепловизора. Темно-красные и желтые области — разогретый поток воздуха, поступающий от продувочных агрегатов (при этом чем темнее цвет, тем выше температура потока). Установлено, что наполнение происходит в основном вблизи стенок цилиндра, оставляя центральную часть незаполненной. Соответственно можно сделать вывод о наличии застойных зон в центре цилиндра. Это может привести к ухудшению наполнения камеры сгорания и к неравномерности перемешивания топлива и воздуха. Для совершенствования эксплуатационных показателей поршневых двигателей необходимо стремиться к равномерному наполнению цилиндра и уменьшению застойных зон [20].

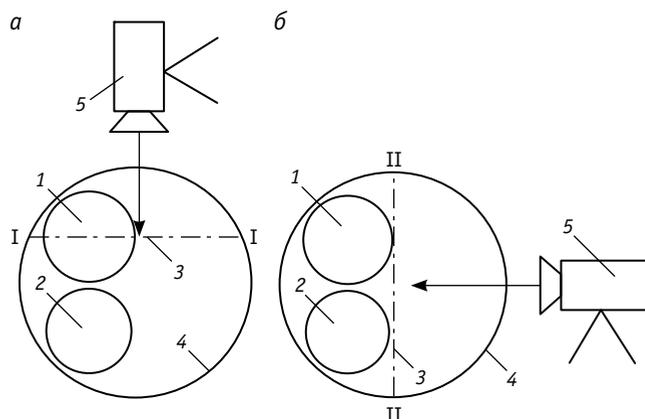


Рис. 2. Контрольные сечения (а — продольное I–I, б — поперечное II–II) для тепловизирующей съемки:

1 — впускной клапан; 2 — выпускной клапан; 3 — сетка визуализации; 4 — цилиндр; 5 — тепловизор

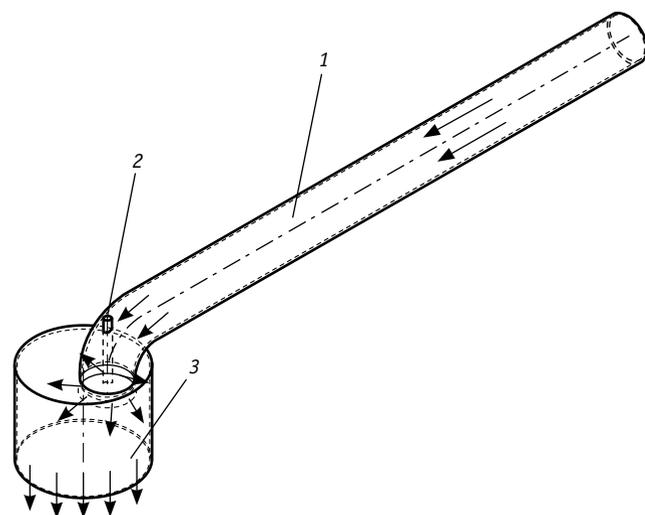


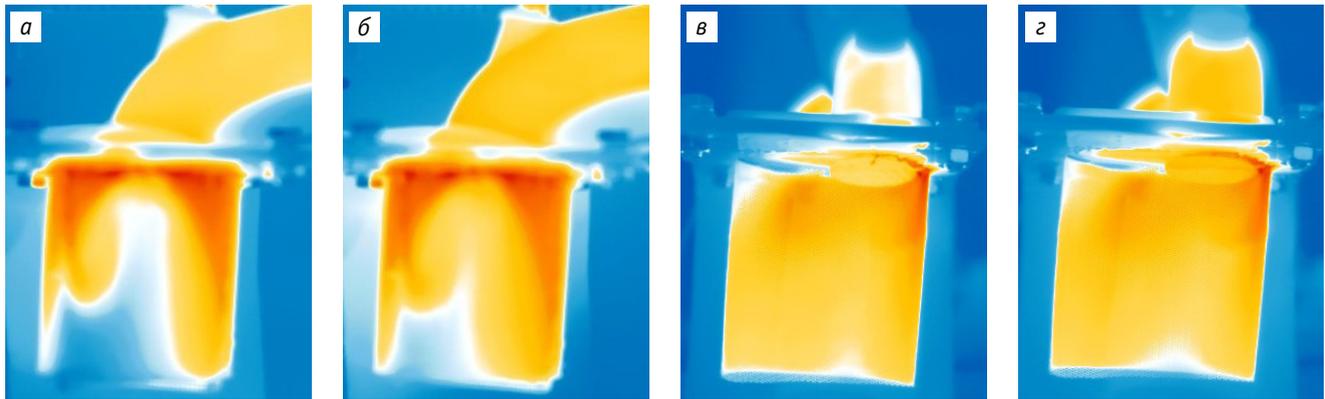
Рис. 3. Схема впускного тракта с трубопроводом круглого поперечного сечения (стрелки показывают направление движения воздуха):

1 — круглый впускной трубопровод; 2 — клапан; 3 — цилиндр

Из рис. 4в и 4г видно, что в поперечном сечении распределение потока воздуха по цилиндру фактически равномерное. Наблюдается несколько более интенсивное движение воздуха вблизи клапанной щели (более темные области в верхнем правом углу).

На следующем этапе было исследовано распределение потока внутри цилиндра с впускным трактом, имеющим трубопровод с профилированным участком треугольного сечения (рис. 5 и 6).

На рис. 6а и 6б отчетливо видно, что при использовании треугольного канала во впускном тракте основная часть потока распространяется вдоль стенок цилиндра, как и в базовой конфигурации (см. рис. 4а и 4б). Однако в данном случае можно наблюдать, что в центральной части цилиндра незаполнен-



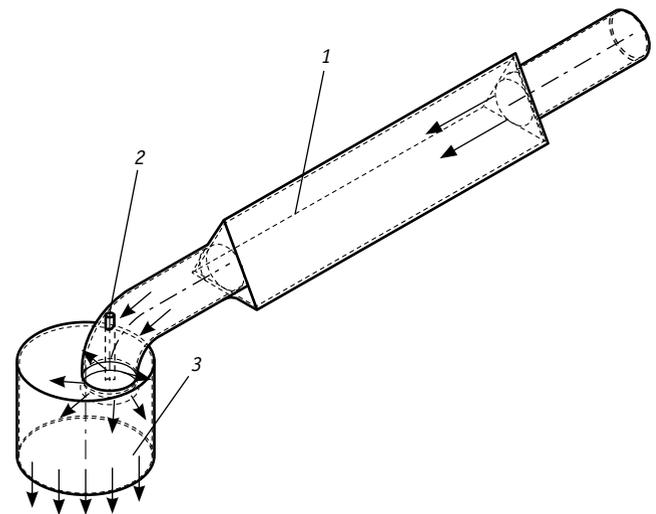
**Рис. 4. Термограммы распределения газового потока внутри цилиндра для впускного тракта с круглым трубопроводом для разных контрольных сечений и начальных скоростей  $v$ :**

*a* — сечение I–I,  $v = 33$  м/с; *б* — сечение I–I,  $v = 45$  м/с; *в* — сечение II–II,  $v = 33$  м/с; *г* — сечение II–II,  $v = 45$  м/с

ные зоны существенно меньшего размера, чем в опыте с впускным трубопроводом круглого сечения, т.е. распределение потока внутри цилиндра более равномерное. Следует отметить, что этот эффект наблюдается во всем исследуемом диапазоне скоростей потока во впускном тракте. Равномерное распределение газового потока внутри цилиндра при использовании профилированного канала можно объяснить влиянием вихревых структур, образовавшихся в треугольном трубопроводе, которые действуют как вихревой жгут, стабилизируют поток и препятствуют формированию застойных зон [21].

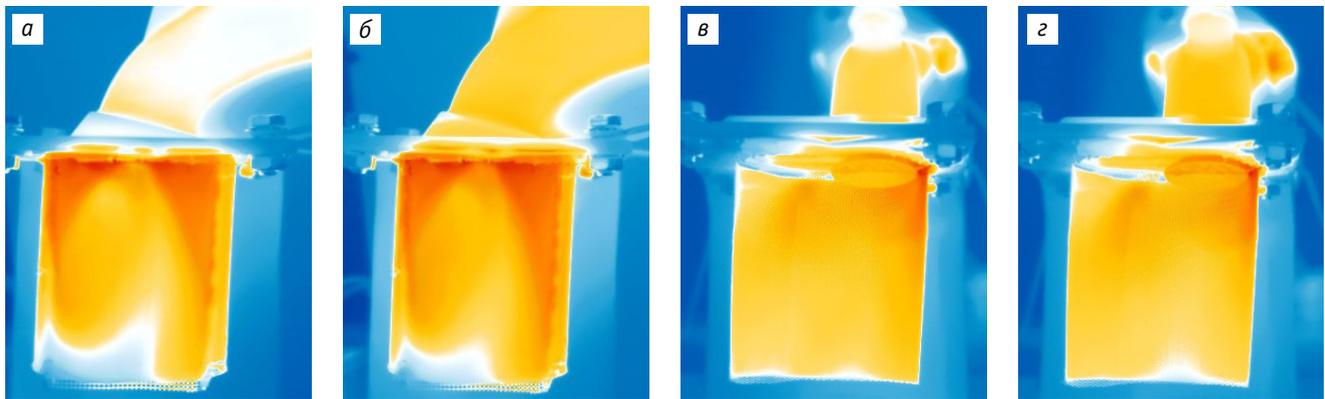
При этом структура течения в поперечном контрольном сечении (II–II) для впускного тракта с треугольным каналом фактически не отличается от таковой для базовой конфигурации (рис. 6*в* и 6*г*). Также наблюдается фактически равномерное распределение потока внутри цилиндра с несколько более интенсивным течением в клапанной щели верхней части цилиндра.

Отсутствие застойных зон и равномерное распределение потока внутри цилиндра свидетельствуют о потенциальном улучшении качества наполнения, создании более благоприятных условий для процессов смесеобразования и сгорания, а следовательно, об увеличении удельной мощности и снижении удельного расхода топлива (роста КПД) поршневого двигателя.



**Рис. 5. Схема впускного тракта с профилированным каналом треугольного сечения (стрелки указывают направление движения воздуха):**

1 — впускной трубопровод с треугольным каналом; 2 — клапан; 3 — цилиндр



**Рис. 6. Термограммы распределения газового потока внутри цилиндра для впускного тракта с треугольным трубопроводом для разных контрольных сечений и начальных скоростей  $v$ :**

*a* — сечение I–I,  $v = 33$  м/с; *б* — сечение I–I,  $v = 45$  м/с; *в* — сечение II–II,  $v = 33$  м/с; *г* — сечение II–II,  $v = 45$  м/с

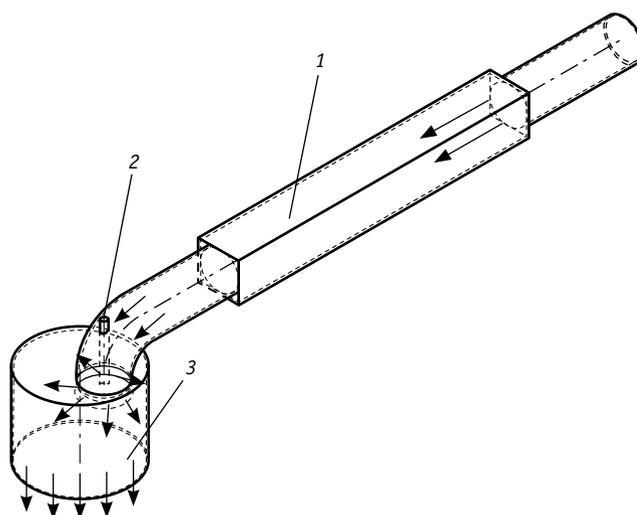
Далее осуществлялось исследование распределения потока внутри цилиндра с впускным трактом, оснащенным трубопроводом с профилированным участком квадратного сечения (рис. 7). На рис. 8 представлены термограммы структуры течения внутри цилиндра после прохождения газового потока через впускной тракт с трубопроводом квадратного сечения.

Установлено, что при использовании квадратного канала во впускном тракте в продольном сечении (I–I) распределение газового потока внутри цилиндра еще более равномерное, чем в базовой конфигурации и системе с треугольным трубопроводом (рис. 8а и 8б). Застойные зоны отсутствуют, в центре цилиндра наблюдается интенсивное движение воздуха. Следует отметить, что данная закономерность сохраняется во всем исследуемом скоростном диапазоне потока воздуха. При этом структура потока в поперечном сечении цилиндра при использовании квадратного канала фактически не отличается от таковой для впускного тракта с круглым и треугольным поперечным сечением (рис. 8в и 8г).

Таким образом, можно констатировать, что применение квадратного канала во впускном тракте потенциально будет иметь наилучший результат с точки зрения равномерности распределения потока внутри цилиндра и качества (полноты) его наполнения рабочим телом. Соответственно можно предположить, что эксплуатационные и экологические показатели поршневого двигателя с профилированными каналами будут несколько лучше по сравнению с базовой конфигурацией впускного тракта.

## ВЫВОДЫ

Выполнение исследовательской работы показало, что использование трубопроводов с квадратным и треугольным сечением во впускном тракте благоприятно влияет на газодинамику стационарных потоков внутри цилиндра поршневого двигателя. Это объясняется тем, что продольные вихревые структуры, образующиеся в углах профилированных трубопроводов, оказывают существенное влияние на газодинамические характеристики течения во впускной системе и в цилиндре двигателя:



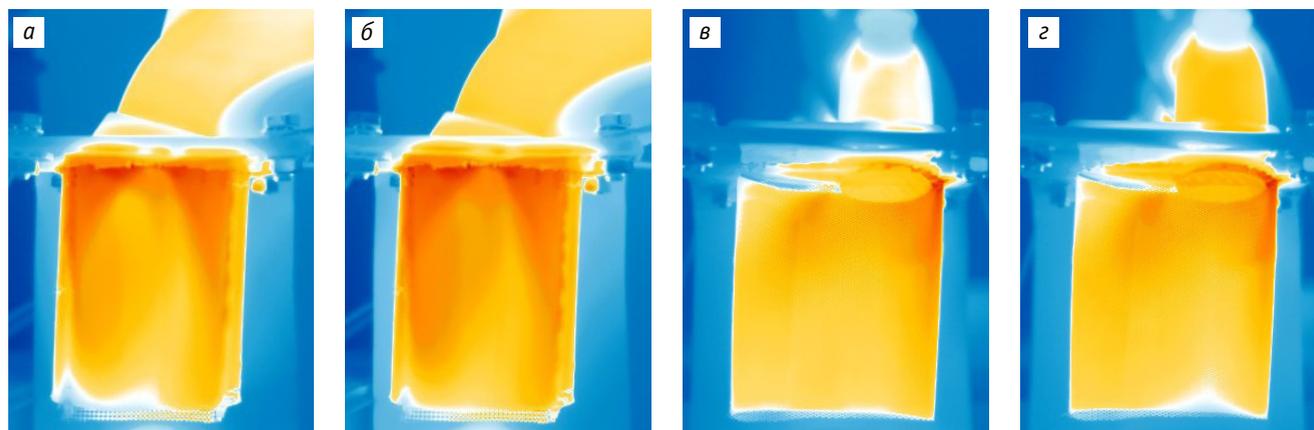
**Рис. 7. Схема впускного тракта с профилированным каналом квадратного сечения (стрелки показывают направление движения воздуха):**  
1 — впускной трубопровод с квадратным каналом;  
2 — клапан; 3 — цилиндр

при использовании разных форм поперечного сечения канала значительно изменяется структура потока газа внутри цилиндра;

при использовании профилированных каналов улучшается равномерность распределения поля скоростей внутри цилиндра;

в районе клапанной щели, центральной части цилиндра и впускном тракте уменьшаются размер и количество застойных зон.

Таким образом, поперечное профилирование каналов во впускной системе может быть использовано при модернизации и проектировании газозвудушных трактов поршневых двигателей с целью их газодинамического совершенствования. Потенциально это приведет к росту удельной мощности (вследствие повышения качества наполнения цилиндра рабо-



**Рис. 8. Термограммы распределения газового потока внутри цилиндра для впускного тракта с квадратным трубопроводом для разных контрольных сечений и начальных скоростей  $v$ :**

а — сечение I–I,  $v = 33$  м/с; б — сечение I–I,  $v = 45$  м/с; в — сечение II–II,  $v = 33$  м/с; г — сечение II–II,  $v = 45$  м/с

чим телом), сокращению удельного расхода топлива (вследствие улучшения перемешивания топливно-воздушной смеси) и снижению вредных веществ в отработавших газах (вследствие более полного сгорания рабочего тела из-за отсутствия застойных зон).

Дальнейшие исследования по данной тематике будут направлены на изучение смешиваемости воздуха с топливом в цилиндре при различном профиле трубопроводов, а также на оценку влияния прорывов газов через клапанную щель во впускные и выпускные коллекторы при различном профиле канала.

## Литература

1. IJER editorial: The future of the internal combustion engine / R. D. Reitz, H. Ogawa, R. Payri, T. Fansler [et al.] // *International Journal of Engine Research*. 2020. Vol. 21 (1). Pp. 3–10.
2. Драганов Б. Х., Круглов М. Г., Обухова В. С. Конструирование впускных и выпускных каналов двигателей внутреннего сгорания. Киев : Вища школа, 1987. 175 с.
3. 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.
4. Optimization Analysis of Engine Intake System Based on Coupling Matlab-Simulink with GT-Power / F. Jiang, M. Li, J. Wen [et al.] // *Mathematical Problems in Engineering*. 2021. Vol. 2021. Article number 6673612.
5. Short engine intakes: Design and trade-off aerodynamic recommendations / U. Vyas, J. Braun, V. Andreoli, G. Paniagua // *Aerospace Science and Technology*. 2023. Vol. 134 (10). Article number 108164.
6. Абросимова М. В., Жолобов Л. А., Шелякин И. Н. Сравнительные испытания штатной и модернизированной впускных систем двигателя в режиме прокрутки // *Вестник Чувашской государственной сельскохозяйственной академии*. 2017. № 1 (1). С. 43–50. ISSN 2587-9405.
7. Мохамед Б., Кароли Я., Зеленцов А. А. Трехмерное моделирование течения газа во впускной системе автомобиля «Формулы студент» // *Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии*. 2020. Т. 13. № 5. С. 597–610. ISSN 1999-494X.
8. Study on dynamic characteristics of intake system and combustion of controllable intake swirl diesel engine / G. Wang, W. Yu, X. Li [et al.] // *Energy*. 2019. Vol. 180. Pp. 1008–1018.
9. Хрящёв Ю. Е., Бахмицкий Н. С., Гудкевич А. И. Алгоритм корректировки воздухоподдачи газового двигателя ЯМЗ-534 CNG // *История и перспективы развития транспорта на севере России*. 2017. № 1. С. 164–168.
10. Research of the modernized intake system of the gasoline engine / M. Magats, Z. Goshko, Y. Vagula, A. Uzhva // *Automobile Transport*. 2021. Vol. 49 (49). Pp. 5–12.
11. Li S., Hu X., Chen C. Commercial Vehicle Intake System Flow Field Mechanism Analysis // *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*. 2020. Vol. 555 (1). Article number 012113.
12. Xu C., Cho H. Analysis on the Noise Reduction of Engine with Air Intake Resonator in Engine Intake System // *International Journal of Engineering and Technology*. 2018. Vol. 10 (1). Pp. 149–153.
13. Губайдуллина Р. Р., Минашин В. С. Анализ впускной системы с рестриктором // *Проблемы науки*. 2018. № 7 (31). С. 41–42. ISSN 2413-2101.
14. Шестаков Д. С., Пронин И. Е. Доводка рабочего процесса тепловозных дизелей 8ЧН21/21 с российскими турбокомпрес-

## References

1. Reitz R. D., Ogawa H., Payri R., Fansler T. [et al.]. IJER editorial: The future of the internal combustion engine. *International Journal of Engine Research*. 2020. Vol. 21 (1). Pp. 3–10.
2. 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.
3. 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.
4. Jiang F., Li M., Wen J. [et al.]. Optimization Analysis of Engine Intake System Based on Coupling Matlab-Simulink with GT-Power. *Mathematical Problems in Engineering*. 2021. Vol. 2021. Article number 6673612.
5. Vyas U., Braun J., Andreoli V., Paniagua G. Short engine intakes: Design and trade-off aerodynamic recommendations. *Aerospace Science and Technology*. 2023. Vol. 134 (10). Article number 108164.
6. Abrosimova M. V., Zholobov L. A., Shelyakin I. N. Comparative tests of the regular and modernized engine inlet systems in scroll mode [Svravnitel'nye ispytaniya shtatnoy i modernizirovannoy vpusknykh sistem dvigatelya v rezhime prokrutki]. *Vestnik Chuvash State Agrarian Academy*. 2017. No. 1 (1). Pp. 43–50. ISSN 2587-9405.
7. Mohamad B., Karoly J., Zelentsov A. A. 3D simulation of gas flow into the formula student car intake system [Trehmernoje modelirovaniye techeniya gaza vo vpusknoy sisteme avtomobilya «Formuly student»]. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*. 2020. Vol. 13. No. 5. Pp. 597–610. ISSN 1999-494X.
8. Wang G., Yu W., Li X. [et al.]. Study on dynamic characteristics of intake system and combustion of controllable intake swirl diesel engine. *Energy*. 2019. Vol. 180. Pp. 1008–1018.
9. Khyryashchov Yu. Ye., Bakhmitskiy N. S., Gudkevich A. I. Air supply adjustment algorithm for the YaMZ-53424 CNG gas-engine [Algoritm korrektyrovki vozdukhopodachi gazovogo dvigatelya YaMZ-534 CNG]. History and prospects of transport development in the north of Russia. 2017. No. 1. Pp. 164–168.
10. Magats M., Goshko Z., Vagula Y., Uzhva A. Research of the modernized intake system of the gasoline engine. *Automobile Transport*. 2021. Vol. 49 (49). Pp. 5–12.
11. Li S., Hu X., Chen C. Commercial Vehicle Intake System Flow Field Mechanism Analysis. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*. 2020. Vol. 555 (1). Article number 012113.
12. Xu C., Cho H. Analysis on the Noise Reduction of Engine with Air Intake Resonator in Engine Intake System. *International Journal of Engineering and Technology*. 2018. Vol. 10 (1). Pp. 149–153.
13. Gubaydullina R. R., Minashin V. S. Analysis of the intake system with a restrictor [Analiz vpusknoy sistemy s restriktorom]. *Problems of Science*. 2018. No. 7 (31). Pp. 41–42. ISSN 2413-2101.
14. Shestakov D. S., Pronin I. E. Adjustment of operation of 8ChN21/21 diesel locomotive engines with Russian TKR180 turbochargers [Dovodka rabocheho protsessya teplovoznykh dizeley 8ChN21/21 s rossiyskimi turbokompressorami TKR180]. *Transport of the Urals*. 2015.

сорами ТКР180 // Транспорт Урала. 2015. № 4 (47). С. 81–85. DOI: 10.20291/1815-9400-2015-4-81-85. ISSN 1815-9400.

15. Шестаков Д. С., Лашманов Д. А. Модернизация выпускных коллекторов тепловозного дизель-генератора ДГ882Л // Транспорт Урала. 2020. № 3 (61). С. 68–71. DOI: 10.20291/1815-9400-2020-3-68-71. ISSN 1815-9400.
16. Плотников Л. В., Неволин А. М., Мисник М. О. Газодинамическое совершенствование системы впуска автомобильного двигателя за счет поперечного профилирования каналов // Транспорт Урала. 2017. № 3 (54). С. 82–86. DOI: 10.20291/1815-9400-2017-3-82-86. ISSN 1815-9400.
17. Газодинамический анализ процесса впуска с разными конструкциями канала в головке блока цилиндров в автомобильном двигателе / Л. В. Плотников, И. А. Калинин, Л. Е. Осипов [и др.] // Транспорт Урала. 2022. № 3 (74). С. 60–66. DOI: 10.20291/1815-9400-2022-3-60-66. ISSN 1815-9400.
18. Идельчик И. Е. Аэрогидродинамика технологических аппаратов. Подвод, отвод и распределение потока по сечению аппаратов. Москва : Машиностроение, 1983. 351 с.
19. Zhilkin B. P., Larionov I. D., Shuba A. N. Applications of an infrared imager for determining temperature fields in gas flows // Instruments and experimental techniques. 2004. Vol. 4. Pp. 545–546.
20. Jemni M. A., Kantchev G., Abid M. S. Influence of intake manifold design on in-cylinder flow and engine performances in a bus diesel engine converted to LPG gas fuelled, using CFD analyses and experimental investigations // Energy. 2011. Vol. 36. No. 5. Pp. 2701–2715.
21. Плотников Л. В., Жилкин Б. П., Бродов Ю. М. Экспериментальное исследование и совершенствование процессов газообмена поршневых и комбинированных ДВС в условиях газодинамической нестационарности // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2015. № 12 (669). С. 35–44. ISSN 0536-1044.

No. 4 (47). Pp. 81–85. DOI: 10.20291/1815-9400-2015-4-81-85. ISSN 1815-9400.

15. Shestakov D. S., Lashmanov D. A. Modernization of exhaust manifolds of DG882L diesel-generator for diesel locomotives [Modernizatsiya vypusnykh kollektorov teplovoznogo dizel'-generatora DG882L]. Transport of the Urals. 2020. No. 3 (61). Pp. 68–71. DOI: 10.20291/1815-9400-2020-3-68-71. ISSN 1815-9400.
16. Plotnikov L. V., Nevolin A. M., Misnik M. O. Gas dynamics modernization of intake system of automobile engine by transverse profiling of channels [Gazodinamicheskoe sovershenstvovanie sistemy vpuska avtomobil'nogo dvigatelya za schet poperechnogo profilirovaniya kanalov]. Transport of the Urals. 2017. No. 3 (54). Pp. 82–86. DOI: 10.20291/1815-9400-2017-3-82-86. ISSN 1815-9400.
17. Plotnikov L. V., Kalinin I. A., Osipov L. E. [et al.]. Gas dynamic analysis of admission process in automobile engine with various designs of channel in head of cylinder block [Gazodinamicheskiy analiz protsesa vpuska s raznymi konstruktivnymi kanalov v golovke bloka tsilindrov v avtomobil'nom dvigatele]. Transport of the Urals. 2022. No. 3 (74). Pp. 60–66. DOI: 10.20291/1815-9400-2022-3-60-66. ISSN 1815-9400.
18. Idel'chik I. E. Aerohydrodynamics of technological apparatuses. Approach, retraction and distribution of flow along the section of apparatus [Aerogidrodinamika tekhnologicheskikh apparatov. Podvod, otvod i raspredelenie potoka po secheniyu apparatov]. Moscow, Machinery, 1983. 351 p.
19. Zhilkin B. P., Larionov I. D., Shuba A. N. Applications of an infrared imager for determining temperature fields in gas flows. Instruments and experimental techniques. 2004. Vol. 4. Pp. 545–546.
20. Jemni M. A., Kantchev G., Abid M. S. Influence of intake manifold design on in-cylinder flow and engine performances in a bus diesel engine converted to LPG gas fuelled, using CFD analyses and experimental investigations. Energy. 2011. Vol. 36. No. 5. Pp. 2701–2715.
21. Plotnikov L. V., Zhilkin B. P., Brodov Yu. M. Experimental study and improvement of gas exchange processes in piston and combined internal combustion engines in unsteady gas-dynamic conditions [Eksperimental'noe issledovanie i sovershenstvovanie protsessov gazoobmena porshnevnykh i kombinirovannykh DVS v usloviyakh gazodinamicheskoy nestatsionarnosti]. BMSTU Journal of Mechanical Engineering. 2015. No. 12 (669). Pp. 35–44. ISSN 0536-1044.

Объем статьи 0,9 авторских листа

УДК 621.43.013

Александр Владимирович Гриценко, доктор технических наук, профессор кафедры «Автомобильный транспорт» Южно-Уральского государственного университета (национального исследовательского университета), профессор кафедры «Технический сервис машин, оборудования и безопасности жизнедеятельности» Южно-Уральского государственного аграрного университета (ЮрГАУ), Челябинск, Россия,

Константин Вячеславович Глемба, кандидат технических наук, доцент, научный сотрудник кафедры «Автомобильный транспорт» Южно-Уральского государственного университета (национального исследовательского университета), доцент кафедры «Эксплуатация машинно-тракторного парка и технология и механизация животноводства» Южно-Уральского государственного аграрного университета (ЮУрГАУ), Челябинск, Россия,

Александр Сергеевич Меньшенин, аспирант кафедры «Технический сервис машин, оборудования и безопасности жизнедеятельности» Южно-Уральского государственного аграрного университета (ЮрГАУ), Челябинск, Россия,

Степан Андреевич Чоккой, аспирант кафедры «Технический сервис машин, оборудования и безопасности жизнедеятельности» Южно-Уральского государственного аграрного университета (ЮрГАУ), Челябинск, Россия

## ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ БЕНЗИНОВОГО АВТОМОБИЛЯ С АНТИТОКСИЧНОЙ СИСТЕМОЙ

Alexander Vladimirovich Gritsenko, DSc in Engineering, Professor, Automobile Transport Department, South Ural State University (NIU), Professor, Technical Service of Machinery, Equipment and Life Safety Department, South Ural State Agrarian University (SUrSAU), Chelyabinsk, Russia,

Konstantin Vyacheslavovich Glemba, PhD in Engineering, Associate Professor, Researcher, Automobile Transport Department, South Ural State University (NIU), Associate Professor, Operation of the Machine and Tractor Fleet, and Technology and Mechanization of Animal Husbandry Department, South Ural State Agrarian University (SUrSAU), Chelyabinsk, Russia,

Alexander Sergeevich Menshenin, postgraduate student, Technical Service of Machinery, Equipment and Life Safety Department, South Ural State Agrarian University (SUrSAU), Chelyabinsk, Russia,

Stepan Andreevich Chokoy, postgraduate student, Technical Service of Machinery, Equipment and Life Safety Department, South Ural State Agrarian University (SUrSAU), Chelyabinsk, Russia

### Environmental aspects in operation of a gasoline car with antitoxic system

#### Аннотация

В Российской Федерации, в отличие от стран Европы, где действует стандарт Евро-6 и до 2025 г. предполагается внедрение Евро-7, пока принят стандарт Евро-5 и только формируется возможность введения Евро-6, однако производственно-техническая инфраструктура сервиса к этому не готова. В статье определены основные показатели, характеризующие качественное и количественное отличие топливно-воздушной смеси, их влияние на выходные параметры токсичности отработавших газов, подробно рассмотрены участки изменения параметров токсичности при варьировании основных рабочих режимов двигателя, проанализированы максимумы и минимумы значений параметров токсичности и возможные области их смещения при изменении технического состояния систем двигателя. В результате теоретических исследований установлено, что концентрация токсичных компонентов отработавших газов до попадания в конвертор может в несколько раз отличаться от режима к режиму. Такая эксплуатация на пределе максимальной степени преобразования каталитического нейтрализатора ускоряет его старение, приводит к потере эксплуатационных свойств и, как следствие, ухудшает показатели экологической безопасности автомобиля.

**Ключевые слова:** двигатель, диагностирование, тестовый метод, каталитический нейтрализатор, частота вращения коленвала, эквивалентное сечение, пропускная способность выхлопной системы

#### Abstract

In the Russian Federation, unlike the European countries, where the Euro-6 standard is in effect and introduction of Euro-7 is expected until 2025, the Euro-5 standard has been adopted and the possibility of introducing Euro-6 is only being formed, but the production and technical infrastructure of the service is not ready for this. The article defines the main parameters characterizing the qualitative and quantitative difference of the fuel-air mixture and their effect on the output parameters of exhaust gas toxicity, examines in detail the areas of change in toxicity parameters when varying the main operating modes of the engine, analyzes the maximum and minimum values of toxicity parameters and possible areas of their displacement in case of changing the technical condition of engine systems. As a result of theoretical studies, it was revealed that concentration of toxic components of exhaust gases before entering the converter may be several times different from mode to mode. Such operation at the limit of the maximum degree of conversion of the catalytic converter accelerates its aging, leads to the loss of operational properties and, as a result, to deterioration in the environmental safety of the car.

**Keywords:** engine, diagnostics, test method, catalytic converter, crankshaft speed, equivalent cross section, exhaust system throughput

DOI: 10.20291/1815-9400-2023-3-91-98

## ВВЕДЕНИЕ

**В** настоящее время отрасль машиностроения развивается по принципу обеспечения высоких экологических стандартов и возможного минимального вреда окружающей среде [1–3]. Разработаны международные требования к эксплуатационным качествам современного транспорта, который должен отвечать нормам экологических стандартов [4–6]. Так, в Российской Федерации выпускается автотранспорт, соответствующий нормам не ниже Евро-5 [7, 8], и в то же время в ограниченном количестве эксплуатируются автомобили с нормами экологических стандартов Евро-6 [9, 10]. Также показателна статистика продаж автомобилей на отечественном рынке (рис. 1), где лидирующие места начинают занимать российские и китайские машиностроительные заводы.

Рост отечественного рынка требует активного производства комплектующих, запчастей, узлов и агрегатов, следовательно, мгновенно перестроить производство автомобилей по стандарту Евро-6 в России не получится [9]. Данный стандарт был введен в 2014 г., но даже 8-летнего срока не хватило, чтобы отладить преобладающий выпуск автомобилей в нашей стране в соответствии с этим стандартом, причина — невозможность быстрого создания необходимой инфраструктуры [7]. Тем временем в 2025 г. в Европе предполагается внедрение стандарта Евро-7, в который также вписываются электромобили и их гибриды [4]. Стандарт Евро-7 уже сформирован в общем виде и жестко регламентирует выбросы оксида азота с 80 мг/км (Евро-6) до 60 мг/км (Евро-7). Такой норматив ожидается по всем без исключения категориям автотранспортных средств, помимо прочего, ограничениям будут также подвергнуты шины и тормозные механизмы, для которых ужесточат нормы выбросов продуктов истирания и износа. Кроме того, указаны общие временные рамки соответствия автотранспортных средств по пробегу (для Евро-7 это 200 тыс. км пробега в течение 7 лет непрерывной эксплуатации, для Евро-6 — 100 тыс. км в течение 5 лет), а для электромобилей в регламенте увеличили число циклов использования аккумуляторов [4]. По данным портала «Автостат», на 01.06.2022 г. общая

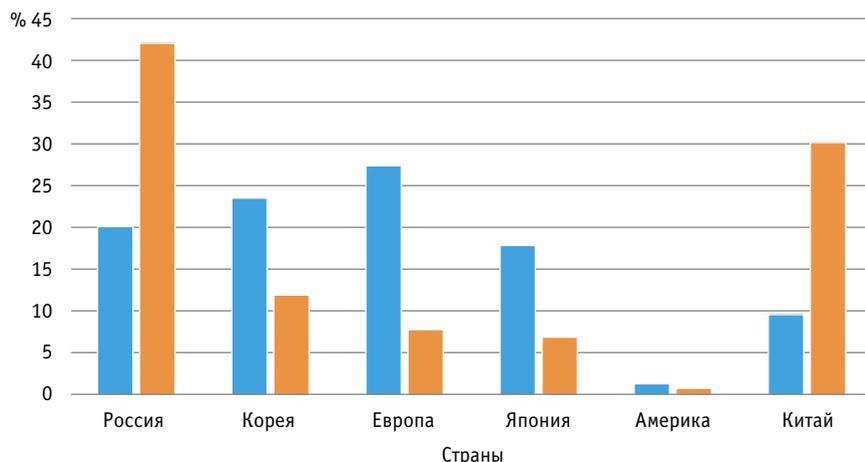


Рис. 1. Статистика продаж автомобилей на рынке Российской Федерации среди доминирующих производителей:  
■ — начало 2022 г.; ■ — конец 2022 г.

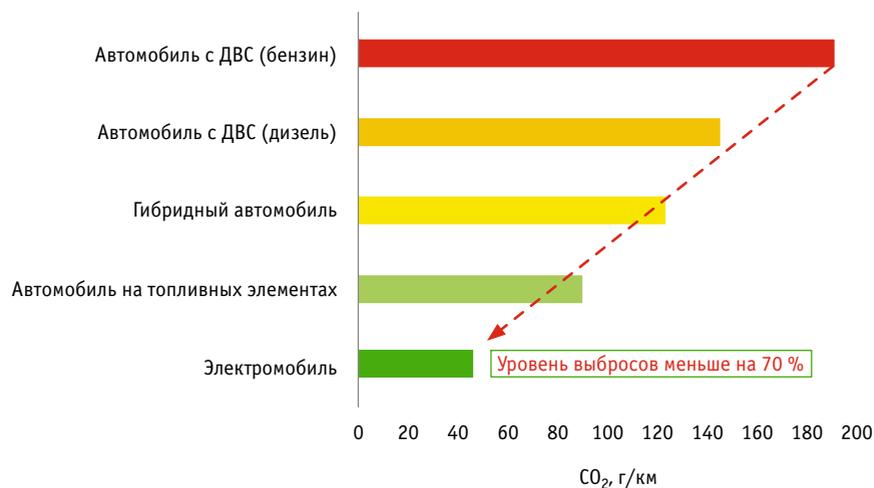


Рис. 2. Зависимость содержания CO<sub>2</sub> в отработавших газах от типа транспортных средств

численность электромобилей и их гибридов в России составила 23,3 тыс., среди них около 2 тыс. соответствуют стандарту Евро-7.

В настоящее время страны-лидеры в области автомобилестроения кроме прочих показателей учитывают и выбросы CO<sub>2</sub>, имеющие максимальные значения в зоне нормальных смесей, что сопряжено с интервалом в пределах 70–80 % от общего времени движения автомобиля. Анализ данных, представленных на рис. 2, показывает, что эффективность преобразования каталитическим нейтрализатором данного параметра составляет свыше 90 % [11, 12]. Но все же наблюдается наибольший максимум, который в отработавших газах (ОГ) у бен-

зиновых двигателей имеет уровень около 190 г/км, что считается довольно высоким по сравнению с другими типами транспортных средств [13].

Выбросы CO<sub>2</sub> дизельного двигателя, как видно из рис. 2, находятся на уровне 145 г/км и занимают второе место. Аналогично бензиновым двигателям каталитический нейтрализатор дизеля позволяет деактивировать более 90 % содержания CO<sub>2</sub>, но оставшаяся часть дает приведенный критический уровень показателя [14]. Промежуточное значение занимает вариант компоновки автотранспортного средства с гибридным двигателем — выбросы CO<sub>2</sub> находятся на уровне 123 г/км. Незначительное снижение выбросов достигается за счет комбиниро-

ванной работы двигателя внутреннего сгорания (ДВС) с другим типом двигателя. В зависимости от процентного перевеса в ту или иную сторону уровень выброса может быть существенно скорректирован, но в ущерб запасу хода автомобиля и его ресурсным параметрам. В последнее время значительными темпами развивается машиностроение на топливных элементах. Статистика выбросов для данного типа транспортных средств также представлена на рис. 2 и составляет 90 г/км. Сегодня для этой категории транспортных средств характерны сложности с обеспечением пожаро- и взрывобезопасности при эксплуатации. Несомненным лидером, как видно из рис. 2, является электромобиль [15, 16]. Относительные выбросы  $\text{CO}_2$  по нему снижены до предельного норматива, составляющего 45 г/км. Этот тип транспортного средства позволяет сократить выбросы  $\text{CO}_2$  более чем на 70 %, а лучшие представители электромобилей имеют минимальный выброс на уровне 30–35 г/км. Во многом такой существенный результат достигается за счет централизованной выработки электрической энергии. Кроме того, совершенствование конструкций аккумуляторов и зарядных устройств позволяет повысить КПД преобразования энергии, что также приводит к минимизации выбросов  $\text{CO}_2$  и в целом — к формированию нового стандарта Евро-7 [17, 18].

Цель исследований, представленных в настоящей статье, — повышение экологической безопасности автотранспорта за счет теоретического обоснования необходимости контроля технического состояния системы выпуска двигателя посредством анализа показателей токсичности отработавших газов на тестовых режимах с возможностью управления экологическими параметрами. Задачи исследований: анализ состояния и уровня экологической безопасности современного автотранспортного парка; установление теоретической взаимосвязи между уровнем токсичности отработавших газов двигателя, длительностью впрыска топлива, параметрами изменения технического состояния выпускного тракта и системы зажигания. Гипотезой является предположение, что различные сочетания неисправностей и предотказных состояний двигателя могут нивелироваться работой антитоксичных систем (таких как каталитический нейтрализатор, Adblue, сажевый фильтр), приводя выбросы отработавших газов к существенному минимуму по сравнению с эталонным ДВС. Однако такие комбинации состояний чреватой значительной нагрузкой на антитоксичные системы (в виде увеличения объемного количества и концентрации газов, переобогащения топливно-воздушной смеси, роста температуры и др.), что вызывает не только ускоренный износ и старение этих систем, но и уменьшение их ресурса.

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

При эксплуатации автомобиля электронный блок управления ДВС на основе анализа данных с датчиков может скорректировать богатую смесь в сторону обеднения до границ, прописанных в топливной карте [19–21]. Однако иногда невозможно скорректировать топливно-воздушную смесь (ТВС) из-за нарушения гидравлических характеристик топливной системы или других систем ДВС [22–24]. При этом ДВС постоянно работает в зоне переобогащения и перерасхода топлива, но бы-

вает и противоположный результат [25]. В любом случае важно непрерывно контролировать состав ТВС. Для этого используют такой оценочный показатель, как коэффициент избытка воздуха  $\alpha$  (отношение количества воздуха, приведенное к израсходованному на 1 кг поступившему топливу, к количеству воздуха, которое теоретически необходимо для полного сгорания 1 кг топлива):

$$\alpha = \frac{G_{\text{ВЦ}}}{L_0 G_{\text{ТЦ}}}, \quad (1)$$

где  $G_{\text{ВЦ}}$  — действительное количество воздуха, поступившего в цилиндр за один цикл, кг/цикл;  $G_{\text{ТЦ}}$  — цикловая подача топлива, кг/цикл;  $L_0$  — количество воздуха, теоретически необходимое для полного сгорания 1 кг топлива (кг воздуха/кг топлива). Для дизельных и бензиновых топлив значение  $L_0$  равно 14,32 и 14,85 кг воздуха/кг топлива соответственно.

Часто применяют показатель качества ТВС как соотношение между количеством поступивших в цилиндры воздуха и топлива, кг за цикл:

$$r = \frac{G_{\text{ВЦ}}}{G_{\text{ТЦ}}}. \quad (2)$$

Кроме того, для формирования необходимой цикловой подачи топлива и требуемого наполнения воздухом цилиндров ДВС необходимо учитывать степень сжатия  $\epsilon$ , т.е. отношение полного объема цилиндра к объему камеры сгорания.

Работа современного двигателя характеризуется широким набором режимных условий с послойным смесеобразованием либо на бедной гомогенной, либо на гомогенной стехиометрической смеси (в диапазоне от сверхбогатых смесей при  $\alpha = 0,6$  до сверхбедных при  $\alpha = 3,0$ ). Теоретические исследования позволяют сопоставить режимы работы ДВС с различными значениями коэффициента избытка воздуха  $\alpha$ :  $\alpha \approx 0,6$ –3,0 — послойное смесеобразование;  $\alpha \approx 1,1$ –1,6 — бедная гомогенная смесь;  $\alpha \approx 1,0$ –1,1 — гомогенная стехиометрическая смесь.

Как правило, пусковой режим любого современного двигателя осуществляется при работе микропроцессорной системы управления без обратной связи. При этом работа двигателя в течение нескольких начальных минут сопровождается упрощенным алгоритмом управления основными системами. Например, лямбда-зонд временно переключается в режим ожидания (для продления его срока службы), и процесс корректировки не осуществляется. В начале прогрева коэффициент  $\alpha$  соответствует самым наименьшим значениям (0,6–0,7), в цилиндры подается сверхбогатая ТВС, чтобы обеспечить ее гарантированное воспламенение при любых отрицательных температурах окружающей среды. С течением времени прогрева ДВС состав ТВС постепенно корректируется (на основе показаний датчика температуры охлаждающей жидкости). Заканчивается прогрев обеднением смеси до  $\alpha = 1$  и устойчивым поддержанием частоты вращения холостого хода ДВС.

Именно пусковому диапазону свойственна работа в зоне сверхбогатых смесей, причем чем холоднее климатические условия, тем меньше начальный установочный коэффициент  $\alpha$ .

Однако в холодных регионах даже при использовании сверхбогатых ТВС пуск ДВС затруднен, поэтому используются предпусковые подогреватели, пусковые свечи либо хранение автотранспортной техники в гаражах. Устранить недостатки пускового режима в виде некоторого увеличения токсичности ОГ можно при помощи встроенных систем нагрева каталитических нейтрализаторов и лямбда-зондов, а также технических решений по сокращению времени работы ДВС без обратной связи.

Сегодня создано большое количество систем и элементов обратной связи, позволяющих через несколько секунд подключать ее алгоритмы и использовать нейросети адаптивности режимов прогрева и поддержания работы ДВС. Благодаря этим системам и элементам на режиме прогрева можно снизить расход топлива на 5–15 %, а токсичность ОГ — на 20–40 %. Для пускового режима, кроме высокого значения CO, характерна и низкая концентрация O<sub>2</sub>, по которой на режиме пуска можно проконтролировать правильность прогрева двигателя. Идеальная обратная связь заключается в дискретном контроле концентрации O<sub>2</sub> лямбда-зондом и в высокой скорости переключения лямбда-зонда.

Охарактеризуем режим холостого хода и низких частот вращения коленвала ДВС. После прогрева двигателя микропроцессорная система управления устанавливает стабильную частоту вращения холостого хода в пределах 800–880 мин<sup>-1</sup>. Этот режим позволяет удерживать значение коэффициента  $\alpha$ , близкое к единице, но, если возникают неисправности, электронный блок управления корректирует показатель  $\alpha$  в сторону богатой или бедной смеси. Последующее увеличение частоты вращения коленвала характеризуется значительным обеднением смеси.

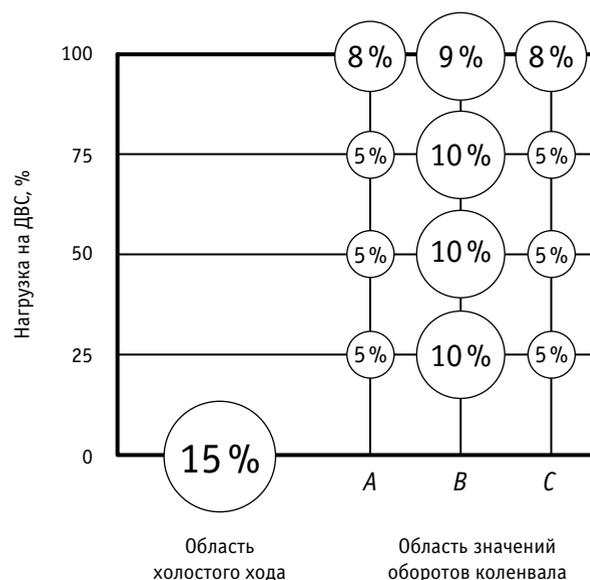
Известны конструкции впускной системы двигателей автомобилей Volkswagen, Audi, BMW с дополнительными воздушными заслонками для изменения типа смесеобразования, позволяющими обеспечить состав ТВС с коэффициентом  $\alpha = 1,5–3,0$ . В этом диапазоне коэффициента  $\alpha$  необходимо использовать сверхмощную систему зажигания, способную воспламенить сверхбедные смеси. Однако существуют ограничения для реализации данного диапазона. В режиме холостого хода происходит некоторое снижение концентрации CO и увеличение содержания O<sub>2</sub>, причем повышение уровня CO в этом режиме является признаком неисправного состояния топливной системы, системы зажигания, цилиндропоршневой группы, газораспределительного механизма и др. Рост частоты вращения коленвала и уровня нагружения приводит к тому, что ДВС не может работать на сверхбедных ТВС, так как не реализуется качественный процесс сгорания топлива и его высокий энергетический потенциал. Поэтому данный диапазон режимов ограничен по частоте вращения коленвала до 3200 мин<sup>-1</sup> при нагрузке на ДВС до 50 %. Существенное обеднение смеси в зоне этого диапазона показателя  $\alpha$  позволяет сэкономить топливо (до 30 %) и снизить токсичность (до 50 %).

Рассмотрим диапазон работы ДВС на средних нагрузках и средних частотах вращения коленвала. Диапазону средних нагрузок свойствен режим работы при  $\alpha = 1,1–1,6$ . Концентрация CO при  $\alpha = 1,6$  находится на предельно низком уровне, а уровень O<sub>2</sub> существенно повышается из-за особенностей ра-

боты на бедных смесях. Причем начальная зона характеризуется более бедными смесями, и по мере смещения в сторону максимальной частоты и нагрузки коэффициент  $\alpha$  снижается до 1,1. Такое значение является границей режима, при котором обеспечивается стехиометрический состав смеси, что предопределяет полное сгорание топлива, минимальный удельный расход топлива и наименьшую токсичность отработавших газов. Начало диапазона характеризуется более высокими концентрациями O<sub>2</sub> и существенным снижением содержания CO<sub>2</sub>, а конец диапазона — работой ДВС на грани стехиометрического состава смеси. Для этого режима характерны оптимум расхода топлива и минимальная токсичность ОГ, при эксплуатации автотранспортного средства необходимо стремиться к работе ДВС на грани баланса стехиометрического состава ТВС при режиме нагрузок более 60 % и оборотах коленвала свыше 4000 мин<sup>-1</sup>.

Рассмотрим режимы работы ДВС на максимальных уровнях нагружения и частоты вращения коленвала. Для эффективной эксплуатации автотранспортное средство большую часть времени должно работать именно в этом диапазоне нагрузок и частот. Номинальный режим работы двигателя и режим перегрузки как раз соответствуют данной области. При этом обеспечиваются наименьший удельный расход топлива и минимизация уровня показателей токсичности ОГ за счет лучших условий процесса сгорания ТВС. Кроме того, в данном диапазоне работы ДВС наблюдается максимальная эффективность каталитических нейтрализаторов, сажевых фильтров и систем Adblue.

Анализ статистики по контролю за режимами движения автомобилей позволил установить взаимосвязь между временем эксплуатации транспортного средства при различных нагрузках на ДВС и определенной частотой вращения коленвала (рис. 3).



**Рис. 3. График распределения времени эксплуатации автомобиля на различных режимах с разной нагрузкой на ДВС и определенной частотой вращения коленвала:**  
A, B, C — соответственно область средних, повышенных и максимальных значений оборотов вращения коленвала

Из рис. 3 видно, что 15 % времени приходится на область холостого хода. Однако в зависимости от режима движения значение этого времени может существенно повышаться (например, при автомобильных заторах). Кстати, на современных автотранспортных средствах режим холостого хода может быть полностью исключен за счет использования системы старт-стоп. В совокупности 23 % времени эксплуатации автомобиля приходится на область средних значений оборотов вращения коленвала, 39 % — на область повышенных и 23 % — на область максимальных значений.

Также можно определить общее время эксплуатации автомобиля по следующим секторам диапазонов нагрузок при работе ДВС: 0–25 %, 25–50 %, 50–75 %, 75–100 %. Например, на диапазон холостого хода и нагрузки до 25 % приходится около 35 % времени эксплуатации автомобиля, а на диапазон 75–100 % — всего 25 %, причем последний диапазон наиболее важен с точки зрения реализации максимальной эффективности используемой мощности ДВС и максимальных нагрузок на автомобиль.

Не менее важно при эксплуатации автомобиля создавать такие режимы работы двигателя, которые бы совпадали с характеристикой реализуемой мощности (рис. 4). При проведении испытаний двигателя также необходимо воспроизводить все точки графика зависимости реализуемой мощности и укладываться в пределы варьирования.

Теоретический анализ возможных режимов работы ДВС, определение границ диапазонов мощности, а также сочета-

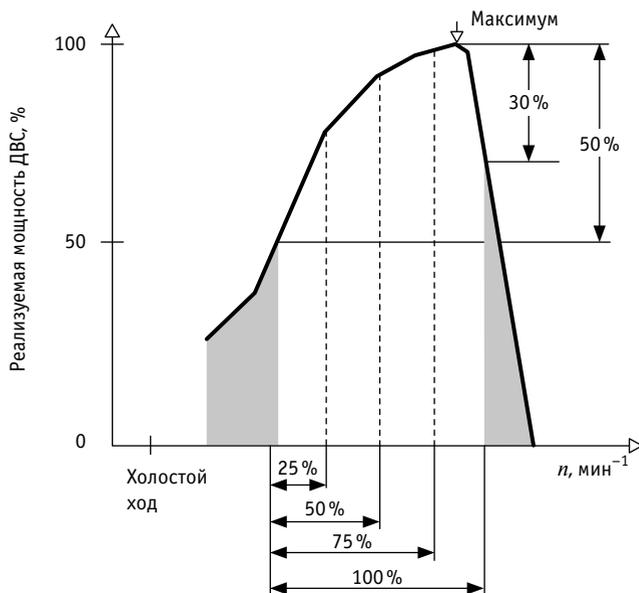


Рис. 4. Характеристика реализуемой мощности ДВС при изменении частоты вращения коленвала

ний коэффициента избытка воздуха позволили относительно визуально представить зависимости изменения показателей токсичности бензинового ДВС при разных значениях коэффициентов  $\alpha$  и  $r$  (рис. 5).

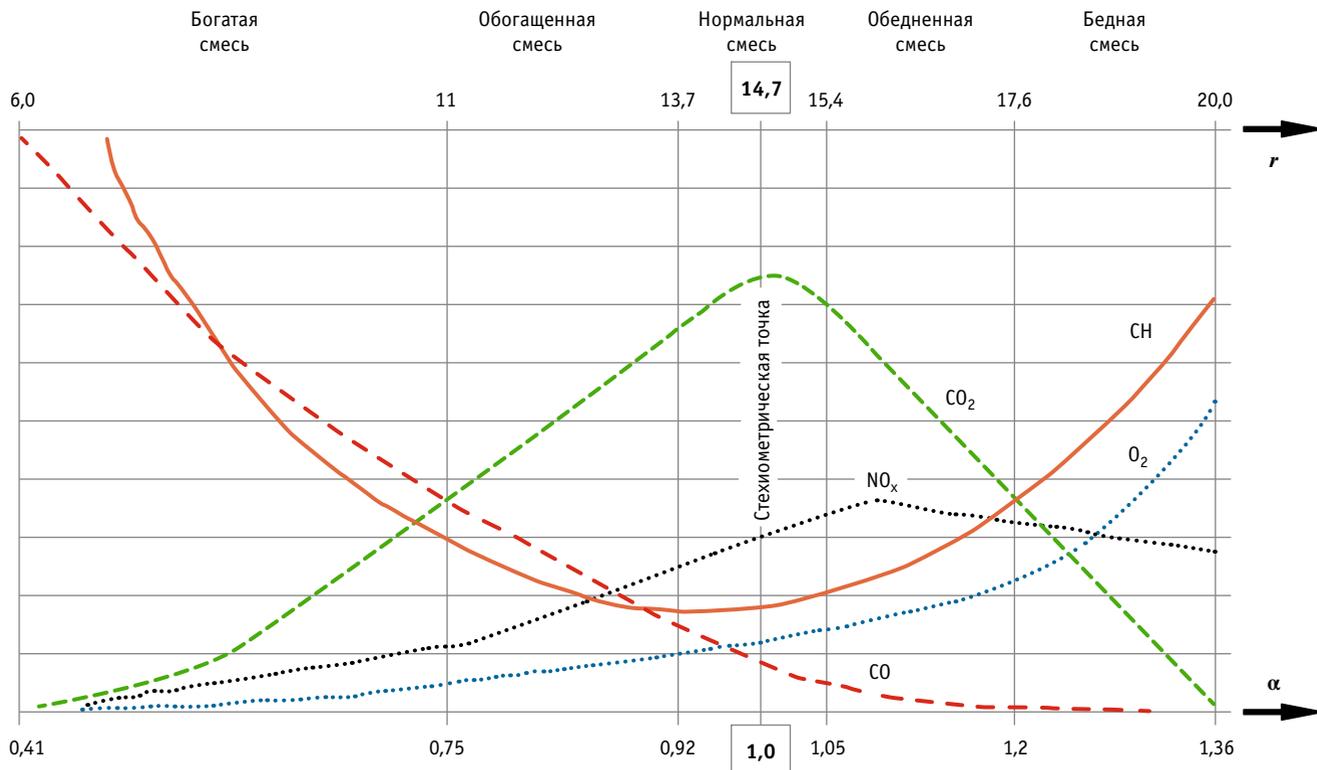


Рис. 5. График относительно-визуального представления зависимостей изменения показателей токсичности бензинового ДВС при различных значениях коэффициентов  $\alpha$  и  $r$

Из рис. 5 видно, что работа двигателя невозможна за пределами  $\alpha \approx 0,41$  (или  $r \approx 6$ ), так как избыточное переобогащение приводит к полному останову ДВС. Поэтому на графике показана граница, за которой состав смеси имеет предельное соотношение для возможного ее воспламенения. В области богатой и обогащенной смеси (см. рис. 5) концентрации CO и CH очень высоки. Как правило, возле левой границы области богатой смеси находится режим предельной возможности ее воспламенения, однако пусковые свойства ДВС всегда сопровождаются пределом допустимой возможности переобогащения, и чаще всего начальная часть пускового режима происходит без обратной связи. Поэтому в ДВС важно устанавливать коэффициент топливной корректировки в правильном диапазоне и задавать правильный тренд его корректировки в процессе прогрева.

Отметим, что на новых моделях автотранспортных средств изначально обеспечивается работа ДВС по обратной связи, включая активную корректировку и управление рабочим процессом с учетом реальных условий запуска, прогрева и динамики работы ДВС. Это сделано для того, чтобы минимизировать выбросы ОГ. Вместе с тем реализация данного принципа обратной связи невозможна без быстрого прогрева активных элементов каталитического нейтрализатора и лямбда-зонда, что достигается встроенными нагревательными элементами. Например, при наличии EGR (клапана рециркуляции ОГ) на стадии запуска ДВС часть ОГ перепускается во впускной тракт, чтобы быстро прогреть некоторые узлы ДВС и оперативно подготовить его к штатному режиму работы.

В конце области богатой смеси (см. рис. 5), соответствующей значению  $\alpha = 0,75$ , уровень параметров CO и CH падает более чем в 2 раза. Это свидетельствует о том, что условия процесса сгорания улучшаются. Но вместе с тем очевиден тренд повышения выбросов CO<sub>2</sub>, приобретающий ускоренный рост к концу области богатой смеси, и равномерный рост концентрации O<sub>2</sub>. На всем протяжении области богатой смеси показатель NO<sub>x</sub> растет и изменяется по линейному закону с постоянным углом наклона. В конце диапазона богатой смеси при переходе в область обогащенной смеси наблюдается режим прогрева ДВС, а также возможны режимы ускорения и разгона. Поэтому данная область характеризуется неустановившимся режимом работы двигателя. В свою очередь, это влияет на безопасность движения автомобиля, так как достижение необходимой частоты вращения коленвала и нарастание максимального крутящего момента связаны с соответствием состава ТВС заданному режиму.

Как видно из рис. 5, в области обогащенной смеси значения показателей CO и CH продолжают снижаться, причем концентрации выбросов CH снижаются плавно, достигая минимума к концу рассматриваемой области. Что касается выбросов CO<sub>2</sub>, они растут, линейно и динамично повышаясь к правой границе области. Значения NO<sub>x</sub> и O<sub>2</sub> также непрерывно растут, причем у значений NO<sub>x</sub> происходит излом в начале области обогащенной смеси и затем резкий динамичный рост до конца диапазона с увеличенным углом наклона линии тренда.

Следует отметить, что эффективная работа каталитического нейтрализатора и датчиков кислорода адаптирована

под нормальную ТВС, которая чаще всего рекомендуется в качестве основной и доминирующей (см. рис. 5). В этом диапазоне находится так называемая точка стехиометрического состава смеси, которой придерживается лямбда-зонд при управлении составом ТВС с различными значениями коэффициента  $\alpha$ . Здесь степень преобразования каталитическим нейтрализатором опасных компонентов ОГ достигает максимума, именно поэтому данный диапазон рекомендован заводом-изготовителем в качестве основного (для реализации максимальной мощности при минимальном удельном расходе топлива). В зоне нормальной смеси наблюдается максимум, который приходится на концентрацию выбросов CO<sub>2</sub> и обусловлен активным ростом свободного кислорода и благоприятными условиями окисления ТВС в цилиндре. Значения NO<sub>x</sub> и O<sub>2</sub> показывают возрастающий тренд на всем протяжении участка, однако максимум у NO<sub>x</sub> смещается в сторону зоны обедненной смеси. Что касается CO, снижение этого показателя продолжается на всем протяжении участка нормальной смеси и связано с лучшими условиями полноты сгорания и качественными характеристиками процесса сгорания. Показатель CO<sub>2</sub> в нормальной смеси достигает максимума, а далее происходит резкий перегиб в сторону снижения. Неоднозначны изменения показателя CH: минимум в начале и небольшой рост в конце подачи нормальной смеси, что объясняется некоторым ухудшением качества сгорания ТВС на границах камеры сгорания.

Современные тенденции двигателестроения направлены на смещение процесса сгорания в зону обедненной смеси (см. рис. 5). Этот диапазон характеризуется неоднозначностью подходов к обеспечению наилучшей эффективности эксплуатации ДВС, так как в нем и тем более в последующем диапазоне работы на бедных смесях некоторые показатели токсичности устремляются вверх. Например, максимум значения NO<sub>x</sub> приходится на диапазон обедненной смеси, что обусловлено большим количеством свободного кислорода и более высокой температурой процесса сгорания. Вместе с тем, достигая максимума, показатель NO<sub>x</sub> закрепляет тренд незначительного снижения к концу диапазона, так как из-за уменьшения количества топлива температура процесса сгорания понижается. Из рис. 5 видно, что тренд изменения параметров O<sub>2</sub> и CH показывает непрерывный рост на всем протяжении диапазона с небольшим восходящим уклоном к концу участка, что объясняется ухудшением процесса сгорания к периферии области бедной смеси. В то же время показатели CO<sub>2</sub> и CO снижаются на всем протяжении диапазона, причем значения CO совсем минимизируются к границе диапазона обедненной смеси.

Следующим и наиболее значимым с точки зрения экологии топлива является диапазон работы на бедной смеси (см. рис. 5), который ограничен составом ТВС с коэффициентом  $\alpha \approx 1,36$  (или  $r \approx 20$ ). Переход за данную границу сопровождается резким ухудшением условий воспламеняемости смеси и невозможностью нормального процесса сгорания. Однако использование таких технических решений, как непосредственный впрыск, высокомоментные системы зажигания с многоискровыми свечами зажигания, легкие виды

топлив, турбонаддув, разные типы смесеобразования, автоматическая регулировка фаз газораспределительного механизма и др., позволяет создать в данном диапазоне приемлемые условия сгорания смеси. При анализе границы зоны бедных смесей четко прослеживается тренд значительного динамического роста свободного кислорода, что объясняется постоянным повышением степени обеднения смеси. Одновременно, после минимума в зоне нормальных смесей, происходит рост концентрации выбросов СН. Для показателя СО в зоне бедных смесей характерно незначительное снижение до границ диапазона точности измерения газоанализатора. Здесь же наблюдается динамичное снижение содержания  $\text{CO}_2$ , достигающего минимума на границе диапазона. Что касается показателя  $\text{NO}_x$ , то на протяжении всего диапазона зоны бедной смеси его значения показывают совсем небольшое снижение.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Многие ученые придерживаются мнения, что системы антикотоксичности независимо от режима работы ДВС всегда справляются со своими функциями. То есть применение каталитических нейтрализаторов, Adblue, сажевых фильтров позволяет обеспечить некоторый минимум суммарного воздействия компонентов ОГ на окружающую среду. Однако результаты теоретических исследований, выполненных авторами статьи, показывают, что это утверждение не совсем корректно. Установлено, что концентрация токсичных компонентов ОГ, прежде чем они попадают в конвертор, может в несколько раз отличаться от режима к режиму. Поэтому эксплуатация каталитического нейтрализатора на пределе возможности (в режиме максимальной степени преобразования) приводит к его ускоренному старению, потере эксплуатационных свойств и, как следствие, к ухудшению показателей экологической безопасности автомобиля.

## Литература

1. Assessment of the City Air Basin Pollution Using a Calculation and Instrumental Technique / I. F. Suleimanov, G. V. Mavrin, D. A. Kharlyamov [et al.] // Journal of Fundamental and Applied Sciences. 2017. Vol. 9. No. 1S. Pp. 1360–1372.
2. Давлетова Н. Х. Автотранспорт как глобальный источник загрязнения атмосферного воздуха // Современные наукоемкие технологии. 2005. № 4. С. 90. ISSN 1812-7320.
3. Бондаренко Е. В., Гончаров А. А., Федотов А. М. Научные аспекты транспортной ноосферы // Интеллект. Инновации. Инвестиции. 2017. № 11. С. 4–7. ISSN 2077-7175.
4. Euro-7/VII-Konzepte in der Interaktion mit OBD und OBM / R. Gunja, H. Wancura, B. Raser, M. Weißbäck // MTZ. Motortechnische Zeitschrift. 2022. Vol. 83. No. 11. Pp. 44–51.
5. Козлов А. В., Теренченко А. С., Васильев А. В. Анализ экологических требований «Евро-6» к автомобильным двигателям // Журнал автомобильных инженеров. 2017. № 3 (104). С. 40–46. ISSN 2073-9133.
6. Gritsenko A. V., Shepelev V. D., Shepeleva E. V. Optimizing Consumption of Gas Fuel Using Static Method of Tuning Automobile Gas-Cylinder Equipment // Proceedings of the 4th International conference on industrial engineering ICIE 2018 : Lecture notes in mechanical engineering. Springer International Publishing, 2019. Pp. 2163–2173.
7. Экономическая непривлекательность принятия стандарта Евро-6 для Российской Федерации / О. Г. Феоктистов, Е. С. Короткова, Е. П. Усольцева, А. А. Касумова // Экономика и предпринимательство. 2017. № 11 (88). С. 121–127. ISSN 1999-2300.
8. Шакун А. Н., Демидова Е. В. Российская технология изомеризации «Изомалк-2» — лучшее технологическое решение для производства автобензинов Евро-4 и Евро-5 // Нефть. Газ. Новации. 2010. № 9 (140). С. 44–46. ISSN 2077-5423.
9. Коротких Ю. С. Экологический стандарт Евро-6 в Европе и России // Управление рисками в АПК. 2016. № 1 (5). С. 34–40. ISSN 2413-6573.
10. Балабаева И. Предложения по Евро-6 // Автомобильный транспорт. 2006. № 10. С. 57–58. ISSN 0005-2345.

## References

1. Suleimanov I. F., Mavrin G. V., Kharlyamov D. A. [et al.]. Assessment of the City Air Basin Pollution Using a Calculation and Instrumental Technique. Journal of Fundamental and Applied Sciences. 2017. Vol. 9. No. 1S. Pp. 1360–1372.
2. Davletova N. Kh. Motor transport as a global source of atmospheric air pollution [Avtotransport kak global'nyy istochnik zagryazneniya atmosfernogo vozdukh]. Modern high technologies. 2005. No. 4. P. 90. ISSN 1812-7320.
3. Bondarenko E. V., Goncharov A. A., Fedotov A. M. Scientific aspects of the transport noosphere [Nauchnye aspekty transportnoy noosfery]. Intellect. Innovations. Investments. 2017. No. 11. Pp. 4–7. ISSN 2077-7175.
4. Gunja R., Wancura H., Raser B., Weißbäck M. Euro-7/VII-Konzepte in der Interaktion mit OBD und OBM. MTZ. Motortechnische Zeitschrift. 2022. Vol. 83. No. 11. Pp. 44–51.
5. Kozlov A. V., Terenchenko A. S., Vasilyev A. V. Analysis of the Euro-6 environmental requirements to vehicle engines [Analiz ekologicheskikh trebovaniy «Evro-6» k avtomobil'nyim dvigatelyam]. Journal of Automotive Engineers. 2017. No. 3 (104). Pp. 40–46. ISSN 2073-9133.
6. Gritsenko A. V., Shepelev V. D., Shepeleva E. V. Optimizing Consumption of Gas Fuel Using Static Method of Tuning Automobile Gas-Cylinder Equipment. Proceedings of the 4th International conference on industrial engineering ICIE 2018 : Lecture notes in mechanical engineering. Springer International Publishing, 2019. Pp. 2163–2173.
7. Feoktistov O. G., Korotkova E. S., Usol'tseva E. P., Kasumova A. A. Economic unattractiveness of the adoption of the Euro-6 standard for the Russian Federation [Ekonomicheskaya neprivlekatel'nost' prinyatiya standart Evro-6 dlya Rossiyskoy Federatsii]. Journal of Economy and entrepreneurship. 2017. No. 11 (88). Pp. 121–127. ISSN 1999-2300
8. Shakun A. N., Demidova E. V. Russian isomerization technology «Izomalk-2» is the best technological solution for production of EURO-4 and EURO-5 gasoline [Rossiyskaya tekhnologiya izomerizatsii «Izomalk-2» — luchshee tekhnologicheskoe reshenie dlya proizvodstva avtobenzinov EVRO-4 i EVRO-5]. Oil. Gas. Innovations. 2010. No. 9 (140). Pp. 44–46. ISSN 2077-5423.
9. Korotkikh Yu. S. Environmental standard of Euro-6 in Europe and Russia [Ekologicheskii standart Evro-6 v Evrope i Rossii]. Agricultural Risk Management. 2016. No. 1 (5). Pp. 34–40. ISSN 2413-6573. t
10. Balabaeva I. Euro-6 offers [Predlozheniya po Evro-6]. AT. 2006. No. 10. Pp. 57–58. ISSN 0005-2345.
11. Lozhkin V., Lozhkina O. Catalytic Converter with Storage Device of Exhaust Gas Heat for City Bus. Transportation Research Procedia. 2017. Vol. 20. Pp. 412–417.

11. Lozhkin V., Lozhkina O. Catalytic Converter with Storage Device of Exhaust Gas Heat for City Bus // *Transportation Research Procedia*. 2017. Vol. 20. Pp. 412–417.
12. Исаенко П. В., Исаенко В. Д. К расчету гидравлического сопротивления очистителя-нейтрализатора для систем выпуска отработавших газов машин автотранспортного комплекса // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2006. № 1 (12). С. 95–106. ISSN 1607-1859.
13. Лешаков И. А., Кравченко И. Н., Ерофеев М. Н. Математическая модель расчета основных параметров каталитических нейтрализаторов // *Современные наукоемкие технологии*. 2013. № 5. С. 76–80. ISSN 1812-7320.
14. Третьяк Л. Н., Бондаренко Е. В., Вольнов А. С. Совершенствование конструкции нейтрализаторов отработавших газов двигателей внутреннего сгорания // *Автомобильная промышленность*. 2018. № 2. С. 11–15. ISSN 0005-2345.
15. Comparing Fuel Consumption and Emission Levels of Hybrid Powertrain Configurations and a Conventional Powertrain in Varied Drive Cycles and Degree of Hybridization / W. U. Maddumage, K. Y. Abeyasighe, M. Perera [et al.] // *Science and Technique*. 2020. Vol. 19. No. 1. Pp. 20–33.
16. Гайдук С. В., Мирошниченко Е. В., Петула А. С. Мировые тенденции развития электротранспорта // *Энергетические установки и технологии*. 2023. Т. 9. № 1. С. 108–114. ISSN 2413-5526.
17. Фасхиев Х. А. Экономическая эффективность легкого коммерческого электромобиля // *Автомобильная промышленность*. 2023. № 3. С. 1–6. ISSN 0005-2337.
18. Фасхиев Х. А. Рынок электромобилей — рост стабилен // *Маркетинг в России и за рубежом*. 2023. № 2. С. 92–102. ISSN 1028-5849.
19. Экспертная система контроля технического состояния автомобилей / А. Д. Шумилин, В. В. Лянденбургский, М. К. Капунова [и др.] // *Научное обозрение*. 2016. № 4. С. 85–89. ISSN 1815-4972.
20. Методология безостормозного диагностирования кривошипно-шатунного механизма ДВС / С. А. Гребенников, А. С. Гребенников, Г. О. Киселев [и др.] // *Техническое регулирование в транспортном строительстве*. 2020. № 3 (42). С. 147–155.
21. Гребенников С. А., Гребенников А. С. Повышение точности диагностирования цилиндропоршневой группы ДВС динамическим методом // *Грузовик*. 2018. № 5. С. 2–9. ISSN 1684-1298.
22. Концепция индивидуального управления техническим состоянием автомобилей в процессе эксплуатации / С. А. Гребенников, А. С. Гребенников, Ш. К. Гусенов [и др.] // *Техническое регулирование в транспортном строительстве*. 2018. № 1 (27). С. 103–108.
23. Лившиц В. М., Косенко Д. Ю., Пятин С. П. Интеллектуализация средств диагностики как основа их совершенствования // *Труды ГОСНИТИ*. 2016. Т. 123. С. 85–88. ISSN 2587-6864.
24. Вертей М. Л. Обоснование способа разгона двигателя с принудительным впрыском топлива и электрическим управлением топливopодачей при проведении тестового диагностирования // *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*. 2015. № 2 (124). С. 112–116. ISSN 1996-4277.
25. Дмитриевский Е. В., Новиков Р. А., Обозов А. А. Оптимизация показателей двигателей внутреннего сгорания при электронном управлении // *Вестник Брянского государственного технического университета*. 2019. № 2 (75). С. 70–80. ISSN 1999-8775.
12. Isaenko P. V., Isaenko V. D. Calculation of the hydraulic resistance of the cleaner-neutralizer for exhaust systems of vehicles of the motor transport complex [K raschetu gidravlicheskogo soprotivleniya ochistitelya-neytralizatora dlya sistem vypuska otrabotavshikh gazov mashin avtotransportnogo kompleksa]. *Journal of Construction and Architecture*. 2006. No. 1 (12). Pp. 95–106. ISSN 1607-1859.
13. Leshakov I. A., Kravchenko I. N., Erofeev M. N. A mathematical model to calculate the main parameters of catalytic converters [Matematicheskaya model' rascheta osnovnykh parametrov kataliticheskikh neytralizatorov]. *Modern high technologies*. 2013. No. 5. Pp. 76–80. ISSN 1812-7320.
14. Tretyak L. N., Bondarenko E. V., Vol'nov A. S. Improvement of the design of exhaust gas neutralizers of internal combustion engines [Sovershenstvovanie konstruksii neytralizatorov otrabotavshikh gazov dvigateley vnutrennego sgoraniya]. *AT*. 2018. No. 2. Pp. 11–15. ISSN 0005-2345.
15. Maddumage W. U., Abeyasighe K. Y., Perera M. [et al.]. Comparing Fuel Consumption and Emission Levels of Hybrid Powertrain Configurations and a Conventional Powertrain in Varied Drive Cycles and Degree of Hybridization. *Science and Technique*. 2020. Vol. 19. No. 1. Pp. 20–33.
16. Gayduk S. V., Miroshnichenko E. V., Petula A. S. Global trends in the development of electric transport [Mirovye tendentsii razvitiya elektrottransporta]. *Power plants and Technologies*. 2023. Vol. 9. No. 1. Pp. 108–114. ISSN 2413-5526.
17. Fashiev Kh. A. Economic efficiency of the lung commercial electric vehicle [Ekonomicheskaya effektivnost' legkogo kommercheskogo elektromobilya]. *AT*. 2023. No. 3. Pp. 1–6. ISSN 0005-2337.
18. Fashiev Kh. A. Market of electric vehicles — stable growth [Rynok elektromobilye — rost stabilen]. *Journal of Marketing in Russia and Abroad*. 2023. No. 2. Pp. 92–102. ISSN 1028-5849.
19. Shumilin A. D., Lyandenburskiy V. V., Kapunova M. K. [et al.]. Expert System for Monitoring the Technical Condition of Automobiles [Ekspertnaya sistema kontrolya tekhnicheskogo sostoyaniya avtomobilye]. *Science Review*. 2016. No. 4. Pp. 85–89. ISSN 1815-4972.
20. Grebennikov S. A., Grebennikov A. S., Kiselev G. O. [et al.]. Methodology of formless diagnosis of crank mechanism of internal combustion engine [Metodologiya bestormoznogo diagnostirovaniya krivoshipno-shatunnogo mekhanizma DVS]. *Technical Regulation in Transport Construction*. 2020. No. 3 (42). Pp. 147–155.
21. Grebennikov S. A., Grebennikov A. S. Increasing the accuracy of the cylinder group's diagnosis LCUs a dynamic method [Povyshenie tochnosti diagnostirovaniya tsilindroporshnevoy gruppy DVS dinamicheskim metodom]. *Truck*. 2018. No. 5. Pp. 2–9. ISSN 1684-1298.
22. Grebennikov S. A., Grebennikov A. S., Gusenov Sh. K. [et al.]. Concept of individual technical condition management of heavy vehicles in operation process [Kontsepsiya individual'nogo upravleniya tekhnicheskim sostoyaniem avtomobilye v protsesse ekspluatatsii]. *Technical Regulation in Transport Construction*. 2018. No. 1 (27). Pp. 103–108.
23. Livshits V. M., Kosenko D. Yu., Pyatin S. P. Intellectualization of diagnostic tools as a basis for their improvement [Intellektualizatsiya sredstv diagnostiki kak osnova ikh sovershenstvovaniya]. *Works of GOSNITI*. 2016. Vol. 123. Pp. 85–88. ISSN 2587-6864.
24. Verтей M. L. Substantiation of free acceleration method for electronically controlled forced fuel injection engine in the process of testing diagnostics [Obosnovanie sposoba razgona dvigatelya s prinuditel'nym vpryskom topliva i elektricheskim upravleniem toplivopodachey pri provedenii testovogo diagnostirovaniya]. *Vestnik of Altai State Agricultural University*. 2015. No. 2 (124). Pp. 112–116. ISSN 1996-4277.
25. Dmitrievskiy E. V., Novikov R. A., Obozov A. A. Optimization of internal combustion engines indices at electronic control [Optimizatsiya pokazateley dvigateley vnutrennego sgoraniya pri elektronnom upravlenii]. *Bulletin of Bryansk State Technical University*. 2019. No. 2 (75). Pp. 70–80. ISSN 1999-8775.

Объем статьи 1,1 авторских листа

УДК 656.078

**Иван Сергеевич Выскребенцев**, аспирант Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,

**Михаил Борисович Петров**, доктор технических наук, профессор кафедры «Экономика транспорта» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), руководитель Центра развития и размещения производительных сил Института экономики Уральского отделения Российской академии наук (ИЭ УрО РАН), Екатеринбург, Россия

## МЕТОДИКА ОЦЕНКИ УРОВНЯ РАЗВИТИЯ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ РЕГИОНА

**Ivan Sergeevich Vyskrebentsev**, postgraduate student, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,

**Mikhail Borisovich Petrov**, DSc in Engineering, Professor, Transport Economics Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Head of Productive Forces Development and Placement Centre, Institute of Economics, the Ural branch of Russian Academy of Sciences (IE UB RAS), Ekaterinburg, Russia

## Methodology for assessing the level of transport infrastructure development of region

### Аннотация

Разработана методика, позволяющая оценивать уровень транспортной инфраструктуры региона и прогнозировать потребности территории в развитии транспорта. На основе метода линейной свертки разработан комплексный оценочный показатель, который включает характеристики объема и качества путевой инфраструктуры наземных видов транспорта, а также терминальной системы.

Предложен подход к определению весовых коэффициентов параметров комплексной системы оценки, позволяющий установить наиболее тесную корреляционную связь между показателем оценки транспортной инфраструктуры и объемом перевозок региона. Выполнен сравнительный анализ разработанного показателя с коэффициентами Энгеля и Гольца по критерию тесноты связи между оценкой транспортной инфраструктуры и объемом перевозок региона.

Сформирована регрессионная модель, которая позволяет прогнозировать влияние транспортной инфраструктуры на удовлетворение текущих потребностей региона в перевозках.

На основе сопоставления полученных оценок проведено исследование по определению недостаточности или избыточности развития транспортной инфраструктуры в отдельных регионах.

**Ключевые слова:** транспортная инфраструктура, развитие региона, прогнозирование, регрессионная модель

### Abstract

The methodology has been developed that allows assessing the level of the transport infrastructure of the region and predicting the needs of the territory in the development of transport. Based on the linear convolution method, the comprehensive evaluation indicator has been developed, which includes characteristics of the volume and quality of the track infrastructure of land transport modes, as well as the terminal system.

The approach to determining the weighting coefficients of the integrated assessment system parameters is proposed, which makes it possible to establish the closest correlation between the transport infrastructure assessment indicator and the volume of traffic in the region. A comparative analysis of the developed indicator with the Engel and Goltz coefficients is performed according to the criterion of the closeness of relationship between the assessment of transport infrastructure and volume of traffic in the region.

The regression model has been formed that makes it possible to predict the impact of transport infrastructure on meeting the current transportation needs of the region.

Based on the comparison of the estimates obtained, the study was conducted to determine insufficiency or redundancy of the development of transport infrastructure in certain regions.

**Keywords:** transport infrastructure, regional development, forecasting, regression model

DOI: 10.20291/1815-9400-2023-3-99-104

Согласно Транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 г. [1], одна из приоритетных задач государства — опережающее развитие транспортной инфраструктуры, что создает условия для повышения конкурентоспособности национальной экономики, реализации ее транзитного потенциала, а также способствует росту качества жизни населения. Недостаточность развития транспортной инфраструктуры в регионах ограничивает удовлетворение спроса на перевозки, а ее избыточность снижает эффективность транспортной системы по причине необоснованно высоких затрат на содержание.

В связи с этим большую практическую значимость приобретают исследования, направленные на оценку потребного уровня развития транспортной инфраструктуры.

Для определения степени развития транспортной инфраструктуры региона используют различные показатели, например: эксплуатационную длину и плотность дорог [2–4], стоимость основных фондов транспорта и уровень их износа [5–6], инвестиции в транспортную инфраструктуру [7–8] и др.

При сравнительном анализе инфраструктурной обеспеченности территорий также применяют различные оценочные

коэффициенты. Наибольшую популярность у исследователей получили коэффициент Энгеля [3, 9–11], а также коэффициенты Успенского [11, 12], Василевского [10], Гольца [13], Краснопольского [14].

Общие недостатки обозначенных подходов заключаются в следующем:

представленные показатели и коэффициенты свидетельствуют лишь о наличии транспортной инфраструктуры в регионе, но не несут информации о ее качестве, технической оснащенности и пропускной способности;

показатели характеризуют обеспеченность региона путевой инфраструктурой, однако часто решающее значение в транспортно-логистическом процессе имеют объекты доступа к транспортным коммуникациям: железнодорожные станции, грузовые терминалы, логистические центры;

не существует эталонных значений коэффициентов инфраструктурной обеспеченности, их расчет полезен лишь для сравнительного анализа территорий и не позволяет судить о дефиците или избыточности инфраструктуры;

расчет коэффициентов инфраструктурной обеспеченности ведется для каждого вида транспорта отдельно, что не дает возможности учитывать взаимосвязанность и взаимозаменяемость транспортных систем;

в расчете коэффициентов инфраструктурной обеспеченности используется вся площадь исследуемой территории, а не освоенная площадь, что в условиях неравномерной освоенности территории Российской Федерации может привести к существенным искажениям. Например, сравнение северных регионов, большая часть территории которых не заселена, с густонаселенными регионами Центральной России не обосновано.

Таким образом, для устранения перечисленных недостатков целесообразно продолжить исследования по разработке комплексного показателя развития транспортной инфраструктуры.

Формировать комплексный показатель оценки транспортной инфраструктуры региона  $K$  предлагаем на основе метода линейной свертки:

$$K = \sum_{i=1}^N w_i a_i,$$

где  $a_i$  — индивидуальный показатель, характеризующий развитие транспортной инфраструктуры;

$w_i$  — вес показателя в общей системе оценки;

$N$  — число учитываемых показателей.

При выборе индивидуальных показателей  $a_i$ , включаемых в модель, будем руководствоваться следующими требованиями:

- 1) показатели отражают тот или иной аспект развития транспортной инфраструктуры региона;
- 2) показатели измеримы, имеют количественную оценку;
- 3) показатели объективны, определены на основе фактических данных;
- 4) данные доступны в открытых источниках;
- 5) автокорреляция между выбранными показателями отсутствует.

В разрабатываемую модель будем включать только наземные виды транспорта: автомобильный и железнодорожный, так как они присутствуют во всех регионах России и обеспечивают наибольшие объемы перевозок. Помимо оценки развитости путевой инфраструктуры названных видов транспорта в модель включаем и оценку развитости терминальной инфраструктуры.

Итак, на основе сформулированных требований предлагаем следующую систему показателей оценки транспортной инфраструктуры (табл. 1).

Отметим, что перечень показателей, приведенных в табл. 1, не является исчерпывающим. В модель могут быть включены и другие измерители в зависимости от задач исследования и наличия данных.

Таблица 1

Система показателей оценки транспортной инфраструктуры региона

Показатель	Единица измерения	Обозначение	Источник информации
Железнодорожная составляющая инфраструктуры			
Эксплуатационная длина железных дорог	км	$a_1$	Федеральная служба государственной статистики [15]
Удельная доля электрифицированных железных дорог	%	$a_2$	Картографические данные [16]
Удельная доля двухпутных и многопутных железных дорог	%	$a_3$	Картографические данные [16]
Автомобильная составляющая инфраструктуры			
Протяженность автомобильных дорог общего пользования	км	$a_4$	Федеральная служба государственной статистики [15]
Доля автомобильных дорог регионального и межмуниципального значения, отвечающих нормативным требованиям	%	$a_5$	Федеральная служба государственной статистики [15]
Доля автомобильных дорог местного значения, отвечающих нормативным требованиям	%	$a_6$	Федеральная служба государственной статистики [15]
Терминальная составляющая инфраструктуры			
Суммарная перерабатывающая способность грузовых дворов, расположенных на территории региона	т/сут	$a_7$	Центральная дирекция по управлению терминально-складским комплексом ОАО «РЖД» [17]
Суммарная перерабатывающая способность контейнерных терминалов, расположенных на территории региона	т/сут	$a_8$	ПАО «ТрансКонтейнер» [18]

Таблица 2

Результаты расчета весовых коэффициентов комплексной оценки транспортной инфраструктуры региона

Факторная переменная	Результирующая переменная	Коэффициент корреляции	Весовые коэффициенты комплексной оценки $w_i$							
			Железнодорожная составляющая			Автомобильная составляющая			Терминальная составляющая	
			$w_1$	$w_2$	$w_3$	$w_4$	$w_5$	$w_6$	$w_7$	$w_8$
$K(ж)$	$Q(ж)$	0,617	0,517	0,236	0,129	–	–	–	0,098	0,020
$K(а)$	$Q(а)$	0,676	–	–	–	0,408	0,389	0,130	0,062	0,011
$K$	$Q$	0,760	0,303	0,085	0,062	0,026	0,072	0,304	0,058	0,090
$K_Э(ж)$	$Q(ж)$	0,071	–	–	–	–	–	–	–	–
$K_Э(а)$	$Q(а)$	0,067	–	–	–	–	–	–	–	–
$K_Г(ж)$	$Q(ж)$	0,151	–	–	–	–	–	–	–	–
$K_Г(а)$	$Q(а)$	0,231	–	–	–	–	–	–	–	–

При использовании метода линейной свертки требуется, чтобы все показатели были безразмерны и сопоставимы, поэтому воспользуемся формулой

$$\bar{a}_i = \frac{a_{ik}}{a_i},$$

где  $a_{ik}$  — величина  $i$ -го показателя  $k$ -го региона в измеримых единицах;

$\bar{a}_i$  — среднее значение  $i$ -го показателя в выборке.

Тогда формула расчета комплексного показателя оценки транспортной инфраструктуры  $k$ -го региона  $K_k$  примет вид

$$K_k = \sum_{i=1}^N w_i \frac{a_{ik}}{\bar{a}_i}.$$

При определении весовых коэффициентов  $w_i$  будем исходить из следующей задачи: возможность на основе модели прогнозировать влияние транспортной инфраструктуры на удовлетворение текущих потребностей региона в перевозках. Поэтому чем выше корреляционная связь между показателем оценки транспортной инфраструктуры региона  $K_k$  и объемом перевозок региона  $Q_k$ , тем надежнее будет прогноз, основанный на моделировании.

На основе этого утверждения сформируем следующую модель определения весовых коэффициентов  $w_i$ : найти такие  $w_i$ , при которых коэффициент корреляции Пирсона  $R_{KQ}$  принимает наибольшее значение, т.е. в нашем случае

$$R_{KQ} = \frac{\sum_{k=1}^M (K_k - \bar{K}_k)(Q_k - \bar{Q}_k)}{\sqrt{\sum_{k=1}^M (K_k - \bar{K}_k)^2 (Q_k - \bar{Q}_k)^2}} \rightarrow \max$$

при ограничениях  $\sum_{i=1}^N w_i = 1$  и  $w_i \geq 0$ .

Указанные весовые коэффициенты рассчитаны методом обобщенного приведенного градиента (ОПГ) с использованием инструмента «Поиск решения» в MS Excel.

Расчет выполнен для трех вариантов модели:

1) влияние железнодорожной составляющей транспортной инфраструктуры  $K(ж)$  (параметры  $a_1, a_2, a_3, a_7, a_8$ ) на объем железнодорожных перевозок региона  $Q(ж)_k$ ;

2) влияние автомобильной составляющей транспортной инфраструктуры  $K(а)$  (параметры  $a_4, a_5, a_6, a_7, a_8$ ) на объем автомобильных перевозок региона  $Q(а)_k$ ;

3) влияние комплексной оценки транспортной инфраструктуры  $K_k$  на общий объем перевозок региона наземными видами транспорта  $Q_k$ .

Параметры терминальной подсистемы ( $a_7, a_8$ ) включены в расчет как железнодорожной, так и автомобильной составляющих инфраструктуры, поскольку терминалы обеспечивают стыковку названных видов транспорта и напрямую влияют на эффективность функционирования каждой составляющей.

Также с целью определения эффективности разработанной модели по сравнению с ранее используемыми подходами проведена оценка корреляционной связи между объемом перевозок и популярными в литературе коэффициентами Энгеля и Гольца (обозначим их как  $K_Э$  и  $K_Г$  соответственно). Результаты расчета приведены в табл. 2.

Наиболее тесная корреляционная связь ( $R_{KQ} = 0,76$ ) установлена для пары показателей «комплексная оценка транспортной инфраструктуры — общий объем перевозок наземными видами транспорта». Это позволяет сделать вывод, что наиболее достоверный прогноз о потребности в развитии транспортной инфраструктуры можно получить при комплексном изучении различных видов транспорта, представленных в регионе.

Взаимосвязь между коэффициентами Энгеля и Гольца и объемом перевозок региона слабая. Следовательно, эти коэффициенты не могут использоваться для прогнозирования влияния транспортной инфраструктуры на удовлетворение текущих потребностей региона в перевозках.

Регрессионная зависимость объема перевозок региона от комплексной оценки транспортной инфраструктуры представлена на рис. 1.

Зависимость между изучаемыми величинами наилучшим образом описывает степенная функция. Методом наименьших квадратов получена следующая степенная регрессионная модель:  $Q = 40018 K^{2,35}$ , описывающая зависимость общего объема перевозок от комплексного показателя транспортной инфраструктуры. За рамки доверительного интервала прогноза выходит только одна точка — Кемеровская область, что объясняется высокими объемами отгрузки угля на железнодорожный транспорт в данном регионе, значительно превышающими погрузку в других регионах.

Основное назначение разработанной модели — возможность прогнозирования потребности в развитии транспортной инфраструктуры региона. Кроме того, на основе сопоставления полученных оценок можно судить о недостаточности или избыточности развития транспортной инфраструктуры в регионе (рис. 2).

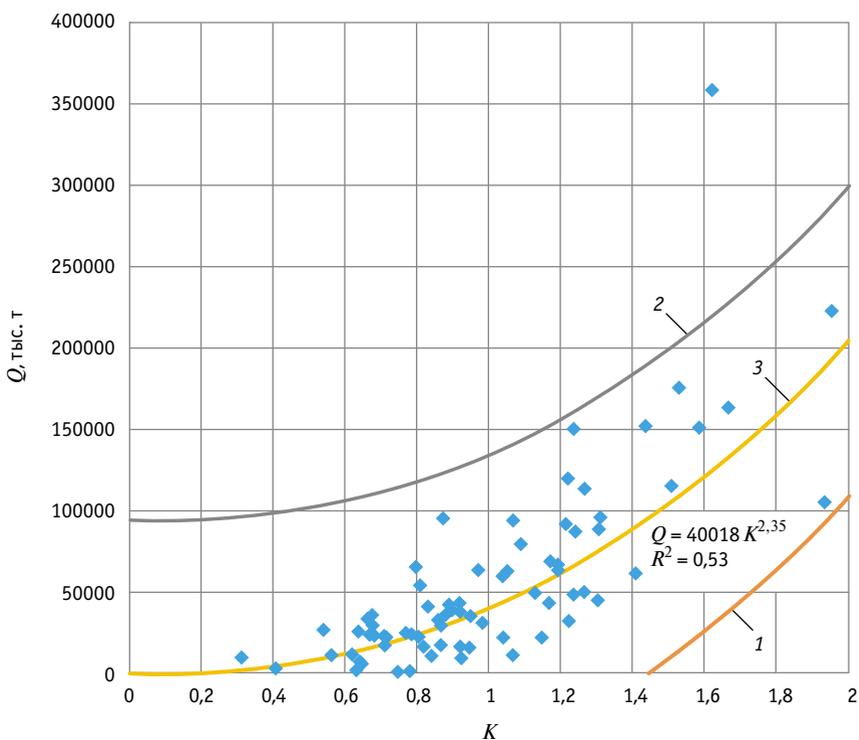
На рис. 2 исследуемое поле корреляции разделено на четыре зоны линиями средних значений по каждой переменной.

В зонах I и III размещены регионы, уровень развития транспортной инфраструктуры которых соответствует объему перевозок.

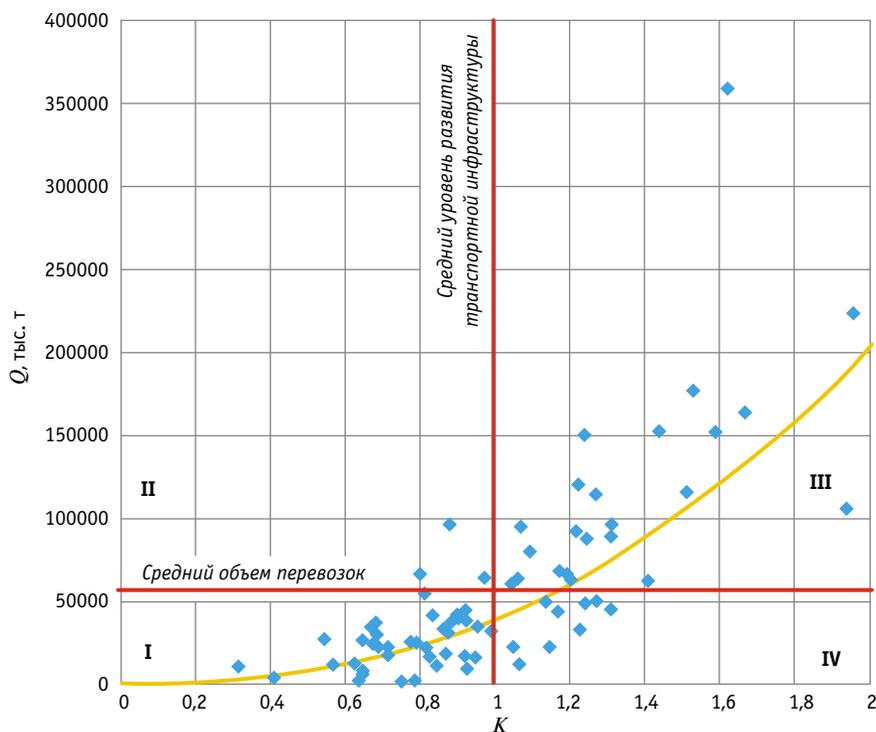
В зоне II оказались регионы, чей уровень развития инфраструктуры ниже, а объем перевозок выше, чем в среднем по стране (Архангельская, Вологодская, Мурманская области).

В зоне IV — регионы, уровень развития инфраструктуры которых выше, а объем перевозок ниже среднероссийских значений (Амурская, Курганская, Нижегородская, Пензенская, Саратовская, Тверская, Тюменская области, Дагестан, Карелия).

Представленный анализ хотя и не позволяет с полной уверенностью говорить о дефиците или избытке инфраструктуры в отдельных регионах, однако может быть хорошим инструментом для выбора проблемных регионов с целью проведения более подробного исследования обеспеченности инфраструктурой.



**Рис. 1. Регрессионная зависимость объема перевозок региона от комплексной оценки транспортной инфраструктуры:**  
1 — нижняя граница доверительного интервала; 2 — верхняя граница доверительного интервала; 3 — теоретические значения; ◆ — фактические значения



**Рис. 2. Анализ несоответствия развития транспортной инфраструктуры текущим потребностям в перевозках**

Таким образом, разработана методика оценки уровня развития транспортной инфраструктуры в регионе, которая включает показатели железнодорожной, автотранспортной и терминальной составляющих. Установлена тесная корреляционная связь между разработанным комплексным показателем и объемом перевозок в регионе, что позволяет на основе регрессионной модели прогнозировать влияние транспортной

инфраструктуры на удовлетворение текущих потребностей региона в перевозках.

Направлением дальнейших исследований авторов будет разработка методики оценки грузовой базы региона с целью прогнозирования текущего и потенциального спроса на перевозки и требуемого уровня развития транспортной инфраструктуры для удовлетворения этого спроса.

## Литература

1. О Транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года : утв. распоряжением Правительства Российской Федерации от 27.11.2021 г. № 3363-р. URL: <https://docs.cntd.ru/document/727294161> (дата обращения: 10.04.23).
2. Макроэкономическая оценка развития транспортной инфраструктуры / Д. А. Мачерет, А. В. Рышков, А. Ю. Белоглазов, К. В. Захаров // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. 2010. № 5. С. 3–10. ISSN 2223-9731.
3. Зандер Е. В., Корякова Е. А. Развитие транспортной инфраструктуры как необходимое условие социально-экономического развития региона // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. 2011. № 1 (34). С. 173–178. ISSN 1816-9724.
4. Гольская Ю. Н. Оценка влияния транспортной инфраструктуры на социально-экономическое развитие региона : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата экономических наук. Екатеринбург, 2013. 25 с.
5. Дугаржапова М. А., Жалсараева Е. А., Маланов В. И. Современное состояние транспортного комплекса и проблемы его развития в условиях пространственного развития России // Вестник Алтайской академии экономики и права. 2019. № 8-1. С. 49–57. ISSN 1818-4057.
6. Захаров С. В. Взгляд на развитие транспортной системы через призму государственной политики // Менеджер. 2021. № 2 (96). С. 55–60. ISSN 2308-104X.
7. Журавлева Н. А., Клыштик Т. Проблемы финансирования проектов развития транспортной инфраструктуры и основные инвестиционные тренды 2020 года // Транспортные системы и технологии. 2020. Т. 6. № 1. С. 129–145. ISSN 2413-9203. DOI: 10.17816/transsyst202061129-145.
8. Брызгина Е. О., Казьмин Д. М. Планирование инвестиций федерального бюджета в транспортную инфраструктуру // Транспорт Российской Федерации. 2019. № 5 (84). С. 3–7. ISSN 1994-831X.
9. Серебряков Л. Г., Яновский В. В. Проблемы стратегического планирования транспортной инфраструктуры региона — инновационный подход // Научные труды Северо-Западной академии государственной службы. 2011. Т. 2. № 1. С. 206–215. ISSN 2223-6635.
10. Тохиров Т. И. Оценка состояния транспортной инфраструктуры региона // Вестник Дагестанского государственного университета. Серия 3: Общественные науки. 2018. Т. 33. № 3. С. 28–35. ISSN 1994-7720.
11. Арошидзе А. А. Экономическая оценка влияния обеспеченности и интенсивности использования железнодорожного транспорта на социально-экономическое развитие территорий // Вестник СГУПС. 2015. № 4 (35). С. 55–61. ISSN 1815-9265.

## References

1. About the Transport strategy of the Russian Federation until 2030 with a forecast for the period up to 2035 [O Transportnoy strategii Rossiyskoy Federatsii do 2030 goda s prognozom na period do 2035 goda] : approved by the Order of the Government of the Russian Federation from 27.11.2021 No. 3363-r. URL: <https://docs.cntd.ru/document/727294161> (access date: 10.04.23).
2. Macheret D. A., Ryshkov A. V., Beroglazov A. Yu., Zakharov K. V. Macroeconomical assessment of transport infrastructure [Makroekonomicheskaya otsenka razvitiya transportnoy infrastruktury]. Russian Railway Science Journal. 2010. No. 5. Pp. 3–10. ISSN 2223-9731.
3. Zander E. V., Koryakova E. A. Development of transport infrastructure as necessary condition for socialand economic development of a region [Razvitie transportnoy infrastruktury kak neobkhdimoe uslovie sotsial'no-ekonomicheskogo razvitiya regiona]. Vestnik SibSAU. 2011. No. 1 (34). Pp. 173–178. ISSN 1816-9724.
4. Gol'skaya Yu. N. Assessment of the impact of transport infrastructure on the socio-economic development of the region [Otsenka vliyaniya transportnoy infrastruktury na sotsial'no-ekonomicheskoe razvitie regiona]. Synopsis of PhD in Economics Thesis. Ekaterinburg, 2013. 25 p.
5. Dugarzhapova M. A., Zhalsaraeva E. A., Malanov V. I. Current state of the transport complex and the problems of its development in terms of spatial development of Russia [Sovremennoe sostoyaniye transportnogo kompleksa i problemy ego razvitiya v usloviyakh prostranstvennogo razvitiya Rossii]. Vestnik of AAEL. 2019. No. 8-1. Pp. 49–57. ISSN 1818-4057.
6. Zakharov S. V. The glimpse of transport system development through the prism of state policy [Vzglyad na razvitie transportnoy sistemy cherez prizmu gosudarstvennoy politiki]. Manager. 2021. No. 2 (96). Pp. 55–60. ISSN 2308-104X.
7. Zhuravleva N. A., Kliestik T. The Problems of Financing Transport Infrastructure Development Projects and Main Investments Trends in 2020 [Problemy finansirovaniya proektov razvitiya transportnoy infrastruktury i osnovnye investitsionnye trendy 2020 goda]. Transportation Systems and Technology. 2020. Vol. 6. No. 1. Pp. 129–145. ISSN 2413-9203. DOI: 10.17816/transsyst202061129-145.
8. Briazgina E. O., Kaz'min D. M. Planning federal budget investment in transport infrastructure [Planirovaniye investitsiy federal'nogo byudzheta v transportnuyu infrastrukturu]. Transport of the Russian Federation. 2019. No. 5 (84). Pp. 3–7. ISSN 1994-831X.
9. Serebryakov L. G., Yanovskiy V. V. Problems of strategic planning of a regional transport infrastructure — the innovative approach [Problemy strategicheskogo planirovaniya transportnoy infrastruktury regiona — innovatsionnyy podkhod]. Scientific papers of the North-Western Academy of Public Service. 2011. Vol. 2. No. 1. Pp. 206–215. ISSN 2223-6635.
10. Tokhirov T. I. Assessment of the transport infrastructure of the region [Otsenka sostoyaniya transportnoy infrastruktury regiona]. Herald of Dagestan State University. Series 3. Social Sciences. 2018. Vol. 33. No. 3. Pp. 28–35. ISSN 1994-7720.
11. Aroshidze A. A. The Economic Analysis of the Impact of the Railway Transport Availability and Intensity on the Social and Economic Development of the Regions [Ekonomicheskaya otsenka vliyaniya obespechennosti i intensivnosti ispol'zovaniya zheleznodorozhnogo transporta na sotsial'no-ekonomicheskoe razvitie territoriy]. The Siberian Transport University Bulletin. 2015. No. 4 (35). Pp. 55–61. ISSN 1815-9265.

12. Нижегородцев Р. М., Горидько Н. П., Рослякова Н. А. Взаимосвязь между объемом ВРП и развитием транспортной инфраструктуры: опыт кластеризации регионов России // Региональная экономика: теория и практика. 2013. Т. 11. № 33. С. 19–24. ISSN 2073-1477.
13. Дабиев Д. Ф., Дабиева У. М. Оценка транспортной инфраструктуры макрорегионов России // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2015. № 11-2. С. 283–284. ISSN 1996-3955.
14. Нехорошков В. П. Значение железнодорожного транспорта для социально-экономического развития РФ // Вопросы новой экономики. 2014. № 1. С. 69–73. ISSN 1994-0556.
15. Федеральная служба государственной статистики. URL: <https://rosstat.gov.ru/> (дата обращения: 10.04.23).
16. Подробная карта железных дорог. URL: <https://supermap.zatramvaj.su/> (дата обращения: 10.04.23).
17. Центральная дирекция по управлению терминально-складским комплексом ОАО «РЖД». URL: <https://cargo.rzd.ru/> (дата обращения: 10.04.23).
18. ПАО «ТрансКонтейнер». URL: <https://trcont.com/> (дата обращения: 10.04.23).
12. Nizhegorodtsev R. M., Gorid'ko N. P., Roslyakova N. A. Relations between GRP volume and transport infrastructure development: experience of clustering for Russian regions [Vzaimosvyaz' mezhdru ob'emom VRP i razvitiem transportnoy infrastruktury: opyt klasterizatsii regionov Rossii]. Regional Economics: Theory and Practice. 2013. Vol. 11. No. 33. Pp. 19–24. ISSN 2073-1477.
13. Dabiev D. F., Dabieva U. M. Assesment of the Infrastrukture of Transport of Russia [Otsenka transportnoy infrastruktury makroregionov Rossii]. International journal of applied and fundamental research. 2015. No. 11-2. Pp. 283–284. ISSN 1996-3955.
14. Nekhoroshkov V. P. The essence of the railway transport for the socio-economic development of the Russian Federation [Znachenie zheleznodorozhnogo transporta dlya sotsial'no-ekonomicheskogo razvitiya RF]. Issues of New Economy. 2014. No. 1. Pp. 69–73. ISSN 1994-0556.
15. The Federal State Statistics Service [Federal'naya sluzhba gosudarstvennoy statistiki]. URL: <https://rosstat.gov.ru/> (access date: 10.04.23).
16. Detailed railway map [Podrobnaya karta zheleznykh dorog]. URL: <https://supermap.zatramvaj.su/> (access date: 10.04.23).
17. Central Directorate for the Terminal and Warehouse Complex of JSC «Russian Railways» Management [Tsentral'naya direktsiya po upravleniyu terminal'no-skladskim kompleksom ОАО «RZhD»]. URL: <https://cargo.rzd.ru/> (access date: 10.04.23).
18. PJSC «TransContainer» [PAO «TransKonteyner»]. URL: <https://trcont.com/> (access date: 10.04.23).

Объем статьи 0,67 авторских листа

УДК 629.423.3

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

Анастасия Александровна Козлова, аспирант Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия

## АНАЛИЗ ОТКАЗОВ И СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОПОЕЗДОВ

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

Anastasiya Alexandrovna Kozlova, postgraduate student, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia

### Analysis of failures and ways to increase reliability of equipment of electric-multiple units

#### Аннотация

По результатам статистики отказов выявлены особо ненадежные узлы и агрегаты электропоездов. Влияние уровня надежности одного из наиболее подверженных отказам узла — колесных пар — на надежность электропоезда в целом оценивалось при помощи пирамиды Гейнриха. Приведены причины частых выходов из строя колесных пар, а также возможные способы устранения отказов. С целью увеличения срока службы колесных пар, быстрого и эффективного устранения локальных дефектов предложено использовать мобильный станок для обточки колесных пар. Идея заключается в связи теоретического представления о повышении уровня надежности электропоезда (пирамида Гейнриха) и практического применения устройств, способствующих этому (станок для обточки колесных пар). На основании выполненных расчетов, а также предлагаемого способа устранения дефектов приведена «подточенная» пирамида Гейнриха, подтверждающая, что рассмотрен эффективный способ повышения надежности электропоездов.

**Ключевые слова:** электропоезд, механическая часть, колесная пара, уровень надежности, пирамида Гейнриха, ползун, мобильный станок для обточки колесных пар

#### Abstract

According to results of failures statistics the authors have revealed most unreliable units and assemblies of electric-multiple units. Influence of reliability level of wheelsets on the reliability of an electric-multiple unit was estimated with the use of the Heinrich's Pyramid. The authors have provided reasons of frequent failures of wheelsets and possible ways to eliminate failures. In order to increase of life of wheelsets and fast and efficient elimination of local defects they propose to use a mobile tool for wheelset trueing. The idea is in connection of theoretical representation of increase of electric-multiple unit reliability level (Heinrich's Pyramid) and application of devices that promote it (tool for wheelset trueing). On the basis of calculations and the proposed method of failures elimination the authors provide a «sharpened» Heinrich's Pyramid showing that they have considered an efficient method for increase of electric-multiple unit reliability.

**Keywords:** electric-multiple unit, mechanical part, wheelset, reliability level, Heinrich's Pyramid, ram, mobile tool for wheelset trueing

DOI: 10.20291/1815-9400-2023-3-105-108

**В** активно развивающейся железнодорожной отрасли моторвагонный подвижной состав является одним из самых распространенных и популярных видов. Среди пассажиров именно способ передвижения на электропоездах пользуется большим спросом, поэтому важность единиц моторвагонной техники переоценить невозможно.

Высокий спрос предопределяет жесткие требования к долговечности и безотказности электропоездов. Это напрямую связано с обеспечением безопасности движения и, как следствие, безопасности пассажиров.

На данном этапе развития моторвагонного подвижного состава необходимо совершенствовать организацию технического обслуживания и ремонта электропоездов за счет увеличения межремонтного ресурса. Однако нередко преждевременный выход из строя ненадежных узлов и агрегатов приводит к неплановым ремонтам, что, в свою очередь, как минимум экономически неэффективно с точки зрения привлекаемых материальных и человеческих ресурсов. Сокращение количества неплановых ремонтов — цель, в основе которой лежит решение проблемы преждевременного выхода из строя самых ненадежных узлов и агрегатов. Именно повышение уровня долговечности некоторых узлов и деталей, а также использование более совершенных технологий способствует достижению поставленной цели, т.е. не только исключению неплановых ремонтов, но и устранению такого вида обслуживания, как ТО-3.

К узлам электропоездов, которые особенно часто подвержены отказам, относятся низковольтные цепи управления (включая аккумуляторные батареи) и колесные пары [1]. Решить проблему, связанную с неисправностями первых, можно, если использовать повышающий импульсный DC/DC-преобразователь, способный устранить основную причину преждевременного выхода из строя аккумуляторных батарей — уравнивательные токи [2]. Но не менее важная проблема — повреждение колесных пар.

Таблица 1

Отказы оборудования электропоездов на Свердловской железной дороге

Оборудование	Отказ	Количество отказов
Колесная пара	Ползун, выбоина	78
	Остроконечный накат гребня	9
	Сдвиг бандажа	8
	Трещины на оси колесной пары	8
Электрическое оборудование и аппараты	Неисправность высоковольтных цепей	7
	Нарушение коммутации электрических машин	6
Зубчатая передача	Отсутствие смазки в редукторе	11
	Повреждение большого зубчатого колеса	10
	Повреждение малой шестерни	9
	Повреждение кожуха	8
	Местная выработка (износ) контактных поверхностей	5

Организация технического обслуживания и ремонта предусматривает плановые постановки электропоездов на ТО-3 и ТО-4. Эти виды технического обслуживания, направленные на устранение неисправностей в работе оборудования и на установление пригодности подвижного состава к эксплуатации, предусматривают плановую постановку поезда без расцепления. Операции, производимые на ТО-3, часто включают в себя работы, выполняемые на ТО-4, поэтому нередко эти виды обслуживания объединяют. В случае необходимости в неплановом ремонте колесных пар электропоезд отправляют именно на ТО-3 (ТО-4).

Для определения способа повышения долговечности и безотказности эксплуатации колесных пар прежде всего необходимо выявить причину возникновения неисправности. Электропоезда — это, как правило, средства передвижения на пригородных участках, делающие частые остановки. То есть примерно через каждые 3–5 км машинист электропоезда применяет торможение, в результате чего воздействие тормозной колодки на колесо увеличивается, что приводит к износу колеса. Помимо этого при возникновении нештатной ситуации машинист вынужден применять экстренное торможение. Кроме того, на повышенный износ колесных пар влияет эксплуатация электропоездов в кривых участках пути [3].

На вагонах электропоездов разных видов используются разные виды колесных пар: на моторных вагонах — с бандажными колесами, на головных и прицепных — с цельнокатанными. Известно, что у моторных вагонов колесные пары изнашиваются быстрее, поэтому их основной неисправностью являются такие дефекты, как ползуны (выбоины). Например, согласно статистике, в 2022 г. на полигоне Свердловской железной дороги было зафиксировано 159 отказов оборудования электропоездов, из них большинство нарушений в работе — 103 — пришлось на долю колесных пар, в том числе 78 случаев связаны с возникновением ползунов и выбоин (табл. 1).

Для снижения случаев нарушения безопасности движения электропоездов предлагаем использовать причинно-следственные связи между уровнями (слоями)

пирамиды Гейнриха [4] (рис. 1). В основании пирамиды лежит незначительное нарушение в работе технического средства, а в вершине — серьезный отказ, приводящий к тяжким последствиям. Безусловно, эти слои тесно взаимосвязаны. То есть ползун (выбоина), основное нарушение колесных пар, приводит к нарушению надежности электропоезда в целом.



Рис. 1. Общий вид пирамиды Гейнриха

По пирамиде Гейнриха можно судить о том, что возникающие на колесных парах ползуны (если вовремя не устранить данную проблему) могут привести к отказу всей механической части и, как следствие, к отказу электропоезда в целом. То есть пирамида Гейнриха наглядно показывает, что улучшить показатели надежности электропоезда можно за счет «подтаци-

вания» (усечения) основания, т.е. за счет устранения ползунов и выбоин.

Образование ползуна — проблема не новая и давно изученная. Но природа его возникновения может быть весьма разнообразной — от простого ударного воздействия на стыке пути до применения экстренного торможения. Чтобы устранить, например, такое нарушение, как появление локального дефекта, обычно используют обточку бандажа колесной пары специальными колесно-фрезерными и колесно-токарными станками.

Помимо соблюдения технологии обточки, одним из требований является соблюдение размерности колесной пары, в частности, не допускается отклонение от предельной разности в диаметрах бандажей колес колесных пар.

Как правило, при определении разности рассматриваются не колеса, размещенные на одной оси, а колесные пары моторного вагона в целом по отношению друг к другу. То есть если рассматриваются пары одной тележки, то разность в диаметрах бандажей допускается не более 8 мм, а если пары разных тележек, то не более 15 мм. Измерения проводят толщиномером И372.01. Если при измерении бандажей двух (одной тележки) или четырех колесных пар (разных тележек моторного вагона) разница в толщине не обнаружена, считается, что разности в диаметрах нет.

Начальное значение разности диаметров определяется следующим образом:

$$\Delta D_0 = |(d_{\text{пр}} + D_{\text{кц.пр}}) - (D_{\text{кц.л}} + d_{\text{л}})|, \quad (1)$$

где  $d_{\text{пр}}$  и  $d_{\text{л}}$  — толщина двух бандажей (правого и левого соответственно) одной колесной пары, мм;  $D_{\text{кц.пр}}$  и  $D_{\text{кц.л}}$  — диаметры колесных центров (правого и левого соответственно) одной колесной пары (значения берутся из паспорта колесной пары), мм.

В эксплуатации значения разности диаметров отличаются от начального показателя, но не превышают определенного максимума, который устанавливается в зависимости от серии электропоезда.

Обточка колесной пары — операция, подразумевающая применение специальных станков (с их помощью можно осуществить обточку как с выкаткой колесной пары, так и без выкатки из-под вагона). Применение более совершенных технологий и сплавов при производстве колесных пар способствует усложнению технологии обточки, созданию более технологичных станков с особо прочными режущими пластинами. В процессе непосредственного срезания металла с поверхности катания при наличии локального дефекта происходят скачки силы резания, сопоставимые с возникновением периодической ударной силы в месте дефекта. Напряжение при ударе режущей пластины о дефект для бандажей колес высокой твердости (все чаще именно такие используются на сети железных дорог), как правило, достигает 900–950 Па, в то время как при стабильном режущем воздействии напряжение находится в интервале 500–550 МПа.

Зависимость напряжения, возникающего на передней части режущей пластины в момент удара в месте дефекта, от напряжения при стабильной силе резания (когда на колесе нет дефектов) описывается выражением

$$\sigma_{\text{уд}} = \sigma_{\text{ст}} \cdot \mu, \quad (2)$$

где  $\sigma_{\text{уд}}$  и  $\sigma_{\text{ст}}$  — соответственно напряжение в момент удара и при стабильном резании, МПа;  $\mu$  — коэффициент удара, определяемый как

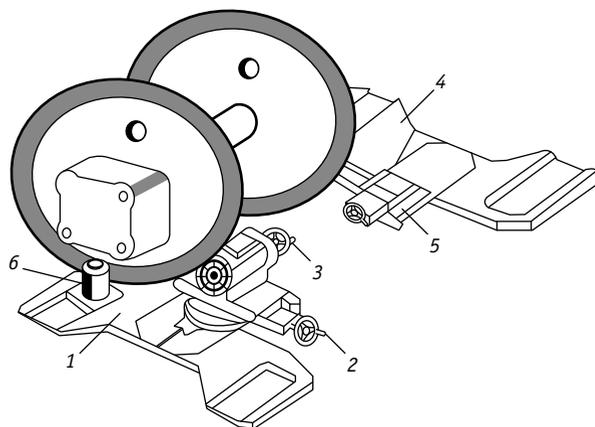
$$\mu = k_j \cdot 0,84 + 0,026 \cdot V_{\text{рез}}, \quad (3)$$

где  $k_j$  — поправочный коэффициент, учитывающий момент инерции технологической системы,  $k_j = 0,0035 \cdot V_{\text{рез}} + 1,02$ ;  $V_{\text{рез}}$  — скорость резания, м/мин.

Однако важно отметить, что не все станции могут позволить проведение операции обточки из-за отсутствия ремонтного моторвагонного или сервисного депо, да и просто необходимого оборудования. Поэтому в целях совершенствования организации восстановления работоспособного состояния колесных пар предлагается использовать мобильные станки для их обточки [5]. Мобильный станок, разработанный в УРГУПС, не требует специализированной площадки для проведения операции. Обточку производят без вы-

катки колесной пары из-под вагона. Также одним из главных преимуществ мобильного станка является возможность использовать в качестве источника питания аккумуляторную батарею электропоезда. Все, что нужно для выполнения правильной обточки, — ровная асфальтированная или бетонированная поверхность.

Сам мобильный станок прост по своей конфигурации (рис. 2).



**Рис. 2. Мобильный станок для обточки колесной пары:**  
1 — переносная станина; 2 — суппорт; 3 — привод;  
4 — реостат; 5 — источник питания; 6 — домкраты

Суппорт предназначен для подачи резца станка параллельно и/или перпендикулярно оси обрабатываемой колесной пары. Привод — это электродвигатель постоянного тока с частотой вращения 1400 об/мин, который обеспечивает подачу вращательного момента на колесо и регулировку силы сцепления валика с колесом и станиной. Реостат включает в себя набор из нескольких активных сопротивлений и рубильников. С помощью реостата задаются значения минимальной (25 об/мин) и максимальной (240 об/мин) скорости вращения валика. Домкраты служат для фиксации суппорта и валика привода относительно колесной пары.

Представленный на рис. 2 мобильный станок обеспечивает быстрое и качественное восстановление поверхности катания бандажа колеса, позволяет регулировать скорость и объем снимаемого с поверхности металла, а также устранять дефекты различной размерности (не превышающей критического значения).

Использование этого мобильного устройства (или его аналога) для обточки колесной пары дает возможность снизить затраты материальных и временных ресурсов на восстановление работоспособного состояния колесной пары, что, в свою очередь, обеспечивает достижение поставленной цели (сокращение постановок на неплановый ремонт) и, как следствие, совершенствование организации проведения технического обслуживания и ремонта электропоездов.

Быстрое и нересурсозатратное восстановление поверхности катания колеса — это и есть то самое «подтачивание» (усечение) основания пирамиды Гейнриха (рис. 3).

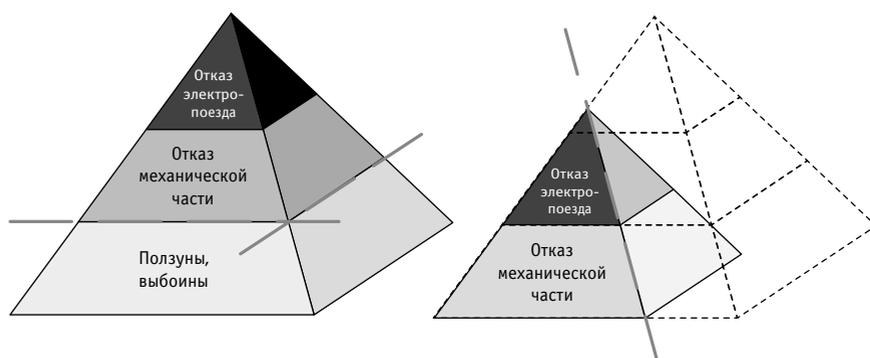


Рис. 3. Усеченная пирамида Гейнриха

Таким образом, устранение самой распространенной проблемы (возникновение ползунов на колесных парах), приводящей к нарушению долговечности и безотказности элементной базы электропоезда, позволяет повысить уровень составляющих надежности электропоезда в целом. При активном внедрении технология обточка колесной пары без выкатки и без постановки электропоезда на ТО-4 даст возможность совершенствовать ремонтную программу моторвагонного подвижного состава.

## Литература

1. Буйносов А. П., Козаков Д. Ю. Анализ отказов узлов электропоездов постоянного тока на основе закона Парето // Научно-технический вестник Поволжья. 2013. № 4. С. 120–123. ISSN 2078-0392.
2. Буйносов А. П., Козлова А. А. Повышение надежности аккумуляторных батарей на электропоездах // Вестник УрГУПС. 2022. № 2 (54). С. 41–52. DOI: 10.20291/2078-0392-2022-2-41-52. ISSN 2078-0392.
3. Буйносов А. П., Шарاپов А. Т., Козлова А. А. Причины интенсивного износа бандажей колесных пар локомотивов // Научно-технический вестник Поволжья. 2022. № 1. С. 60–63. ISSN 2079-5920.
4. Буйносов А. П., Козаков Д. Ю. Применение пирамиды Генриха для оценки безопасности движения электропоездов // Научно-технический вестник Поволжья. 2013. № 6. С. 178–181. ISSN 2079-5920.
5. Буйносов А. П., Козаков Д. Ю. Разработка мобильного станка для обточки колесных пар электропоезда // Научно-технический вестник Поволжья. 2015. № 3. С. 97–100. ISSN 2079-5920.

Объем статьи 0,43 авторских листа

## References

1. Buynosov A. P., Kozakov D. Yu. The analysis of refusals of knots of electric trains of the direct current on the basis of the law Pareto [Analiz otkazov uzlov elektropoezdov postoyannogo toka na osnove zakona Pareto]. Scientific and Technical Volga region Bulletin. 2013. No. 4. Pp. 120–123. ISSN 2078-0392.
2. Buynosov A. P., Kozlova A. A. Improving the reliability of batteries on electric trains [Povyshenie nadezhnosti akkumulyatornykh batarey na elektropoezdakh]. Herald of USURT. 2022. No. 2 (54). Pp. 41–52. DOI: 10.20291/2078-0392-2022-2-41-52. ISSN 2078-0392.
3. Buinosov A. P., Sharapov A. T., Kozlova A. A. Reasons of intensive wear of locomotive wheel bandages [Prichiny intensivnogo iznosa bandazhey kolesnykh par lokomotivov]. Scientific and Technical Volga region Bulletin. 2022. No. 1. Pp. 60–63. ISSN 2079-5920.
4. Buinosov A. P., Kozakov D. Yu. Application of the pyramid of Henry for the assessment of traffic safety of electric trains [Primenenie piramidy Genrikha dlya otsenki bezopasnosti dvizheniya elektropoezdov]. Scientific and Technical Volga region Bulletin. 2013. No. 6. Pp. 178–181. ISSN 2079-5920.
5. Buynosov A. P., Kozakov D. Yu. Development of the mobile machine for turning of wheelpairs of the electric train [Razrabotka mobil'nogo stan-ka dlya obtochki kolesnykh par elektropoezda]. Scientific and Technical Volga region Bulletin. 2015. No. 3. Pp. 97–100. ISSN 2079-5920.

УДК 621.372.21

Татьяна Владимировна Ковалева, кандидат технических наук, доцент кафедры «Теоретическая электротехника» Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), Омск, Россия,

Александр Анатольевич Комяков, доктор технических наук, профессор кафедры «Теоретическая электротехника» Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), Омск, Россия,

Ольга Олеговна Комякова, кандидат технических наук, доцент кафедры «Теоретическая электротехника» Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), Омск, Россия,

Наталья Викторовна Пашкова, кандидат технических наук, доцент кафедры «Теоретическая электротехника» Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), Омск, Россия

## РЕЗОНАНСНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ТРЕХФАЗНЫХ ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ, ПИТАЮЩИХ НЕТЯГОВЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Tatyana Vladimirovna Kovaleva, PhD in Engineering, Associate Professor, Theoretical Electrical Engineering Department, Omsk State Transport University, (OSTU), Omsk, Russia,

Alexander Anatolyevich Komyakov, DSc in Engineering, Professor, Theoretical Electrical Engineering Department, Omsk State Transport University, (OSTU), Omsk, Russia,

Olga Olegovna Komyakova, PhD in Engineering, Associate Professor, Theoretical Electrical Engineering Department, Omsk State Transport University, (OSTU), Omsk, Russia,

Natalya Viktorovna Pashkova, PhD in Engineering, Associate Professor, Theoretical Electrical Engineering Department, Omsk State Transport University, (OSTU), Omsk, Russia

## Resonance phenomena in three-phase power transmission lines feeding the non-traction consumers of railway transport

### Аннотация

Статья посвящена анализу качества электрической энергии в трехфазных системах электроснабжения нетяговых потребителей 10 кВ, получающих питание от тяговых подстанций, с учетом резонансных явлений. В статье делается акцент на гармониках высокого порядка, наличие которых негативно влияет на работу современного электрооборудования. Прогноз возникновения резонансов напряжений и токов в трехфазных линиях электропередачи, питающих нетяговых потребителей, осуществляется на основании расчета в среде MathCAD. Исследование электромагнитных процессов, в том числе оценка значений высших гармоник напряжения с учетом резонансных явлений у потребителей, осуществляется с использованием моделирования в среде SimInTech. Выполнен расчет суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения и коэффициента нечетных гармонических составляющих напряжения, не кратных трем, при различных нагрузочных режимах линии.

**Ключевые слова:** тяговая подстанция, трехфазная линия электропередачи, нетяговые потребители, резонансные явления, показатели качества электроэнергии, имитационное моделирование

### Abstract

The article is devoted to the analysis of the quality of electrical energy in three-phase power supply systems for 10 kV non-traction consumers receiving power from traction substations, taking into account resonance phenomena. Emphasis is placed on high-order harmonics, which negatively affect the operation of modern electrical equipment. The prediction of voltage and current resonances in three-phase power transmission lines feeding the non-traction consumers was carried out on the basis of calculations in MathCAD. SimInTech simulations were performed to study electromagnetic processes, including estimation of the higher voltage harmonics values taking into account resonance phenomena in consumers.

**Keywords:** traction substation, three-phase power transmission line, non-traction consumers, resonance phenomena, electricity quality indicators, simulation modeling

DOI: 10.20291/1815-9400-2023-3-109-114

### ВВЕДЕНИЕ

Системы электроснабжения электрифицированных железных дорог — это источник гармонических составляющих напряжения, причем не только в тяговой сети, но и на стороне сетевой обмотки преобразовательных трансформаторов. Причинами, приводящими к искажению напряжения в тяговой сети, являются электроподвижной состав, работа преобразователей тяговых подстанций постоянного тока, а также волновые процессы, которые обусловлены электромагнитными процессами, возникающими в тяговой сети как в линии с распределенными параметрами. Вопросы качества электроэнергии на объектах железнодорожного транспорта достаточно хорошо исследованы в трудах отечественных и зарубежных ученых [1–4], однако продолжают оставаться актуальными.

Питание нетяговых потребителей железнодорожного транспорта, а также жилых домов, предприятий сельского хозяй-

ства осуществляется по трехфазным линиям электропередачи напряжением 10–35 кВ. На этих объектах в последнее время внедряется электрооборудование с импульсными источниками питания. К ним относятся бытовое электрооборудование (телевизоры, стиральные машины с электронными блоками управления), цифровые системы управления станками и т. д. Такие потребители критичны к качеству питающего напряжения, особенно в спектре высокочастотных гармоник — начиная с 950 Гц и выше. Питающие линии этих потребителей могут иметь большую протяженность (до 40–50 км). Одна из причин возникновения перенапряжений — резонансные явления в линиях электропередачи большой протяженности, которые отрицательно влияют на надежность электрооборудования энергетической инфраструктуры [5–9].

Цель настоящего исследования — оценка значений напряжения гармоник высокого порядка при резонансных явлениях в трехфазных линиях электропередачи 10 кВ, получающих питание от тяговых подстанций электрифицированных железных дорог.

Линия электропередачи в отличие от тяговой сети представляет собой трехфазную электрическую цепь с распределенными параметрами. Основные соотношения и уравнения любой длинной линии содержат временную и пространственную координаты. Как правило, в качестве объекта изучения используется модель двухпроводной однородной линии как простейшего представителя рассматриваемого класса цепей. Соотношения и закономерности, установленные для такой цепи, могут быть в случае необходимости перенесены и на другие типы линий, в частности на трехфазные трех- или четырехпроводные.

### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ВОЗМОЖНОСТИ ВОЗНИКНОВЕНИЯ РЕЗОНАНСОВ

Основа математического аппарата для расчета двухпроводной линии с первичными ( $R_0, L_0, G_0, C_0$ ) и вторичными (волновое сопротивление  $Z_B$ , коэффициент распространения  $\gamma$ ) параметрами — телеграфные уравнения, которые представляют собой систему из двух дифференциальных уравнений для напряжения  $\dot{U}(x)$  и тока  $\dot{I}(x)$  в точке наблюдения  $x$  относительно входных напряжения  $\dot{U}_1$  и тока  $\dot{I}_1$ .

Чтобы привести уравнения для трехфазной линии электропередачи к виду уравнений двухпроводной линии, используется известный алгоритм [10]. Анализ электромагнитных процессов в трехфазной линии передачи может быть выполнен с помощью уравнений, обладающих полной симметрией параметров:

$$\begin{cases} \dot{U}(x) = \frac{1}{2}(\dot{U}_1 + \dot{I}_1 Z_B) e^{-\gamma x} + \frac{1}{2}(\dot{U}_1 - \dot{I}_1 Z_B) e^{\gamma x}; \\ \dot{I}(x) = \frac{1}{2Z_B}(\dot{U}_1 + \dot{I}_1 Z_B) e^{-\gamma x} - \frac{1}{2Z_B}(\dot{U}_1 - \dot{I}_1 Z_B) e^{\gamma x}. \end{cases} \quad (1)$$

Значение активной проводимости  $G_0$  для линий напряжением меньше 330 кВ принимается равным нулю [10].

Резонанс на определенной частоте возникает при длине линии, которая называется резонансной длиной  $l_p$ . В этом слу-

чае в конце линии значение напряжения или тока может превышать их значение в начале линии. Резонансная длина для каждой гармоники различная.

Вероятность возникновения резонансов напряжения и тока на определенной частоте можно оценить с помощью коэффициентов кратности  $\eta_{PH}, \eta_{PT}$  [11]:

$$\begin{cases} \eta_{PH} = \left| e^{-\alpha l_{PH\min}} \frac{1 - \rho e^{-2\gamma l_{PH\min}}}{1 + \rho e^{-2\gamma l_{PH\min}}} \right| \gg 1; \\ \eta_{PT} = \left| e^{-\alpha l_{PT\min}} \frac{1 + \rho e^{-2\gamma l_{PT\min}}}{1 - \rho e^{-2\gamma l_{PT\min}}} \right| \gg 1, \end{cases} \quad (2)$$

где  $\gamma = \alpha + j\beta$  — коэффициент распространения ( $\alpha$  — коэффициент затухания,  $\beta$  — коэффициент фазы);

$$\rho = \frac{Z_H - Z_B}{Z_H + Z_B} = \rho e^{j\psi} \text{ — коэффициент отражения } (Z_B \text{ —}$$

волновое сопротивление, Ом;  $Z_H$  — сопротивление нагрузки, Ом);

$$l_{PH\min} = \frac{\pi + \psi}{2\beta} \text{ — минимальная длина линии при резонансе напряжений, км;}$$

$$l_{PT\min} = \frac{\psi}{2\beta} \text{ — минимальная длина линии при резонансе токов, км.}$$

Выражения (2) справедливы, когда эффект наложения волн напряжения и тока преобладает над их затуханием.

Приведенная методика анализа электромагнитных процессов с учетом распределенного характера параметров трехфазной линии позволила создать математическую модель в среде MathCAD, которая дает возможность оценить вероятность появления резонансов в линиях.

### ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОЙ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Вместе с тем следует подчеркнуть, что рассмотренная методика позволяет оценить только возможность появления резонансов в линиях. Но чтобы детально проанализировать электромагнитные процессы в условиях резонанса в любой точке каждой фазы при несимметричной нагрузке, необходима соответствующая модель трехфазной линии электропередачи. Для создания виртуальных комплексных моделей динамики объектов, в том числе трехфазных электрических сетей [12, 13], предназначена среда динамического моделирования SimInTech.

Поэтому в среде SimInTech разработана виртуальная модель трехфазной линии электропередачи переменного тока напряжением 10 кВ, состоящая из трехфазного источника напряжения, специального блока «Трехфазная линия электропередачи», заменяющего элементарный участок длинной линии, понижающего трехфазного трансформатора, трехфазной активно-индуктивной нагрузки, измерительных приборов, осциллографов и анализаторов спектрального состава напряжения (рис. 1).

Экспериментальные исследования, проведенные на шинах 10 кВ тяговой подстанции Западно-Сибирской железной до-

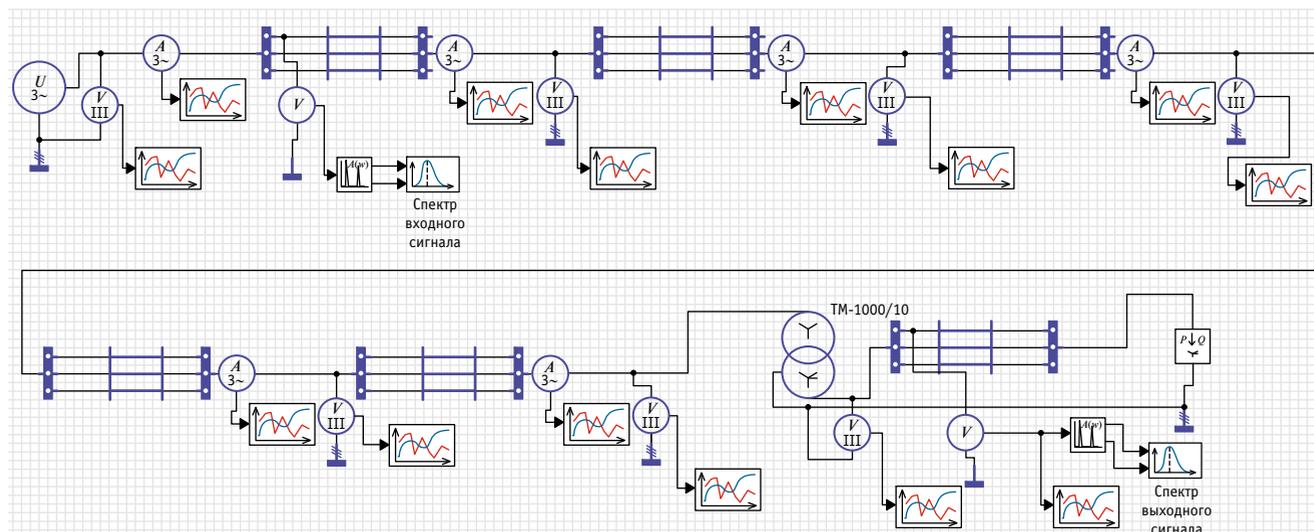


Рис. 1. Схема замещения трехфазной линии электропередачи переменного тока в среде SimInTech и результаты спектрального анализа

роги, позволили сформировать гармонический спектр питающего напряжения. В среде SimInTech создана модель трехфазного источника несинусоидального напряжения, в котором содержатся нечетные гармоники с частотами в диапазоне от 50 до 1550 Гц. Схема трехфазного виртуального генератора и кривые несинусоидальных фазных напряжений на ее выходе показаны на рис. 2.

При изменении параметров блока «Трехфазная линия электропередачи» можно варьировать длину линии, количество элементарных участков с заданными первичными параметрами.

### РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для прогнозирования возникновения резонанса напряжения в линии в среде MathCAD рассчитывался коэффициент кратности  $\eta_{PH}$  в зависимости от частот питающего напряжения. В качестве примера взята линия длиной 50 км с первичными параметрами  $R_0 = 0,21 \text{ Ом/км}$ ,  $L_0 = 1,33 \cdot 10^{-3} \text{ Гн/км}$ ,  $C_0 = 17 \cdot 10^{-9} \text{ Ф/км}$  с активно-индуктивной нагрузкой (полная мощность 1000 кВ·А, коэффициент мощности 0,7). Результаты расчета представлены на рис. 3а. Анализ приведенной зависимости показывает наибольшую вероятность возникновения резонанса напряжений на 23-й гармонике (1150 Гц) в конце линии.

Моделирование в среде SimInTech выполнялось с использованием схемы замещения трехфазной линии (см. рис. 1),

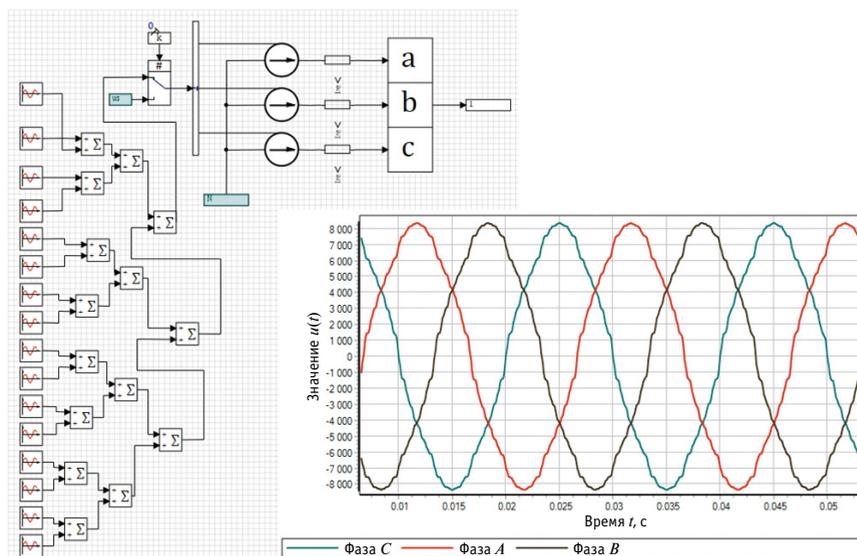


Рис. 2. Схема замещения трехфазного виртуального генератора несинусоидального напряжения в среде SimInTech и кривые фазных напряжений на ее выходе

представленной пятью блоками, состоящими из 10 элементарных секций, длина каждой из которых 1 км, с первичными параметрами, аналогичными принятым для расчета в среде MathCAD. Схема замещения линии может содержать любое количество блоков «Трехфазная линия электропередачи» определенной длины для контроля напряжения и тока в любой точке линии. На вход такой линии было подано несинусоидальное трехфазное напряжение, кривые которого представлены на рис. 2. Нагрузка линии принята также аналогичной для расчета в сре-

де MathCAD. Для спектрального анализа кривых напряжения на входе линии и на нагрузке подключены анализаторы спектрального состава напряжения. На основании показаний анализаторов проведен расчет коэффициентов усиления гармоник напряжения  $\left( \frac{U_{(n)ВХОД}}{U_{(n)ВЫХОД}} \right)$  при различных частотах (рис. 3б).

Сравнение результатов моделирования в среде SimInTech с прогнозами по расчетам в среде MathCAD показывает их полную тождественность.

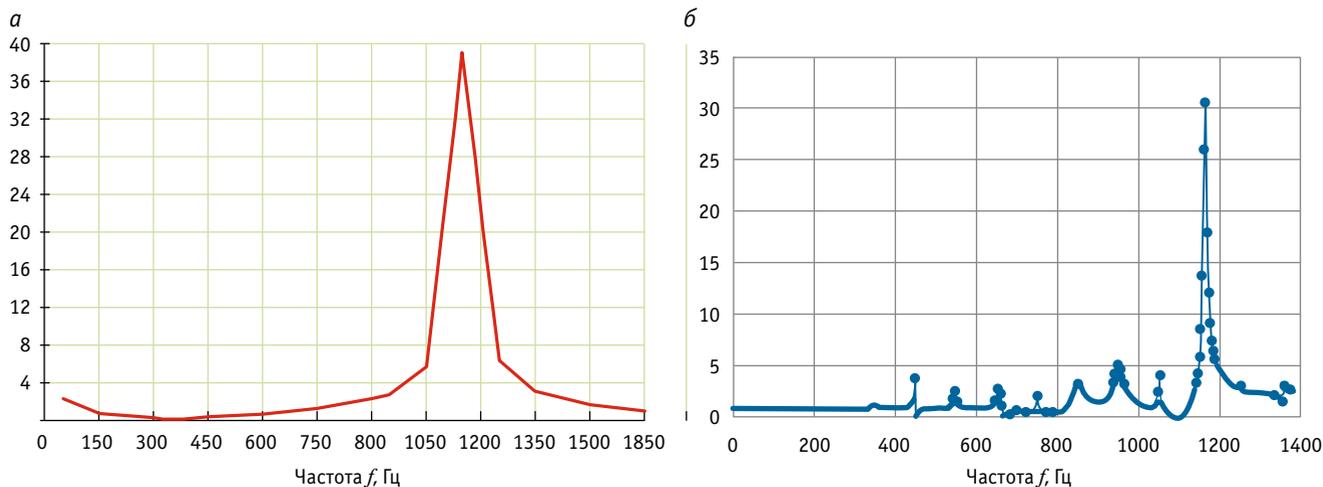


Рис. 3. Результаты моделирования в MathCAD и SimInTech коэффициента кратности  $\eta_{PH}$  (а) и коэффициента усиления гармоник (б) в зависимости от частоты напряжения

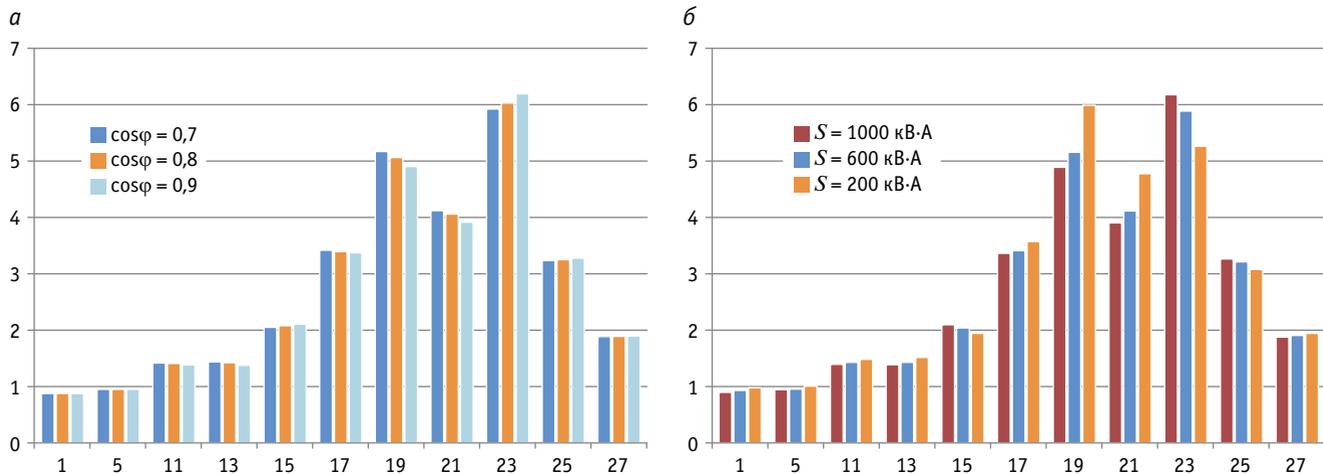


Рис. 4. Зависимости коэффициента усиления гармоник напряжения на выходе линии от номера гармоник

Для оценки зависимости гармонического состава напряжения на выходе исследуемой линии от мощности нагрузки и коэффициента мощности на основании показаний анализатора спектра модели SimInTech построены диаграммы (рис. 4). Зависимости коэффициента усиления гармоник напряжения на выходе линии от номера гармоник построены для следующих вариантов: на рис. 4а — при полной мощности нагрузки 1000 кВ·А и различных коэффициентах мощности (0,7; 0,8; 0,9); на рис. 4б — при коэффициенте мощности 0,9 и различных полных мощностях нагрузки (200, 600, 1000 кВ·А).

Одним из показателей качества электрической энергии, который нормируется ГОСТ 32144–2013, является суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения  $K_U$  (отношение среднеквадратического значения суммы высших гармоник к среднеквадратическому значению основной гармоники). Для линии 6–25 кВ этот коэффициент не должен превышать 5 %.

Зависимость коэффициента  $K_U$  от координаты наблюдения  $x$  вдоль исследуемой линии при полной мощности нагрузки 1000 кВ·А и коэффициенте мощности 0,9 приведена в табл. 1.

Таблица 1

Зависимость коэффициента  $K_U$  от координаты наблюдения вдоль исследуемой линии

$x$ , км	0	10	20	30	40	50
$K_U$ , %	4,46	4,97	6,04	7,18	8,01	8,29

Другим показателем качества электрической энергии, который также нормируется ГОСТом 32144–2013, является коэффициент нечетных гармонических составляющих напряжения, не кратных трем  $K_{U(n)}$ . В конце исследуемой линии наибольшая вероятность возникновения резонанса напряжений соответствует 23-й гармонике (1150 Гц). Для анализа поведения 23-й гармоники напряжения вдоль линии рассчитана зависимость коэффициента  $K_{U(23)}$  от координаты наблюдения  $x$  при полной мощности нагрузки 1000 кВ·А и коэффициенте мощности 0,9 (табл. 2).

Таблица 2

Зависимость коэффициента  $K_{U(23)}$  от координаты наблюдения вдоль исследуемой линии

х, км	0	10	20	30	40	50
$K_{U(23)}, \%$	0,49	0,68	1,76	2,66	3,25	3,45

Из данных табл. 1 и 2 следует, что в конце трехфазной линии показатели качества электроэнергии превышают допустимые значения, в то время как в ее начале соответствуют нормативам.

## ВЫВОДЫ

Прогноз возникновения резонансов напряжений и токов в трехфазных линиях электропередачи, питающих нетяговых потребителей, выполнен на основе расчета в среде MathCAD. Для анализа электромагнитных процессов, в том числе для оценки значений высших гармоник напряжения с учетом резонансных явлений у потребителей, проведено моделирование в среде SimInTech.

Результаты анализа зависимости коэффициента усиления гармоник напряжения на выходе линии от частоты гармоник при различных мощностях нагрузки и коэффициентах мощ-

ности показали, что большее влияние на изменение гармонического состава напряжения на выходе оказывает изменение мощности нагрузки по величине, а не по соотношению ее активной и реактивной составляющих.

Расчет суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения  $K_U$  в конце исследуемой линии по данным анализатора спектра модели SimInTech показал, что этот коэффициент практически не зависит от изменения мощности нагрузки и коэффициента мощности, а также не превышает нормируемое значение. Начиная с десятого километра исследуемой линии коэффициент  $K_U$  превышает допустимые значения, а на расстоянии 50 км (в конце линии) превышает нормируемое значение в 1,6 раза.

Нормативное значение коэффициента нечетных гармонических составляющих напряжения, не кратных трем,  $K_{U(23)}$  составляет 1 %. По результатам моделирования установлено, что в конце линии этот коэффициент в 3,45 раза превышает допустимое значение, а в начале линии существенно меньше нормативной величины.

Разработанные модели позволяют оценить напряжение гармоник высокой частоты у потребителей, получающих питание от железнодорожных тяговых подстанций. Целью дальнейших исследований будет определение необходимости применения фильтров для потребителей, критичных к уровню высших гармоник в сети.

## Литература

1. High-Order Harmonic Resonances in Traction Power Supplies: A Review Based on Railway Operational Data, Measurements, and Experience / K. Song, W. Mingli, S. Yang [et al.] // IEEE Trans Power Electron. 2020. 35: 2501–18. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2019.2928636>.
2. Сыченко В. Г., Босый Д. А. Качество использования электроэнергии в системах электрической тяги // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2015. № 4 (48). С. 143–149. ISSN 1813-9108.
3. Кучумов В. А., Ермоленко Д. В. Показатели качества электроэнергии на токоприемнике и взаимодействие ЭПС с системой тягового электроснабжения переменного тока // Вестник ВНИИЖТ. 1997. № 2. С. 11–16. ISSN 2223-9731.
4. Минина А. А., Пантелеев В. И., Платонова Е. В. Обеспечение качества электроэнергии в системах тягового электроснабжения переменного тока // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. 2012. Т. 5. № 3. С. 319–326. ISSN 1999-494X.
5. Закарюкин В. П., Крюков А. В., Черепанов А. В. Моделирование резонансных процессов на высших гармониках в тяговых сетях переменного тока // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2016. № 3. С. 214–221. ISSN 1813-9108.
6. Закарюкин В. П., Крюков А. В. Качество электроэнергии в линиях ДПР // Наука и техника транспорта. 2008. № 3. С. 60–64. ISSN 2074-9325.
7. Булатов Ю. Н., Крюков А. В., Арсентьев Г. О. Применение энергоустройства для повышения качества электроэнергии и ограничения токов короткого замыкания в системе электроснабже-

## References

1. Song K., Mingli W., Yang S. [et al.]. High-Order Harmonic Resonances in Traction Power Supplies: A Review Based on Railway Operational Data, Measurements, and Experience. IEEE Trans Power Electron. 2020. 35: 2501–18. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2019.2928636>.
2. Sichenko V. G., Bosiy D. A. The quality of using the electric power in the electric traction systems [Kachestvo ispol'zovaniya elektroenergii v sistemakh elektricheskoy tyagi]. Modern technologies. System analysis. Modeling. 2015. No. 4 (48). Pp. 143–149. ISSN 1813-9108.
3. Kuchumov V. A., Ermolenko D. V. Indicators of energy quality on a current collector and interaction of electrical motive power with alternating current traction power supply system [Pokazateli kachestva elektroenergii na tokopriemnike i vzaimodeystvie EPS s sistemoy tyagovogo elektrosnabzheniya peremennogo toka]. VNIIZhT Scientific Journal. 1997. No. 2. Pp. 11–16. ISSN 2223-9731.
4. Minina A. A., Panteleev V. I., Platonova E. V. Ensuring quality of the electric power in systems of traction power supply of the alternating current [Obespechenie kachestva elektroenergii v sistemakh tyagovogo elektrosnabzheniya peremennogo toka]. Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. 2012. Vol. 5. No. 3. Pp. 319–326. ISSN 1999-494X.
5. Zakaryukin V. P., Kryukov A. V., Cherepanov A. V. Modelling of highest harmonics resonant processes in alternating current traction nets [Modelirovanie rezonansnykh protsessov na vysshikh harmonikakh v tyagovykh setyakh peremennogo toka]. Modern technologies. System analysis. Modeling. 2016. No. 3. Pp. 214–221. ISSN 1813-9108.
6. Zakaryukin V. P., Kryukov A. V. Power quality in lines TWR [Kachestvo elektroenergii v liniyakh DPR]. Science and technology in transport. 2008. No. 3. Pp. 60–64. ISSN 2074-9325.
7. Bulatov Yu. N., Kryukov A. V., Arsenyev G. O. The use of an energy router to improve the quality of electricity and limit short-circuit currents in the power supply system of non-traction consumers [Primenenie energoroutera dlya povysheniya kachestva elektroenergii i ogranicheniya

ния нетяговых потребителей // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. 2018. Т. 1. С. 62–68.

8. Булатов Ю. Н., Крюков А. В., Чан З. Х. Улучшение качества электроэнергии нетяговых потребителей путем применения автоматически управляемых установок распределенной генерации // Системы. Методы. Технологии. 2014. № 4 (24). С. 73–79. ISSN 2077-5415.
9. Макашева С. И., Мамаев А. Р. Аспекты оценки качества электроэнергии в условиях цифровой трансформации железных дорог // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. 2020. № 3 (24). С. 64–68. ISSN 2415-8658.
10. Ковалева Т. В., Пашкова Н. В. Исследование волновых процессов в контактной сети и линиях электропередачи // Известия Транссиба. 2015. № 2 (22). С. 71–79. ISSN 2220-4245.
11. Ковалева Т. В., Комякова О. О., Пашкова Н. В. Резонансные явления в тяговой сети переменного тока // Омский научный вестник. 2020. № 4 (172). С. 32–35. ISSN 1813-8225.
12. Анализ волновых процессов в тяговой сети переменного тока на основе имитационного моделирования / Т. В. Ковалева, А. А. Комяков, О. О. Комякова, Н. В. Пашкова // Транспорт Урала. 2022. № 1 (72). С. 80–85 DOI: 10.20291/1815-9400-2022-1-80-85. ISSN 1815-9400.
13. AC Traction Network Simulation with the Wave Processes in the SimInTech Environment / T. V. Kovaleva, O. O. Komyakova, N. V. Pashkova, A. A. Komyakov // SMART Automatics and Energy. Smart Innovation, Systems and Technologies. 2022. Vol. 272. Pp. 417–426. [https://doi.org/10.1007/978-981-16-8759-4\\_44](https://doi.org/10.1007/978-981-16-8759-4_44).

tokov korotkogo замыкания в системе электроснабжения нетяговых потребителей]. Proceedings of the Bratsk State University. Series: Natural and engineering sciences. 2018. Vol. 1. Pp. 62–68.

8. Bulatov Yu. N., Kryukov A. V., Chan Z. Kh. Quality improvement for the electric power of non-traction power consumers by using automatically controlled installations of distributed generation [Uluchshenie kachestva elektroenergii netyagovykh potrebiteley putem primeneniya avtomaticheskii upravlyaemykh ustanovok raspredelennoy generatsii]. Systems. Methods. Technologies. 2014. No. 4 (24). Pp. 73–79. ISSN 2077-5415.
9. Makasheva S. I., Mamaev A. R. Some aspects of electric power quality rating within railway digital transformation [Aspekty otsenki kachestva elektroenergii v usloviyakh tsifrovoy transformatsii zheleznykh dorog]. Transport of the Asia-Pacific region. 2020. No. 3 (24). Pp. 64–68. ISSN 2415-8658.
10. Kovaleva T. V., Pashkova N. V. The wave processes study in the overhead system and power lines [Issledovanie volnovykh protsessov v kontakt-noy seti i liniyakh elektroperedachi]. Journal of Transsib Railway Studies. 2015. No. 2 (22). Pp. 71–79. ISSN 2220-4245.
11. Kovaleva T. V., Komyakova O. O., Pashkova N. V. Resonance in alternating current traction network [Rezonansnye yavleniya v tyagovoy seti peremennogo toka]. Omsk Scientific Bulletin. 2020. No. 4 (172). Pp. 32–35. ISSN 1813-8225.
12. Kovaleva T. V., Komyakov A. A., Komyakova O. O., Pashkova N. V. Analysis of wave processes in alternating current traction power system on the basis of simulation modeling [Analiz volnovykh protsessov v tyagovoy seti peremennogo toka na osnove imitatsionnogo modelirovaniya]. Transport of the Urals. 2022. No. 1 (72). Pp. 80–85 DOI: 10.20291/1815-9400-2022-1-80-85. ISSN 1815-9400.
13. Kovaleva T. V., Komyakova O. O., Pashkova N. V., Komyakov A. A. AC Traction Network Simulation with the Wave Processes in the SimInTech Environment. SMART Automatics and Energy. Smart Innovation, Systems and Technologies. 2022. Vol. 272. Pp. 417–426. [https://doi.org/10.1007/978-981-16-8759-4\\_44](https://doi.org/10.1007/978-981-16-8759-4_44).

*Объем статьи 0,7 авторских листа*

**Подписка на 2024 год.**

Периодичность — 4 номера в год.

ф. СП-1

✂

**АБОНЕМЕНТ**

на ~~газету~~  
журнал

**46463**

(индекс издания)

**Транспорт Урала**

(наименование издания)

Количество комплектов:

на 2024 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)

Стоимость	подписки	руб. ____ коп.	Количество комплектов:
	переадресовки	руб. ____ коп.	

на 2024 год по месяцам:

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
✕	✕	✕	✕	✕	✕						

**Куда**

(почтовый индекс)

(адрес)

**Кому**

(фамилия, инициалы)

### 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-vypusnikov-urgups>

<b>Извещение</b>	<p><b>Получатель:</b> Ассоциация выпускников УЭМИИТ-УрГУПС <b>КПП:</b> 667001001 <b>ИНН:</b> 6670317893 <b>ОКТМО:</b> 65701000 <b>Р/сч.:</b> 40703810863010000192 <b>в:</b> ПАО КБ «УБРИР» филиал ССБ <b>БИК:</b> 046577795 <b>К/сч.:</b> 30101810900000000795 <b>Код бюджетной классификации (КБК):</b> _____ <b>Платеж:</b> Пожертвование для поддержки научных журналов УрГУПС <b>Плательщик:</b> _____ <b>Адрес плательщика:</b> _____ <b>ИНН плательщика:</b> _____ <b>№ л/сч. плательщика:</b> _____ <b>Сумма:</b> _____ руб. ____ коп.  Подпись: _____ Дата: «___» _____ 2023 г.</p>
<b>Квитанция</b>	<p><b>Получатель:</b> Ассоциация выпускников УЭМИИТ-УрГУПС <b>КПП:</b> 667001001 <b>ИНН:</b> 6670317893 <b>ОКТМО:</b> 65701000 <b>Р/сч.:</b> 40703810863010000192 <b>в:</b> ПАО КБ «УБРИР» филиал ССБ <b>БИК:</b> 046577795 <b>К/сч.:</b> 30101810900000000795 <b>Код бюджетной классификации (КБК):</b> _____ <b>Платеж:</b> Пожертвование для поддержки научных журналов УрГУПС <b>Плательщик:</b> _____ <b>Адрес плательщика:</b> _____ <b>ИНН плательщика:</b> _____ <b>№ л/сч. плательщика:</b> _____ <b>Сумма:</b> _____ руб. ____ коп.  Подпись: _____ Дата: «___» _____ 2023 г.</p>

Научно-технический журнал «Транспорт Урала»

DOI:10.20291/1815-9400

№ 3 (78), 2023 год

Издается с июня 2004 г. Выходит 4 раза в год

Подписной индекс в общероссийском каталоге «Пресса России» — 46463

Издание зарегистрировано в Министерстве Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций 27 мая 2004 г.

Свидетельство о регистрации ПИ № 77-18098

Свидетельство на товарный знак (знак обслуживания) № 577040.

Зарегистрировано в Государственном реестре товарных знаков и знаков обслуживания Российской Федерации 6 июня 2016 г.

Учредитель и издатель:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО УрГУПС)

Адрес учредителя и издателя:

620034, Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66

Адрес редакции:

620034, Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66

Тел. (343) 221-24-90

<http://www.usurt.ru/transporturala>

e-mail: [EPupova@usurt.ru](mailto: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](mailto:EPupova@usurt.ru)

Верстка и дизайн:

Андрей Викторович Трубин

Автор фотографии на обложке:

Наталья Викторовна Ладейщикова

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 30.09.2023

Выход в свет 27.10.2023

Тираж 250 экз. (1-й з-д 1–40)

Формат 60×90/8

Цена 618,51 руб.

Изготовлено в ИБК УрГУПС,

620034, Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66

Заказ № 31

© ФГБОУ ВО «Уральский государственный университет путей сообщения», 2023