

**ПОДХОДЫ К ФОРМИРОВАНИЮ  
И ОЦЕНКЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МАРШРУТНОЙ СЕТИ  
НА ПРИМЕРЕ НОВОГО УРЕНГОЯ**

**АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИЙ, ПАРАМЕТРОВ  
И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ  
ИННОВАЦИОННЫХ ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ**

**КУСОЧНО-ЛИНЕЙНАЯ РЕГРЕССИЯ  
ДЛЯ ОЦЕНКИ ЗОН СКОЛЬЖЕНИЯ**

**МЕТОДИКА РАЗРАБОТКИ СУТОЧНЫХ ПЛАНОВ  
ИНТЕРВАЛОВ ДВИЖЕНИЯ ПАССАЖИРСКИХ  
АВТОТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ  
ПО ГОРОДСКИМ РЕГУЛЯРНЫМ МАРШРУТАМ**

**ВАРИАНТЫ ИНТЕГРИРОВАНИЯ  
МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ ТЕРМИНАЛОВ ЗАЩИТЫ  
И АВТОМАТИКИ В ЦИФРОВУЮ СЕТЬ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ**





**МЕЖДУНАРОДНЫЙ РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ**

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

**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ**

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

**INTERNATIONAL EDITORIAL BOARD**

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

**EDITORIAL BOARD**

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

**ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ТРАНСПОРТА**

*М. Р. Якимов.* Подходы к формированию и оценке эффективности маршрутной сети на примере Нового Уренгоя ..... **3**

**ВАГОНЫ И ВАГОННОЕ ХОЗЯЙСТВО**

*А. В. Смольянинов, В. Ф. Кармацкий, К. М. Колясов.* Анализ конструкций, параметров и перспективы развития инновационных грузовых вагонов ..... **9**

*О. В. Черепов, В. Ф. Лапшин, М. А. Звягина.* Анализ отцепок вагонов для перевозки минеральных удобрений с осевой нагрузкой 25 тс в текущий ремонт ..... **18**

*Е. В. Сорокина, С. Л. Самошкин, О. С. Самошкин, С. Д. Коршунов.* Экспериментальные исследования пассажирских вагонов с упругими межвагонными переходами и оценка прочности с учетом условий эксплуатации ..... **24**

**ПОДВИЖНОЙ СОСТАВ И ТЯГА**

*С. В. Кротов, Д. П. Кононов, А. П. Буйносов.* Кусочно-линейная регрессия для оценки зон скольжения ..... **30**

*М. А. Шрайбер.* Развитие остаточных напряжений в изоляции тяговых электродвигателей при отверждении пропиточного состава ..... **35**

**АВТОМОБИЛЬНЫЙ ТРАНСПОРТ**

*Н. В. Якунина, Н. Н. Якунин, К. А. Паршакова, М. Р. Янучков.* Методика разработки суточных планов интервалов движения пассажирских автотранспортных средств по городским регулярным маршрутам ..... **41**

*А. В. Гриценко, К. В. Глемба, А. В. Старунов, А. С. Меньшенин, С. А. Чокой.* Теоретические исследования изменения коэффициента избытка воздуха и свободного кислорода в отработавших газах автомобиля ..... **48**

*С. В. Витолин, С. А. Кашлев.* Исследование эффективности координированного управления светофорными объектами при различных условиях движения ..... **55**

**ГРУЗОВЫЕ И ПАССАЖИРСКИЕ ПЕРЕВОЗКИ**

*Д. С. Серова, Е. Н. Тимухина, Т. Н. Каликина.* Мероприятия по снижению последствий отставления поездов от движения ..... **61**

**ПУТЬ И ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО**

*Вэньшао Синь, А. Ф. Колос, А. В. Петряев.* Изучение прочностных характеристик оттаивающих грунтов с учетом их снижения при динамическом воздействии ..... **67**

**АВТОМАТИКА, ТЕЛЕМЕХАНИКА И СВЯЗЬ**

*А. С. Хохрин, Р. Р. Юсупов.* Анализ качества функционирования квадратурных приемников с нелинейной обработкой сигналов АЛСН в условиях воздействия флуктуационной помехи ..... **73**

*А. Н. Попов, Д. С. Романенко.* Организация поездной радиосвязи и передачи данных в технологии «виртуальная сцепка» в одном цифровом радиоканале ..... **79**

**ТРАНСПОРТНО-ЛОГИСТИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ**

*Е. Н. Тимухина, К. М. Тимухин.* Критерии эффективности при управлении транспортным предприятием ..... **83**

**ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ**

*А. Н. Штин, Д. А. Марченко, Д. В. Лесников, Н. А. Афанасьева.* Сравнение систем тягового электроснабжения 25 кВ и 2×25 кВ на участке с односторонним питанием без учета индуктивных сопротивлений тяговой сети ..... **90**

*П. С. Пинчуков.* Варианты интегрирования микропроцессорных терминалов защиты и автоматики в цифровую сеть железной дороги ..... **98**

*А. А. Ковалев, А. В. Окунев, А. В. Паранин, М. С. Чепижко.* Оценка напряженно-деформированного состояния железобетонной опоры, подверженной электрической коррозии, при помощи моделирования ..... **105**

*Е. Ю. Пузина.* Повышение надежности электроснабжения постов электрической централизации Восточного полигона ..... **110**

**ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ТЯГА**

*Е. А. Третьяков, И. Н. Денисов, Е. Г. Авдиенко.* Управление электротяговыми нагрузками на основе взаимодействия с системой электроснабжения железных дорог ..... **116**

**GENERAL TRANSPORT PROBLEMS**

*M. R. Yakimov.* Approaches to the formation and evaluation of the effectiveness for the route network on the example of Novy Urengoy ..... **3**

**RAILWAY CARS AND CARRIAGE EQUIPMENT**

*A. V. Smolyaninov, V. F. Karmatskiy, K. M. Kolyasov.* Analysis of designs, parameters and prospects for the development of innovative freight cars ..... **9**

*O. V. Cherepov, V. F. Lapshin, M. A. Zvyagina.* Analysis of uncoupling cars for the transportation of mineral fertilizers with an axle load of 25 ton-force for current repairs ..... **18**

*E. V. Sorokina, S. L. Samoshkin, O. S. Samoshkin, S. D. Korshunov.* Experimental studies of passenger cars with elastic gangways and strength assessment taking into account operating conditions ..... **24**

**ROLLING STOCK AND TRACTION**

*S. V. Krotov, D. P. Kononov, A. P. Buynosov.* Piecewise linear regression for estimating slip zones ..... **30**

*M. A. Shrayber.* The development of residual stresses in the insulation of traction motors during the curing of the impregnation composition ..... **35**

**MOTOR TRANSPORT**

*N. V. Yakunina, N. N. Yakunin, K. A. Parshakova, M. R. Yanuchkov.* Methodology for the development of daily interval plans for passenger vehicles on urban regular routes ..... **41**

*A. V. Gritsenko, K. V. Glemba, A. V. Starunov, A. S. Menshenin, S. A. Chokoy.* Theoretical studies into the changes in the coefficient of excess air and free oxygen in the exhaust gases of the car ..... **48**

*S. V. Vitolin, S. A. Kashlev.* Investigation into the effectiveness of coordinated control of traffic light objects under various traffic conditions ..... **55**

**CARGO AND PASSENGER TRANSPORTATION**

*D. S. Serova, E. N. Timukhina, T. N. Kalikina.* Measures to reduce the consequences of train delays ..... **61**

**RAILWAY CONSTRUCTION AND RAILWAY TRACK**

*Wenshao Xin, A. F. Kolos, A. V. Petryaev.* Study of the strength characteristics of thawing soils, taking into account their decrease under dynamic influence ..... **67**

**AUTOMATION, TELEMECHANICS AND COMMUNICATION**

*A. S. Khokhrin, R. R. Yusupov.* Quality analysis of operating the quadrature receivers with nonlinear processing of CALS signals under the influence of fluctuation interference ..... **73**

*A. N. Popov, D. S. Romanenko.* Organization of train radio communication and data transmission in the virtual coupling technology in one digital radio channel ..... **79**

**TRANSPORT AND LOGISTICS PROCESSES**

*E. N. Timukhina, K. M. Timukhin.* Criteria of efficiency in the management of a transport enterprise ..... **83**

**ELECTRIC SUPPLY**

*A. N. Shtin, D. A. Marchenko, D. V. Lesnikov, N. A. Afanasyeva.* Comparison of 25 kV and 2×25 kV traction power supply systems in a one-way power supply section without taking into account the inductive resistances of the traction network ..... **90**

*P. S. Pinchukov.* Options for integrating microprocessor protection and automation terminals into the digital railway network ..... **98**

*A. A. Kovalev, A. V. Okunev, A. V. Paranin, M. S. Chepizhko.* Assessment of the crisis-deformed state of reinforced concrete supports electrically corroded by means of simulation ..... **105**

*E. Yu. Puzina.* Improving the reliability of the signalling control power supply of the Eastern operating domain ..... **110**

**ELECTRIC TRACTION**

*E. A. Tret'yakov, I. N. Denisov, E. G. Avdienko.* Management of electric traction loads in terms of interaction with the railway power supply system ..... **116**

Научная статья

УДК 656.11

## Подходы к формированию и оценке эффективности маршрутной сети на примере Нового Уренгоя

Михаил Ростиславович Якимов<sup>1</sup><sup>1</sup>Институт транспортного планирования Российской академии транспорта, Москва, Россия

## Approaches to the formation and evaluation of the effectiveness for the route network on the example of Novy Urengoy

Mikhail R. Yakimov<sup>1</sup><sup>1</sup>Institute of Transport Planning of the Russian Academy of Transport, Moscow, Russia

### Аннотация

Актуальность оптимизации маршрутной сети общественного транспорта в Новом Уренгое обусловлена ежегодным увеличением протяженности городских маршрутов (в частности, за счет расширения автобусных маршрутов) и неравномерным распределением пассажиропотоков. В статье определены методы оптимизации системы городского пассажирского транспорта общего пользования под существующий транспортный спрос. На примере разработки маршрутной сети для Нового Уренгоя выполнены анализ топологии трассировок маршрутов и анализ картограммы города. По результатам исследования предложены меры оптимизации маршрутной сети городского транспорта общего пользования. Новизна представленного исследования заключается в использовании разработанных автором алгоритмов и методов оптимизации транспортных систем при проведении проектных и научно-исследовательских работ в городах Российской Федерации — Перми, Екатеринбурге, Самаре, Кургане, Йошкар-Оле и Чите.

**Ключевые слова:** общественный транспорт, маршрутная сеть, транспортный спрос, транспортное обслуживание населения

### Abstract

The relevance of optimizing the route network of public transport in Novy Urengoy is related to the annual increase in the length of urban routes, in particular due to the expansion of bus routes, and the uneven distribution of passenger traffic. The article refers to the methods for optimizing the public urban passenger transport system to meet the existing transport demand. The example of the development of a route network for Novy Urengoy have been used to performed the topology analysis of route tracing and the analysis of the cartogram of the city. Based on the results of the study, measures have been proposed to optimize the route network of public urban transport. The relevance of the present study is related to the use of algorithms and methods developed by the author to optimize transport systems while making research in the largest cities of the Russian Federation — Perm, Ekaterinburg, Samara, Kurgan, Yoshkar-Ola and Chita.

**Keywords:** public transport, route network, transport demand, public transport services

DOI: 10.20291/1815-9400-2024-1-3-8

Каждый город независимо от размеров и численности населения реализует определенные Федеральным законом от 06.10.2003 г. № 131-ФЗ «Об общих принципах организации местного самоуправления в Российской Федерации» задачи по организации обслуживания населения городским пассажирским транспортом общего пользования. В процессе развития и трансформации городов, а также проводимой земельной политики существенно меняются условия функционирования транспортной системы города, модель транспортного спроса, места генерации и потребления пассажирских и транспортных потоков [1–3]. Совершенствование политики, проводимой администрациями городов по обеспечению равных условий для реализации транспортных корреспонденций на транспорте общего пользования, невозможно без своевременной корректировки единой маршрутной сети муниципального образования, без изменения расписания движения и типа подвижного состава. Все эти процессы требуют качественно исследования существующего состояния и режимов работы городской системы пассажирского транспорта общего пользования, основанного на сборе и анализе данных, построении оптимизационных и прогнозных транспортных моделей [4–7].

При формировании модели транспортного обслуживания населения наиболее наукоемкая задача связана с построением новой либо оптимизацией уже действующей маршрутной сети на исследуемой территории. Основными целями оптимизации маршрутной сети городского пассажирского транспорта муниципального образования являются [8–10]:

- 1) сокращение затрат времени пассажиров на передвижение городским пассажирским транспортом;
- 2) снижение загрузки улично-дорожной сети в центральной части города;
- 3) повышение безопасности участников движения;
- 4) обеспечение удобства перехода к новой маршрутной сети;
- 5) ввод в эксплуатацию маршрутов с подвижным составом большой вместимости;
- 6) создание единой организационной структуры управления городским пассажирским транспортом.





Рис. 1. Картограмма интенсивности пассажиропотоков на маршрутной сети Нового Уренгоя\*

Снижение затрат времени на передвижения должно обеспечиваться за счет:

- 1) беспересадочных корреспонденций между крупными микрорайонами плотной жилой застройки;
- 2) беспересадочных корреспонденций между крупными микрорайонами с плотной жилой застройкой и с крупными промышленными зонами;
- 3) увеличения скорости движения и уменьшения затрат времени на остановки, обусловленные снижением нагрузки общественного транспорта на улично-дорожную сеть, сокращением уровня дублирования маршрутной сети.

Для оценки качества функционирования существующей маршрутной сети Нового Уренгоя проведено натурное обследование пассажиропотоков. Всего проанализировано 344 рейса, выполняемых в будние дни (23 единицы подвижного состава), и 312 рейсов, выполняемых в выходные дни (19 единиц подвижного состава). Согласно результатам обследования,

наибольшие пассажиропотоки наблюдаются на улицах, по которым проходят маршруты, следующие из микрорайона Север в центральную часть города.

На рис. 1 представлены интенсивности пассажиропотоков в Новом Уренгее.

На рис. 2 в виде кругов показаны диаграммы пассажирооборота остановок городского пассажирского транспорта общего пользования в Новом Уренгее. Размер круга пропорционален пассажирообороту остановки.

Для анализа территория города разбита на транспортные зоны трех типов (рис. 3):

- зона городского центра (зона 1), для нее характерна максимальная деловая активность;
- промышленные зоны, прилегающие к городскому центру (зоны 2 и 3), в них располагается в основном промышленная и складская застройка;

\*Бордовыми линиями обозначены существующие суточные интенсивности пассажиропотоков: чем толще линия, тем больше наблюдаемая интенсивность пассажиропотока на участке улично-дорожной сети.



Рис. 2. Картограмма пассажирооборота на остановках городского пассажирского транспорта общего пользования в Новом Уренгое

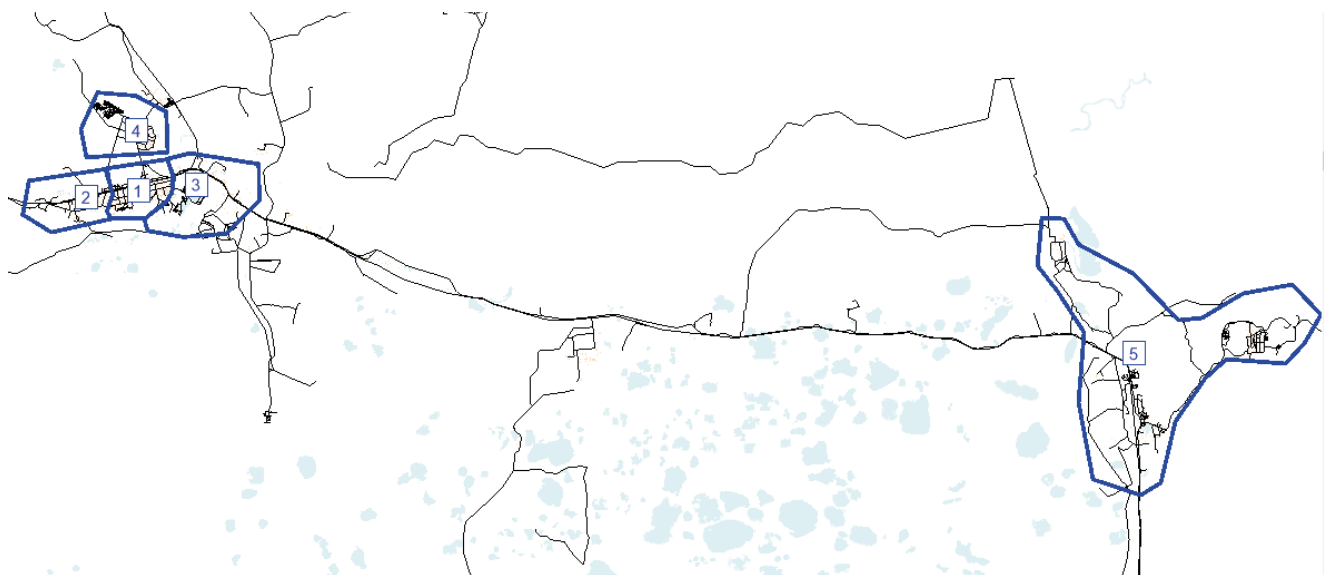


Рис. 3. Границы транспортных зон на территории Нового Уренгоя



зоны автономных районов (зоны 4 и 5), здесь находятся собственные центры деловой и социальной активности.

Для определения объема потенциального спроса на пассажирские перемещения по территории города выполнен расчет пассажиропотока в свободной сети (без учета маршрутов и расписания движения) для всех элементов инфраструктуры общественного транспорта (рис. 4).

В результате расчета основной пассажиропоток перераспределен по продольным и поперечным направлениям. Наибольшее значение пассажиропотоков на участках улично-дорожной сети получено в зоне 1 на элементе транспортной развязки и составляет 5418 пасс./сут.

В ходе анализа транспортного спроса, в том числе распределения источников и целей поездок, выработано несколько предложений по повышению эффективности работы маршрутов регулярных перевозок, действующих на территории Нового Уренгоя. В результате сформировано три варианта новой

маршрутной сети регулярных перевозок. Сначала рассмотрим более подробно первый и второй варианты.

Вариант 1 включает мероприятия по принципиальному изменению маршрутной сети.

Второй вариант предусматривает мероприятия по оптимизации действующей маршрутной сети исходя из анализа существующего транспортного спроса.

В основе разработанных предложений лежит изменение принципа работы подвижного состава на маршрутах. Предполагается, что одна и та же единица подвижного состава будет последовательно выполнять рейсы разных маршрутов. Такой подход дает возможность при сохранении существующего расписания движения сократить количество подвижного состава на маршрутах за счет оптимизации времени отстоя на конечных пунктах.

Например, вариант 1 организации работы подвижного состава на маршрутах 1, 4, 7 позволяет снизить необходимое количество подвижного состава с 24 единиц до 23.

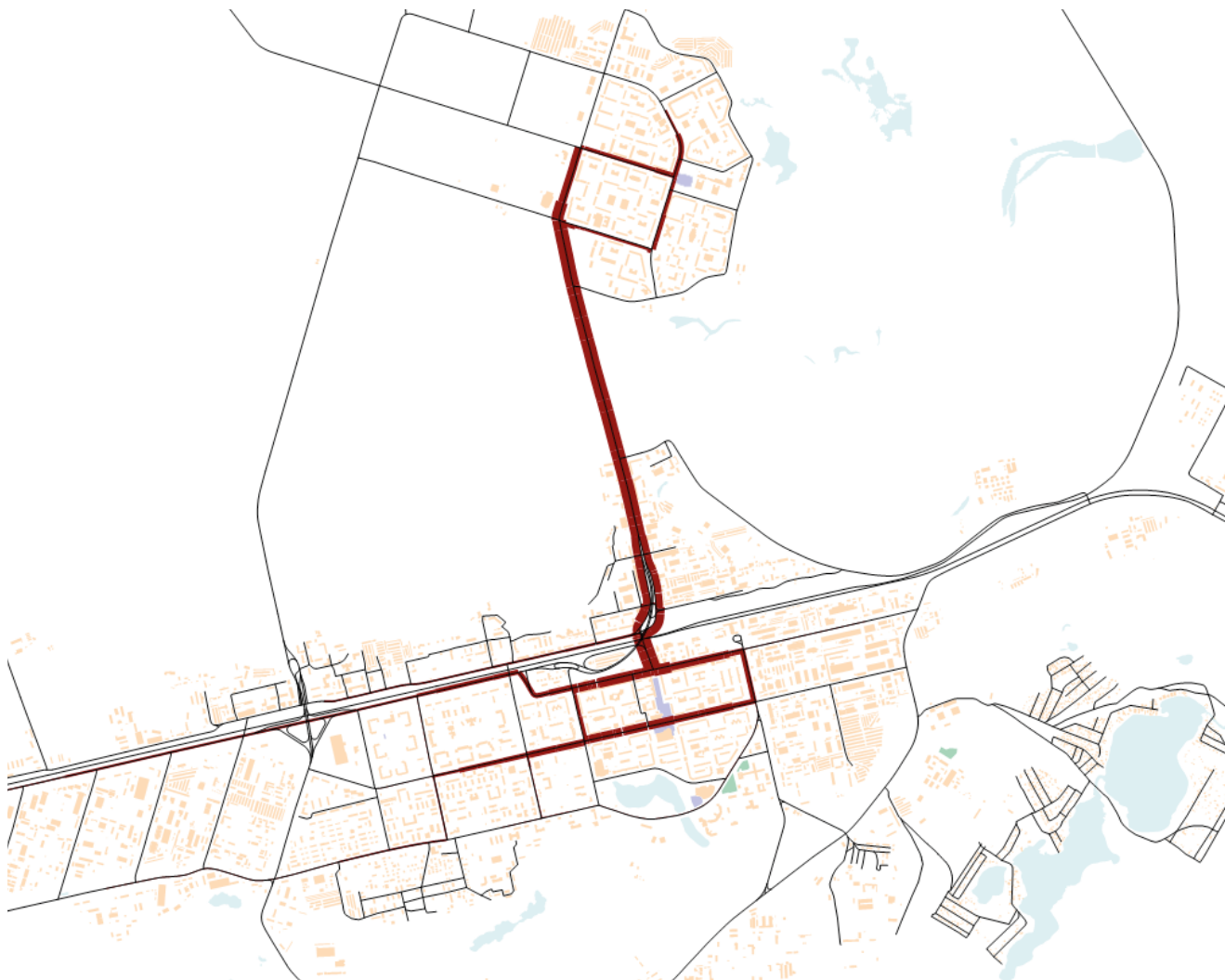


Рис. 4. Картограмма пассажиропотока в свободной сети (без учета маршрутов и расписания движения) для Нового Уренгоя

При этом две единицы подвижного состава выходят на смену после 17.00.

Вариант 2 организации работы подвижного состава на маршрутах 1, 4, 7 также требует 23 единиц подвижного состава вместо 24. Отличие этого варианта от варианта 1 заключается в соотношении односменных и двухсменных графиков.

Так, при реализации варианта 1 организация работы на маршрутах 1, 4, 7 потребует 11 односменных и 12 двухсменных графиков, т.е. 35 водителей. Реализация второго варианта потребует 13 односменных и 10 двухсменных графиков, т.е. 33 водителя. При этом продолжительность максимальной работы водителей без перерыва сокращается с 7,7 ч в существующей ситуации до 6 ч. Количество необходимого подвижного состава для вариантов 1 и 2 составляет 23 единицы, что на 1 единицу меньше, чем в существующей ситуации. Таким образом, при реализации предлагаемых вариантов выполняются все требования к режиму труда и отдыха водителей.

Следующим предложением по развитию системы Нового Уренгоя является обновление подвижного состава, в том числе на экологически чистом топливе (метане). Это позволит снизить экологическую нагрузку на жителей, особенно в центральной части, где проходят практически все маршруты регулярных перевозок. В связи с такими условиями, как рост цен на подвижной состав, ограниченные возможности для повышения тарифов, наблюдаемые значения пассажиропотоков в Новом Уренгое, это мероприятие потребует дополнительного бюджетного финансирования и изменения организационно-финансовой модели перевозок — перехода на брутто- или нетто-контракты.

Вариант 3 новой маршрутной сети регулярных перевозок включает в себя мероприятия варианта 2, а также ряд предложений по расширению маршрутной сети на перспективу с учетом развития территории города.

Для оценки вариантов сравнивали следующие сценарии.

1. Сохранение действующей маршрутной сети с увеличением объемов выпуска подвижного состава до существующих плановых значений, изменение организационно-финансовой модели перевозок (переход на брутто- или нетто-контракты).

2. Реализация предлагаемых изменений маршрутной сети, сокращение выпуска подвижного состава в соответствии с наблюдаемым пассажиропотоком и обновление подвижного состава на экологически чистом топливе (метане) с изменением организационно-финансовой модели перевозок (переход на брутто- или нетто-контракты).

Оценка и сравнение производились для трех разработанных сценариев по двум критериям:

соотношению приведенных затрат к приросту пассажиропотока;

соотношению приведенных затрат к процентному выражению уменьшения выбросов вредных веществ в атмосферу от функционирования транспортной системы при реализации  $i$ -го варианта оптимизации маршрутной сети регулярных перевозок.

Для итоговой оценки сценариев рассчитан интегральный показатель эффективности каждого варианта оптимизации маршрутной сети регулярных перевозок с учетом нормированных значений показателей:

$$I = 0,5 \frac{P_i}{\max(P_i)} + 0,5 \frac{E_i}{\max(E_i)},$$

где  $I$  — интегральный показатель эффективности каждого варианта оптимизации маршрутной сети регулярных перевозок с учетом нормированных значений показателей;  $P_i$  — приведенная стоимость единицы прироста пассажиропотока при реализации  $i$ -го варианта оптимизации маршрутной сети регулярных перевозок, тыс. руб./пасс.;  $E_i$  — приведенная стоимость уменьшения выбросов вредных веществ в атмосферу от транспорта на 1 % при реализации  $i$ -го варианта оптимизации маршрутной сети регулярных перевозок, тыс. руб./%.

Нормированные значения показателей приведены в табл. 1.

Таблица 1

Нормированные значения показателей для оценки сценариев

Нормированный параметр	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3
Нормированное значение $P$	1,000	0,363	0,270
Нормированное значение $E$	0,714	0,746	1,000
$0,5P_i + 0,5E_i$	0,857	0,555	0,635

При сравнении различных вариантов оптимизации маршрутной сети регулярных перевозок на территории Нового Уренгоя наиболее эффективным является тот, для которого значение интегрального показателя минимально. Как видно из табл. 1, это вариант 2, включающий реализацию предложенных мероприятий по оптимизации существующей сети маршрутов регулярных перевозок. Следующий по эффективности — вариант 3, включающий мероприятия сценария 2, а также мероприятия по перспективному развитию маршрутной сети с развитием территории города.

Таким образом, подход, основанный на сборе, анализе и систематизации информации, построении оптимизационных и прогнозных транспортных моделей, позволил не только сформировать несколько сценариев оптимизации действующей маршрутной сети, но и по определенным критериям выбрать самый оптимальный из них. С помощью предложенного в статье интегрального показателя определен наиболее целесообразный вариант развития сети городского пассажирского транспорта общего пользования в Новом Уренгое, который дает возможность оценить единовременные и текущие затраты при повышении объемов перевозок пассажиров, а также при минимизации негативных воздействий транспорта на окружающую среду.



**Сведения об авторе:**

**Михаил Ростиславович Якимов**, доктор технических наук, директор Института транспортного планирования Российской академии транспорта

**Author's information:**

**Mikhail R. Yakimov**, DSc in Engineering, Director of Institute of Transport Planning of the Russian Academy of Transport

**Литература**

1. Yakimov M. R. Optimal Models used to Provide Urban Transport Systems Efficiency and Safety // *Transportation Research Procedia* : 12th International Conference «Organization and Traffic Safety Management in Large Cities», SPbOTSIC-2016. 2017. Vol. 20. Pp. 702–708. DOI: 10.1016/J.TRPRO.2017.01.114.
2. Desaulniers G., Hickman M. Public transit // *Handbooks in Operation Research and Management Science*. 2007. Vol. 14. Pp. 69–120. [https://doi.org/10.1016/S0927-0507\(06\)14002-5](https://doi.org/10.1016/S0927-0507(06)14002-5).
3. Buslaev A. P., Provorov A. V., Yashina M. V. Mathematical Recognition Problems of Particle Flow Characteristics by Video Sequence Images // *Proceedings of the International Conference on Image Processing, Computer Vision, and Pattern Recognition (IPCV, WorldComp)*, 2013.
4. Buslaev A., Yashina M., Volkov M. Algorithmic and Software Aspects of Information System Implementation for Road Maintenance Management // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2015. Vol. 365. Pp. 65–74.
5. Baaj M. H., Mahmassani H. S. Hybrid Route Generation Heuristic Algorithm for the Design of Transit Networks // *Transportation Research. Part C: Emerging Technologies*. 1995. Vol. 3. Pp. 31–50. [http://dx.doi.org/10.1016/0968-090X\(94\)00011-5](http://dx.doi.org/10.1016/0968-090X(94)00011-5).
6. Murray A. T. A coverage model for improving public transit system accessibility and expanding access // *Annals of Operations Research*. 2003. Vol. 123. Pp. 143–156. DOI: 10.1023/A:1026123329433.
7. Guan J. F., Yang H., Wirasinghe S. C. Simultaneous Optimization of Transit Line Configuration and Passenger Line Assignment // *Transportation Research. Part B: Methodological*. 2003. Vol. 40. Issue 10. Pp. 885–902. DOI: 10.1016/J.TRB.2005.12.003.
8. Zhao F., Ubaka I. Transit Network Optimization — Minimizing Transfers and Optimizing Route Directness // *Journal of Public Transportation*. 2004. Vol. 7. No. 1. Pp. 67–82. DOI: 10.5038/2375-0901.7.1.4.
9. Якимов М. Р. Подходы к формированию эффективной маршрутной сети крупных городов // *Вестник УрГУПС*. 2022. № 3 (55). С. 107–113. DOI: 10.20291/2079-0392-2022-3-107-113.
10. Трофименко Ю. В., Якимов М. Р. Транспортное планирование: формирование эффективных транспортных систем крупных городов. Пермь : Агентство РАДАР, 2022. 536 с.

**References**

1. Yakimov M. R. Optimal Models used to Provide Urban Transport Systems Efficiency and Safety. *Transportation Research Procedia: 12th International Conference «Organization and Traffic Safety Management in Large Cities»*, SPbOTSIC-2016. 2017. Vol. 20. Pp. 702–708. DOI: 10.1016/J.TRPRO.2017.01.114.
2. Desaulniers G., Hickman M. Public transit. *Handbooks in Operation Research and Management Science*. 2007. Vol. 14. Pp. 69–120. [https://doi.org/10.1016/S0927-0507\(06\)14002-5](https://doi.org/10.1016/S0927-0507(06)14002-5).
3. Buslaev A. P., Provorov A. V., Yashina M. V. Mathematical Recognition Problems of Particle Flow Characteristics by Video Sequence Images. *Proceedings of the International Conference on Image Processing, Computer Vision, and Pattern Recognition (IPCV, WorldComp)*, 2013.
4. Buslaev A., Yashina M., Volkov M. Algorithmic and Software Aspects of Information System Implementation for Road Maintenance Management. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2015. Vol. 365. Pp. 65–74.
5. Baaj M. H., Mahmassani H. S. Hybrid Route Generation Heuristic Algorithm for the Design of Transit Networks. *Transportation Research. Part C: Emerging Technologies*. 1995. Vol. 3. Pp. 31–50. [http://dx.doi.org/10.1016/0968-090X\(94\)00011-5](http://dx.doi.org/10.1016/0968-090X(94)00011-5).
6. Murray A. T. A coverage model for improving public transit system accessibility and expanding access. *Annals of Operations Research*. 2003. Vol. 123. Pp. 143–156. DOI: 10.1023/A:1026123329433.
7. Guan J. F., Yang H., Wirasinghe S. C. Simultaneous Optimization of Transit Line Configuration and Passenger Line Assignment. *Transportation Research. Part B: Methodological*. 2003. Vol. 40. Issue 10. Pp. 885–902. DOI: 10.1016/J.TRB.2005.12.003.
8. Zhao F., Ubaka I. Transit Network Optimization — Minimizing Transfers and Optimizing Route Directness. *Journal of Public Transportation*. 2004. Vol. 7. No. 1. Pp. 67–82. DOI: 10.5038/2375-0901.7.1.4.
9. Yakimov M. R. Approaches to formation of an effective route network of large cities [Podkhody k formirovaniyu effektivnoy marshrutnoy seti krupnykh gorodov]. *Herald of USURT*. 2022. No. 3 (55). Pp. 107–113. DOI: 10.20291/2079-0392-2022-3-107-113.
10. Trofimenko Yu. V., Yakimov M. R. Transport planning: formation of efficient transport systems of large cities [Transportnoe planirovanie: formirovanie effektivnykh transportnykh sistem krupnykh gorodov]. Perm: RADAR Agency, 2022. 536 p.

Объем статьи 0,7 авторских листа

Научная статья  
УДК 629.463

## Анализ конструкций, параметров и перспективы развития инновационных грузовых вагонов

Александр Васильевич Смольянинов<sup>1</sup>, Виталий Федорович Кармацкий<sup>1</sup>, Константин Михайлович Колясов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Уральский государственный университет путей сообщения, Екатеринбург, Россия

## Analysis of designs, parameters and prospects for the development of innovative freight cars

Alexander V. Smolyaninov<sup>1</sup>, Vitaliy F. Karmatskiy<sup>1</sup>, Konstantin M. Kolyasov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ural State University of Railway Transport, Ekaterinburg, Russia

### Аннотация

Выполнен ретроспективный и перспективный анализ разработки и производства инновационных грузовых вагонов. Рассмотрены подходы к определению критериев инновационности со стороны регулирующих органов, участников перевозочного процесса и представителей научно-профессиональной среды. Подробно исследованы проектные решения компаний, производящих грузовые вагоны седьмого поколения. Приведены технические характеристики и экономическая эффективность инновационных вагонов. Рассмотрены параметры будущих инновационных вагонов и их конструктивные решения. К принципиально новым инновационным конструкциям отнесены шестиосные сочлененные вагоны, скоростные платформы для контейнерных и контрейлерных перевозок, вагоны со съемными кузовами. Даны предложения по выработке единого консолидированного толкования термина «инновационный вагон» с последующим его закреплением в нормативных документах.

**Ключевые слова:** инновационный грузовой вагон, понятия и обсуждения, технические решения, производство вагонов, параметры и конструкции перспективных вагонов, шестиосные сочлененные вагоны, вагоны со съемными кузовами, скоростные платформы, трехосные тележки

### Abstract

A retrospective and prospective analysis of the development and production of innovative freight cars was carried out. We considered approaches determining criteria for innovation on the part of regulatory authorities, all participants in the transportation process and representatives of the scientific and professional environment. The design solutions of companies producing seventh generation freight cars were studied in detail. The technical characteristics and economic efficiency of innovative cars are presented. The parameters of future innovative cars and their design solutions are considered. Fundamentally new innovative designs include six-axle articulated cars, high-speed platforms for container and piggyback transportation and cars with removable bodies. Proposals are given for the development of a single consolidated interpretation of the term «innovative car» with its subsequent consolidation in regulatory documents.

**Keywords:** innovative freight car, concepts and discussions, technical solutions, production of cars, parameters and designs of promising cars, six-axle articulated cars, cars with interchangeable bodies, high-speed platforms, three-axle bogies

DOI: 10.20291/1815-9400-2024-1-9-17

Сегодня совершенно очевидно, что для увеличения провозной способности магистральных железных дорог необходимо не только развивать их инфраструктуру, но и вводить в эксплуатацию современные грузовые вагоны.

Такие вагоны должны быть более производительными и иметь улучшенные технические характеристики за счет внедрения инноваций в их конструкцию и производство. Кроме того, использование современных вагонов должно давать экономический эффект при одновременном снижении стоимости жизненного цикла и повышении надежности функционирования железнодорожного транспорта в целом. Это требование подтверждается практикой перевозочной деятельности: на сети дорог 17 % вагонов инновационного парка перевозят в год на 12 млн т грузов больше, чем типовые вагоны.

По данным Минпромторга России, отечественные вагоностроительные предприятия адаптировались к действующим санкционным ограничениям. Текущая ситуация в отрасли грузового вагоностроения оценивается как достаточно стабильная: здесь налажено ритмичное производство грузовых вагонов, в том числе инновационных.

Сегодня по разным признакам инновационности на «пространстве 1520» грузовые вагоны производятся такими предприятиями, как ПАО «НПК ОВК», АО «НПК «Уралвагонзавод им. Ф. Э. Дзержинского» (УВЗ), АО «Алтайвагон», «РМ Рейл», ООО «КАВАЗ» и АО «Завод металлоконструкций» (ЗМК).

Основные потребители инновационных вагонов — крупнейшие операторы страны, имеющие в своих парках от 8 до 43 тыс. инновационных вагонов. Это Федеральная грузовая компания (АО «ФГК»), Первая Грузовая Компания (АО «ПГК»), ООО «Модум-Транс», АО «Национальная транспортная компания» (НТК), Первая тяжеловесная компания (АО «ПТК»), АО «Уголь-Транс» и др. Примером хорошего взаимодействия производителей и потребителей инновационных полувагонов являются Сибирская Угольная Энергетическая Компания (СУЭК), ключевой партнер управляющей компании НТК, и ОВК в лице Тихвинского вагоностроительного завода (ТВСЗ). В 2013 г. СУЭК стала первой операторской компанией, получившей инновационные полувагоны, которые были поставлены на подконтрольные



эксплуатационные испытания, предусматривающие периодический технический осмотр и контроль износов колесных пар и элементов тележек [1]. Подконтрольные вагоны были выведены в деповской ремонт в начале 2022 г., после того как выполнили пробег в 1 млн км и тем самым подтвердили заявленные производителем параметры. На сегодня компания оперирует более 6 тыс. инновационных полувагонов производства ТВСЗ.

С момента начала производства подвижного состава нового поколения постоянно поднимается вопрос о критериях инновационности, определяющих ключевые характеристики эффективности грузовых вагонов, несмотря на то что конкретные критерии инновационности сформулированы в Постановлении Правительства Российской Федерации от 19.11.2014 г. [2], в приказе Министерства транспорта Российской Федерации от 25.08.2015 г. № 261 [3], в отраслевом стандарте ОАО «РЖД» [4].

Постановление [2] устанавливает следующий перечень технических характеристик инновационного вагона: восприятие осевой нагрузки — от 25 тс и более; пробег от постройки до первого деповского ремонта — не менее 500 тыс. км (либо не менее 4 лет); межремонтный пробег между плановыми видами ремонта — не менее 250 тыс. км (либо не менее 2 лет; категория 1 климатического исполнения УХЛ по ГОСТ 15150-69).

Приказ Минтранса России [3] содержит пять критериев, которые сформулированы такими понятиями, как приоритетное направление развития науки, техники и технологии; научная новизна; внедрение; экономический эффект реализации товаров, работ, услуг; наукоемкость создаваемой продукции. Анализ указанных критериев показывает следующее:

первые два критерия характеризуют научно-техническую новизну, но не имеют количественной оценки. Новые вагоны можно отнести к критической технологии «создание транспортной техники нового поколения»;

третий критерий характеризует внедрение инноваций, что выполняется для всех грузовых вагонов последних лет постройки, находящихся в рабочем парке;

четвертый критерий относится к экономическому эффекту от инноваций. Для собственника или оператора экономический эффект от использования вагонов рассчитывается в сравнении с вагоном-аналогом, и новые вагоны дают определенный эффект. Экономические аспекты инноваций подтверждались получением государственных субсидий на покупку вагонов и снижением тарифа на порожний пробег инновационных вагонов. Введение скидок на порожний пробег позволило менее чем за 10 лет выпустить на сеть РЖД почти 200 тыс. инновационных вагонов (производства ТВСЗ, УВЗ и АО «Алтайвагон»), обновить около 15 % парка и привлечь инвестиции в размере более 600 млрд руб. [5];

пятый критерий предъясняет требование к наукоемкости создаваемой продукции, выполнение которого определяется через результаты интеллектуальной деятельности, подлежащие правовой охране в виде новых технических или технологических решений. Этот критерий выполняется для большинства вагонов. Используемые в вагонах инновации проходят

экспертизу при постановке на производство, новые технические решения защищаются (по крайней мере патентами на полезные модели) [4].

Отраслевой стандарт ОАО «РЖД» [4] устанавливает 14 критериев оценки инновационности вагона, но в их числе нет даже показателя «осевая нагрузка», принятого в начале 2000-х гг. основной характеристикой инновационности вагона и являющегося одним из четырех критериев, установленных Постановлением [2].

Первым грузовым вагоном с признаком будущих инноваций был полувагон модели 12-132-03 на тележках 18-598 производства УВЗ (2004 г.) с осевой нагрузкой 25 тс и заявленным пробегом до первого деповского ремонта 450 тыс. км. Серийное производство осуществляется заводом с 2014 г. Следующим (с 2007 г.) стал полувагон модели 12-9833 производства АО «Тихвинский Сборочный завод «Титран-Экспресс» на тележках 19-9855 (Barber S-2-R). Серийное производство началось на Тихвинском вагоностроительном заводе в 2013 г. На рис. 1 представлен коллаж выпускаемых в России инновационных вагонов.

По состоянию на декабрь 2022 г. парк грузовых вагонов России насчитывал 1278 тыс. ед. Причем доля вагонов с повышенной осевой нагрузкой (25 тс) в этот период составляла 16,2 % парка грузовых вагонов и 27,3 % парка полувагонов [6]. И хотя эти вагоны эксплуатируются уже более 10 лет, но дискуссия вокруг них до сих пор продолжается.

Казалось бы, ответ на вопрос «является ли вагон инновационным?» можно найти и в официальных документах, и в публикациях, появившихся после обсуждений в научно-профессиональной среде [7–11].

Например, в 2017 г. на специализированной конференции российских операторов железнодорожного подвижного состава, грузовладельцев, железнодорожного перевозчика и государственных регуляторов было подчеркнуто, что единственным объективным критерием может считаться только экономическая эффективность вагона для всех участников перевозки грузов [10].

Тот же самый критерий предложил принять Объединенный ученый совет\* ОАО «РЖД», считая, что «грузовой вагон нового поколения — это грузовой вагон, дающий при массовом внедрении значимый экономический эффект для всех участников перевозочного процесса по сравнению с массовым вагоном-аналогом за счет применения технических решений, отвечающих достигнутому к настоящему моменту уровню техники» [10].

Позднее в работе [11] было предложено «утвердить основным критерием инновационности наличие в комплектации вагона колесных пар с кассетными подшипниками под адаптером». Но большинство авторов публикаций признают, что тип тележки, подшипника, материал кузова, массу тары следует считать техническими критериями и признаками инновационности вагона.

По результатам всех обсуждений пока не выработано консолидированное толкование термина «инновационный ва-

\*Совещательный орган в составе Научно-технического совета ОАО «РЖД», создан с целью интенсификации научной деятельности ОАО «РЖД» и формирования научной политики, обеспечивающей оптимальное достижение стратегических целей развития компании.



Рис. 1. Инновационные вагоны, выпускаемые в Российской Федерации

гон». Но уже очевидно, что инновационность вагона должна определяться комплексом критериев, включающих экономическую эффективность для всех пользователей и технические признаки, которые воплощаются в применении новых материалов, технических решений и технологий, позволяющих повысить грузоподъемность, вместимость кузова, а также в улучшении прочих эксплуатационных свойств без ущерба для железнодорожной инфраструктуры.

В рамках своей статьи мы ограничимся анализом технических решений и эксплуатационных признаков инновационности отечественных грузовых вагонов последних лет постройки. По нашему мнению, основными решениями, присущими инновационным вагонам, являются следующие.

1. Применение кассетных подшипников, что позволило повысить грузоподъемность вагонов до 75–77 т (осевая нагрузка 25 и 27 тс), увеличить межремонтный пробег от постройки до первого депоовского ремонта до 800 тыс. км (или до 8 лет), а техническое обслуживание вагонов маршрутной отправки — до 3,5 тыс. км [12]. На отдельные модели грузовых вагонов производства ОВК пробег от постройки до первого депоовского ремонта назначен в 1 млн км (или 8 лет эксплуатации).

2. Конструктивные решения по увеличению объема кузова до 94 м<sup>3</sup> (в последующем до 103 м<sup>3</sup>), в результате будет достигнута проектная грузоподъемность вагонов при перевозке легких кузбасских углей с удельным весом 0,8 т/м<sup>3</sup> [13].

3. Инновационные технические решения, обеспечившие увеличение срока службы вагонов с 22 до 32 и в перспективе до 40 лет, что значительно снизило стоимость жизненного цикла вагона [6].

4. Большое количество конструктивных решений по котлам цистерн и их оборудованию (применение габарита Т<sub>ПР</sub> и полное использование габарита по ширине, создание котлов объемом до 94 м<sup>3</sup>, применение низколегированных сталей, снижение веса паровых рубашек более чем на 30 %, использование новых видов теплоизоляции и др.), что позволило повысить эффективность перевозки грузов по всем показателям [6].

5. Применение в тормозных системах вагонов новых приборов и элементов износа, таких как раздельное потележечное торможение, обеспечивающее более благоприятные условия торможения и обладающее большей эффективностью и надежностью; воздушораспределитель и авторежим с межремонтным сроком не менее 8 лет; безрезьбовое соединение трубопроводов; износостойкие втулки с пробегом до 1 млн км [5].

В последнее время в научно-профессиональной среде на первый план выдвигается идея оценки инновационности грузовых вагонов, ориентированной на учет улучшений технико-экономических и эксплуатационных параметров, показателей надежности и безопасности в сравнении с эксплуатируемыми аналогами типовых (массовых) вагонов [8]. Рассмотрим жизнеспособность этой идеи на примере таких основных моделей инновационных полувагонов, как 12-196-02 и 12-5190 (УВЗ), 12-9853, 12-9937 и 12-9869 (ТВСЗ), 12-2159 и 12-2143 (АО «Алтайвагон»), 12-6882 (ЗМК).

Жизненный цикл инновационного вагона (например, мод. 12-9853) составляет 32 года, в течение которых вагон проходит два деповских и один капитальный ремонт. Первый деповский ремонт проводится через 8 лет, капитальный — после 16 лет эксплуатации.

Практика показала, что улучшенные технико-экономические и эксплуатационные параметры дают определенный экономический эффект. Начиная с 2022 г. инновационные вагоны отцепляются в деповской ремонт после 8 лет эксплуатации. Типовой (массовый) полувагон (например, 12-132-01) имеет срок службы 22 года. В течение первых 16 лет эксплуатации вагон пройдет четыре деповских ремонта, один капитальный и после капитального еще два деповских. При стоимости деповского ремонта 105 тыс. руб. (2022 г.) и капитального 170 тыс. руб. общие затраты достигнут 800 тыс. руб. В то же время затраты на проведение одного деповского ремонта инновационного полувагона составят 165 тыс. руб., т.е. в 4,8 раза меньше.

В целом парк инновационных вагонов насчитывает около 210 тыс. ед.: полувагоны составляют 77 %, хопперы — 10 %, платформы — 9 % и цистерны — 3 %. Однако сегодня можно констатировать, что объемы производства инновационных вагонов снизились. По итогам 2022 г. производство грузовых вагонов с нагрузкой от оси на рельсы 245 кН составило чуть более 10 тыс. ед., или пятую часть всех вагонов. С другой стороны, это в 2,7 раза меньше, чем было произведено в 2021 г., и связано с уходом из России иностранных производителей кассетных подшипников (SKF, «Бренко», Timken) [12]. Основная доля выпуска инновационных вагонов приходится на «НПК ОВК» — 61,8 % (ТВСЗ — 52,5 %, Тихвинспецмаш — 6,1 %, Тихвинхиммаш — 3,2 %) и на УВЗ — 32,3 %. Свой вклад в производство вагонов с нагрузкой 25 тс внесли Ярославский ВРЗ, АО «Алтайвагон» и Рузхиммаш.

По родам подвижного состава с осевой нагрузкой 25 тс вагоны постройки 2022 г. в парке Российской Федерации распределились следующим образом: полувагоны — 65,9 %, хопперы — 14,7 %, платформы — 14,3 %, цистерны — 3,7 %, крытые — 1,4 %.

Новые вагоны с осевой нагрузкой 25 тс были укомплектованы тележками моделей 18-9855 (61,8 %), 18-194-01 (35,7 %) и 18-9800 (2,5 %). В 2023 г. компания «РМ Рейл» сертифицировала собственную разработку тележки 25 тс модели 18-9891 (тип 3, ГОСТ 9246-2013). Продолжается производство грузовых вагонов на тележках моделей 18-9836 и 18-9999 с нагрузкой от оси на рельсы 245 кН (25 тс/ось). Но при этом среди производителей вагонов отмечается устойчивая тенденция изменения подходов к содержанию понятия «инновационность», закрепленного в указанных выше регулирующих докумен-

тах. В ряде вагоностроительных компаний ведутся работы по производству вагонов на тележках с осевой нагрузкой 23,5 тс с улучшенными характеристиками, а именно с увеличенными межремонтными пробегами: первый деповский ремонт после постройки от 210 (или 3 года эксплуатации) (тележка 18-100 и ее аналоги) до 500 тыс. км (или 4 года эксплуатации) (тележки 18-578, 18-9771, 18-555, 18-2129). Пробеги после деповского и капитального ремонта — от 160 (или 3 года эксплуатации) до 320 тыс. км (4 года). Тележка модели 18-1277 с осевой нагрузкой 23,5 тс (производство «РМ Рейл») имеет назначенный пробег между капитальным и деповским ремонтом 500 тыс. км (или 6 лет эксплуатации).

Увеличение межремонтных интервалов пробега вагонов достигается за счет применения в конструкциях ходовых частей комплектующих с повышенным ресурсом, таких как буксовый цилиндрический подшипник грузового вагона с назначенным сроком службы 8 лет (или 600 тыс. км пробега) либо сдвоенный подшипник сроком службы 8 лет (или 800 тыс. км пробега), заправленные смазкой «Буксол»; сменные износостойкие элементы — прокладка буксового проема, фрикционная планка гасителя колебаний, элемент в подпятник наддрессорной балки и колпаки скользунув; фрикционные клинья из высокопрочного чугуна или с вкладышем на наклонной плоскости.

Таким образом, ближайшие перспективы грузового вагоностроения будут характеризоваться производством вагонов на тележках со следующими нагрузками от оси на рельсы:

235 кН (23,5 тс) — вагоны с увеличенным межремонтным пробегом и повышенными скоростями;

245 кН (25 тс) — вагоны новых конструкций (сочлененные, многоосные, со сменными кузовами и др.);

263 кН (27 тс) — вагоны на тележках моделей 18-6863 (ОВК), 18-9829 (Рославский ВРЗ) и 18-9889 (Рузхиммаш) [6].

Всесоюзным научно-исследовательским центром транспортных технологий (ВНИЦТТ) Объединенной вагонной компании разработаны, сертифицированы и изготовлены полувагоны следующего, седьмого, поколения на тележках модели 18-6863 с нагрузкой на ось 27 тс. Проведенные эксплуатационные испытания вагонов на участке Качканар — Смычка признаны успешными [5, 14]. Параметры полувагонов производства ОВК и ВРЗ приведены в табл. 1, общий вид полувагона 12-9548 показан на рис. 2.



Рис. 2. Полувагон модели 12-9548

Таблица 1

Параметры полувагонов нового поколения с нагрузкой от оси на рельсы 264,6 кН (27 тс)

Производитель/модель/год	Тележка	Грузоподъемность, тс	Объем кузова, м <sup>3</sup>	Удельный объем, м <sup>3</sup> /тс	Габарит
ОВК/12-9548-01/2016	18-6863	83	92	1,11	1-ВМ
ОВК/12-9548/2017	18-6863	82	108	1,32	Т <sub>ПР</sub>
ОВК/12-9548-02/2018	18-6863А	82	103	1,25	1-ВМ
РВЗ/12-9828/2008	18-9829	83	98	1,18	Т <sub>ПР</sub>

За исключением мод. 12-9828, все представленные в табл. 1 модели вагонов имеют назначенный срок службы 40 лет с первым капитальным ремонтом через 16 лет эксплуатации. Первый их деповской ремонт проводится через 8 лет постройки либо при пробеге 800 тыс. км. За весь срок службы или за меньший период вагон должен обеспечить общий пробег 4 млн км.

К настоящему времени во ВНИЦТТ разработан модельный ряд сочлененных вагонов с нагрузкой от оси на рельсы 245 кН (25 тс): люковый полувагон и полувагон с глухим кузовом; цистерны для перевозки сжиженных газов и светлых нефтепродуктов; хопперы для зерна и минеральных удобрений, а также вагон-платформа.

АО «Алтайвагон» представил шестиосный сочлененный крытый вагон с нагрузкой от оси на рельсы 23,5 тс с раскрывающейся крышей, что позволит перевозить грузы навалом и сыпучие грузы в непакетированном виде, требующие защиты от атмосферных воздействий, и контейнеры. Следует отметить, что первым вагоном такой конструкции стал крытый вагон, созданный конструкторами Уралвагонзавода («...любимым детищем Д. Н. Лоренцо был универсальный вагон — с полноценной, но открывающейся крышей и всем набором боковых и торцевых дверей и люков стандартной гондолы, способный перевозить номенклатуру грузов как крытого вагона, так и гондолы и платформы») [15].

Шестиосный вагон сочлененного типа имеет два кузова, опирающихся на три двухосные тележки через специальное шарнирное устройство, которое позволяет им поворачиваться относительно друг друга вокруг трех осей. Считается, что такая конструкция наиболее эффективна с точки зрения производства, эксплуатации и ремонта, поскольку тележки являются типовыми.

Некоторые из перечисленных моделей прошли сертификацию и серийно производятся: это шестиосные вагоны-цистерны для перевозки сжиженного газа (мод. 15-9541-01) и вагоны-хопперы для перевозки минеральных удобрений (мод. 19-6978-01). Использование вагонов-хопперов позволит увеличить провозную способность сети на 22 %, сократить потребный парк на 38 %, а также снизить стоимость перевозки груза за счет уменьшения провозной платы на вагон [16].

На выставке «ЭКСПО 1520» в августе 2017 г. был представлен вагон-платформа сочлененного типа, предназначенный для перевозки 20-футовых грузовых контейнеров всех видов, а также съемных кузовов, специально разработанных конструкторским бюро «НПК ОВК» для данного вагона [17].

Применение транспортной системы со сменными кузовами позволяет устранить колебания спроса и предложения на

подвижной состав. В данном случае экипажная часть постоянно находится в работе, а кузовная часть (съемное оборудование) меняется в зависимости от спроса на рынке, что дает возможность гибко реагировать на факторы сезонности и изменения потребностей.

К преимуществам системы со сменными кузовами можно отнести: использование специализированных сменных кузовов в зависимости от сезона и потребностей рынка, что позволяет исключить простой вагонов при сезонных перевозках; увеличение грузооборота за счет уменьшения простоя на погрузочно-разгрузочных операциях; применение сменных кузовов с универсальной ходовой частью, обеспечивающее существенное снижение инвестиционных потребностей при перевозке такого же объема сезонных грузов (на ходовую часть, представляющую собой базовую платформу с тележками, тормозным и автосцепным оборудованием, приходится 70 % общей стоимости вагона) [16, 18]. К настоящему времени модельный ряд составляют сменные кузова для зерна, минеральных удобрений, угля и других насыпных грузов, а также для лесоматериалов.

Кузовы устанавливаются именно под те грузы, на которые есть дополнительный спрос. Не востребуемые же кузова складываются отдельно штабелированием, что сокращает потребность в складских площадях и железнодорожных путях для отстоя вагонов [18].

В последние 4–5 лет получили развитие контрейлерные комбинированные железнодорожно-автомобильные перевозки с использованием автопоездов, автоприцепов, полуприцепов, а также съемных автомобильных кузовов на специальных контрейлерных платформах. Этот вид перевозок является составной частью мультимодальных перевозок, которые осуществляются на двух типах платформ: универсальной с пониженным полом для перевозки автобусов (рис. 3) и специализированной (колодцевого типа) для перевозки полуприцепов (рис. 4, табл. 2).

В 2021 г. парк платформ для организации контрейлерных перевозок составлял 171 ед. (в том числе 56 — колодцевого типа), распределенных между тремя владельцами (ФГК, ПФКО «Экспресс» и RusTrail), с увеличением на 300 платформ колодцевого типа [19, 20].

Проектирование и производство платформ данного назначения осуществляется Уралвагонзаводом (мод. 13-5205), ЗМК, г. Энгельс (мод. 13-6701, 13-9938), Рузхиммашем (мод. 13-9961) и Трансмашхолдингом (мод. 13-6987) (см. табл. 2). Все платформы построены в соответствии с габаритом 1-Т, допускающим обращение вагонов по колею 1520 мм.





Рис. 3. Автовоз на платформе модели 13-5205 производства УВЗ (2019 г.)



Рис. 4. Автомобильный полуприцеп на платформе колодецкого типа производства ЗМК, г. Энгельс (модель 13-6701, 2023 г.)

Таблица 2

Параметры платформ для интермодальных перевозок

Модель/год	Тележка	Грузоподъемность платформы/масса тары, тс	База, мм	Длина, мм		Ширина, мм	Высота пола, мм
				по раме (рама)	по осям сцепления		
13-9938/2012	18-100 18-1790	40/27	15300	18300/(18,4)	195000	3200	1100
13-9961/2014	18-9810	55,5/29	15800	20280	21500	–	1100
13-5205/2019	18-100	67,5/28	15230	18280	19500	3226	1133
13-6987/2019	18-9896	69/24,5	–	18280/(18,4)	19500	3282	Колодец
13-6701/2021	18-100	44/32	15220	18280/(18,4)	19500	3230	Колодец

Несмотря на то что в настоящее время регулярные условия для грузовых перевозок со скоростью до 140 км/ч по сети железных дорог России отсутствуют, ведущие вагоностроительные предприятия (АО «Синара — Транспортные Машины», АО «Трансмашхолдинг», «РМ Рейл», ООО «КАВАЗ») разрабатывают проекты шестиосных (две трехосные тележки) скоростных платформ для перевозки крупнотоннажных контейнеров.

Наиболее перспективна представленная на рис. 5 шестиосная 80-футовая фитинговая платформа модели 13-6704 (проект ВНИКТИ, производство АО «Синара — Транспортные Машины»). В конструкции используется трехосная тележка модели 18-6731 с пневматическим тормозом, что позволило реализовать скорость 140 км/ч при нагрузке на оси колесных пар до 200 кН (до 20 тс) и увеличить грузоподъемность платформы до 75 тс (тара — 45 тс). В данном случае трехосная тележка используется не для увеличения грузоподъемности вагона, а для снижения воздействия на путь за счет меньшей по сравнению с типовыми



Рис. 5. Общий вид фитинговой платформы модели 13-6704 и ее тележки

грузовыми тележками нагрузки от оси на рельсы, что обеспечивает требуемую скорость движения. По мнению проектировщиков и производителей, платформа обладает преимуществами в виде увеличенного межремонтного пробега и повышенной плавности хода. В будущем предполагается оснастить платформу электропневматическим тормозом и датчиками контроля, которые позволят следить за техническим состоянием вагона, его местонахождением, состоянием и сохранностью груза [20].

Представляет интерес платформа модели 13-6954 (проект Трансмаша, ВНИКТИ и ВНИИЖТ), предназначенная для перевозки одного контейнера длиной 12–14 м (включая рефрижераторные контейнеры с автономной дизель-генераторной установкой). В конструкции используется тележка с элементами ходовой части и узлов пассажирского вагона, включая двухосную тележку, оборудованную лючковым центральным подвешиванием (модель 18-6960), что позволило ре-

ализовать скорость 160 км/ч (рис. 6). Платформа оснащена электропневматической тормозной системой, грузоподъемность составляет 36 тс, масса тары — 24 тс, длина по осям сцепления автосцепок — не более 15270 мм [21]. В начале разработки проекта платформы (2016 г.) предполагалось, что она будет использоваться в составе скоростных контейнерных поездов в транзитном сообщении КНР — страны Европейского союза по Транссибирской магистрали.

В современных условиях новый подвижной состав будет задействован в основных евроазиатских транспортных коридорах, включая международный транспортный коридор «Север — Юг» (рис. 7).

Принципиальная особенность проектов грузовых вагонов Уральского конструкторского бюро вагоностроения (УКБВ) — шестиосные вагоны на двух трехосных тележках с нагрузкой от оси на рельсы 245 кН (25 тс). Заявленными параметрами трехосной тележки мод. 18-5195 являются: назначенный срок службы 32 года и 16 лет до первого капитального ремонта, пробег от постройки (и от капитального ремонта) до первого деповского ремонта по 500 тыс. км (или 8 лет), пробег между деповскими ремонтами 350 тыс. км (или 4 года).

На базе данной трехосной тележки разработан модельный ряд шестиосных вагонов, представленный вагоном-цистерной для нефтепродуктов (грузоподъемность 108 тс), вагоном-платформой для контейнеров (118 тс), крытым вагоном (108 тс) и универсальным полувагоном (115 тс). Технико-экономические преимущества этих моделей по сравнению с типовыми аналогами — увеличение грузоподъемности от 32 до 40 %, снижение потребного парка от 31 до 42 %. Кроме того, шестиосные вагоны дают экономию на тарифах перевозки. Среди проектов УКБВ находится и восьмиосный вагон (две четырехосные тележки) грузоподъемностью 152 т.

Нагрузку от оси на рельсы в 27 тс (264,6 кН) предполагается реализовать в четырехосных полувагонах — универсальном и глуходонном грузоподъемностью 82 и 84 тс соответственно. Также в УКБВ разрабатываются четырехосные полувагоны — универсальный (94 тс) и глуходонный (96 тс) с осевой нагрузкой 30 тс (306,1 кН).



Рис. 6. Скоростная платформа модели 13-6954



Рис. 7. Международный транспортный коридор «Север — Юг»

Как видно из материалов, представленных в статье, на сегодняшний день в вагоностроительной отрасли:

разработан модельный ряд сочлененных вагонов с нагрузкой 245 кН (25 тс) на ось. Использование таких вагонов позволит увеличить провозную способность сети на 22 %, сократить потребный парк на 38 %, снизить стоимость перевозки груза за счет уменьшения провозной платы на вагон;

создан модельный ряд сменных кузовов (хopper, глуходонный полувагон, лесовоз, цистерна), позволяющий уйти от значительных сезонных колебаний спроса и предложения на подвижной состав.

В данном случае экипажная часть постоянно находится в работе, а кузовная часть (съемное оборудование) меняется в зависимости от спроса на рынке, что обеспечивает гибкое реагирование на факторы сезонности и изменения потребностей;

разработаны скоростные (140 км/ч) четырехосные платформы для интермодальных перевозок и шестиосные (две трехосные тележки) 80-футовые фитинговые платформы, а также платформа для перевозки одного контейнера длиной 12–14 м (включая рефрижераторные контейнеры с автономной дизель-генераторной установкой) в составе скоростных (160 км/ч) контейнерных поездов;

создан модельный ряд (платформа, цистерна, крытый вагон, полувагоны) шестиосных (две трехосные тележки) и восьмиосных вагонов;

разработаны, сертифицированы и нуждаются в комплексе испытаний вагоны с нагрузкой 264,6 кН (27 тс) на ось.

Что касается разработки комплексных критериев и показателей инновационности грузовых вагонов нового поколения, мы считаем, что необходимо предъявлять единые требования ко всем типам и конструкциям создаваемых моделей. Инновационные вагоны должны соответствовать таким основным критериям, как:

высокая эффективность в эксплуатации;

меньшая стоимость жизненного цикла по сравнению с вагонами, выпускаемыми в настоящее время;

пониженное динамическое воздействие на железнодорожный путь (так называемый вагон, дружественный к пути)

#### Сведения об авторах:

**Александр Васильевич Смольянинов**, доктор технических наук, профессор кафедры «Вагоны» Уральского государственного университета путей сообщения

**Виталий Федорович Кармацкий**, доцент кафедры «Вагоны» Уральского государственного университета путей сообщения

**Константин Михайлович Колясов**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Вагоны» Уральского государственного университета путей сообщения

и, как следствие, меньшее шумовое воздействие на окружающую среду.

Основными технико-эксплуатационными параметрами инновационных вагонов должны быть [7]:

осевая нагрузка от 25 тс и выше;

межремонтный пробег от постройки до первого депоовского ремонта до 1,2 млн км;

расстояние следования в составе поезда от места погрузки до места выгрузки без технического обслуживания не менее 10 тыс. км;

конструкционная скорость платформ для контейнерных и контрейлерных перевозок до 160 км/ч.

Перечисленные параметры должны быть закреплены в нормативных документах, регламентирующих проектирование, производство, ремонт грузовых вагонов и эксплуатационную деятельность железнодорожного транспорта.

#### Authors information:

**Alexander V. Smolyaninov**, DSc in Engineering, Professor of Railway Cars Department, Ural State University of Railway Transport

**Vitaliy F. Karmatskiy**, Associate Professor of Railway Cars Department, Ural State University of Railway Transport

**Konstantin M. Kolyasov**, Associate Professor, Associate Professor of Railway Cars Department, Ural State University of Railway Transport

## Литература

1. Лосев Д. Н. Опыт эксплуатации и дальнейшие пути развития технического обслуживания инновационных вагонов на тележках Barber S-2-R // Транспорт Российской Федерации. 2014. № 3 (52). С. 24–28. ISSN 1994-831X.
2. Постановление Правительства Российской Федерации от 19.11.2014 г. № 1223. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/> (дата обращения: 06.12.2022).
3. Об утверждении критериев отнесения товаров, работ, услуг к инновационной продукции и (или) высокотехнологичной продукции для целей формирования плана закупки такой продукции : приказ Минтранса России от 25.08.2015 г. № 261. URL: <https://rulings.ru/acts/Prikaz-Mintransa-Rossii-ot-25.08.2015-N-261/> (дата обращения: 06.12.2022).
4. СТО РЖД 10.002-2015. Вагоны грузовые инновационные. Правила оценки экономической эффективности : утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 26.04.2016 г. № 768р. URL: [http://www.rzd-expo.ru/innovation/stock/freight\\_rolling\\_stock](http://www.rzd-expo.ru/innovation/stock/freight_rolling_stock) (дата обращения: 09.05.2022).
5. Конструкция тележки с осевой нагрузкой 27 тс и интегрированной тормозной системой / А. М. Орлова, В. С. Бабанин, А. Л. Ковязин, И. И. Турутин // Железнодорожный транспорт. 2018. № 7. С. 61–66. ISSN 0044-4448.
6. Агафонов М. С. Новые грузовые вагоны в парке России // Вагоны и вагонное хозяйство. 2023. № 1 (73). С. 16–18. ISSN 1817-6089.
7. Параметры инновационных вагонов и некоторые проблемы их реализации / В. Н. Филиппов, А. В. Смольянинов, И. В. Коз-

## References

1. Losev D. N. Operational experience and further development of maintenance of innovative wagons based on Barber S-2-R bogies [Opyt ekspluatatsii i dal'neyshie puti razvitiya tekhnicheskogo obsluzhivaniya innovatsionnykh vagonov na telezhkakh Barber S-2-R]. *Transport of the Russian Federation*. 2014. No. 3 (52). Pp. 24–28. ISSN 1994-831X.
2. The Order of the Government of the Russian Federation dated 19.11.2014 No. 1223 [Postanovlenie Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii ot 19.11.2014 g. No. 1223]. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/> (access date: 06.12.2022).
3. About approval of criteria for classifying goods, works, services as innovative products and (or) high-tech products for the purpose of forming a procurement plan for such products [Ob utverzhdenii kriteriev otneseniya tovarov, rabot, uslug k innovatsionnoy produktcii i (ili) vysokotekhnologichnoy produktcii dlya tseley formirovaniya plana zakupki takoy produktcii]: the Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation dated 25.08.2015 No. 261. URL: <https://rulings.ru/acts/Prikaz-Mintransa-Rossii-ot-25.08.2015-N-261/> (access date: 06.12.2022).
4. STO RZD 10.002-2015. Innovative freight cars. Rules for assessing economic efficiency [STO RZhd 10.002-2015. Vagony gruzovye innovatsionnye. Pravila otsenki ekonomicheskoy effektivnosti]: approved by the Order of the JSC «RZD» dated 26.04.2016 No. 768r. URL: [http://www.rzd-expo.ru/innovation/stock/freight\\_rolling\\_stock](http://www.rzd-expo.ru/innovation/stock/freight_rolling_stock) (access date: 09.05.2022).
5. Orlova A. M., Babanin V. S., Kovyazin A. L., Turutin I. I. The design of the bogie with an axle load of 27 ton-force and integrated brake system [Konstruktsiya telezhki s osevoy nagruzkoj 27 ts i integrirovannoy tormoznoy sistemoy]. *Railway Transport*. 2018. No. 7. Pp. 61–66. ISSN 0044-4448.
6. Agafonov M. S. New freight cars in the Russian fleet [Novye gruzovye vagony v parke Rossii]. *Railway Cars and Carriage Equipment*. 2023. No. 1 (73). Pp. 16–18. ISSN 1817-6089.

- лов, Я. Д. Подлесников // Транспорт Урала. 2017. № 1 (52). С. 25–31. DOI: 10.20291/1815-9400-2017-1-25-31.
8. Гапанович В. А., Калетин С. В. Перспективы развития инновационного вагоностроения // Железнодорожный транспорт. 2020. № 7. С. 58–62. ISSN 0044-4448.
  9. Титова Т. С., Бороненко Ю. П., Покровская О. Д. Методика определения инновационности новых грузовых вагонов // Транспорт Российской Федерации. 2022. № 3 (100). С. 23–28. ISSN 1994-831X.
  10. Инновационный вагон: мифы и реальность. URL: [https://www.uniwagon.com/multimedia/media\\_about\\_us/innovacionnyj-vagon-mify-i-realnost/](https://www.uniwagon.com/multimedia/media_about_us/innovacionnyj-vagon-mify-i-realnost/) (дата обращения: 12.12.2022).
  11. Калетин С. В. PRO инновационный вагон. URL: <http://railwayexpo.ru/ru/component/content/article?id=179:materialy-konferentsii&Itemid=141> (дата обращения: 12.12.2022).
  12. Влияние экономических санкций на производство и ремонт инновационных вагонов / А. В. Смольянинов, В. Ф. Лапшин, К. М. Колясов, О. В. Черепов // Вестник УрГУПС. 2023. № 2 (58). С. 56–66. DOI: 10.20291/2079-0392-2023-2-56-66.
  13. Смольянинов А. В., Колясов К. М. Анализ параметров и конструктивных решений кузовов инновационных вагонов // Транспорт Урала. 2020. № 4 (67). С. 34–39. DOI: 10.20291/1815-9400-2020-4-34-39.
  14. О ходе подконтрольной эксплуатации инфраструктуры участка Качканар — Смычка под полувагонами с осевой нагрузкой 27 тс / А. М. Соколов, Е. Ю. Семенов, С. В. Дмитриев, Е. А. Монастырев // Вагоны и вагонное хозяйство. 2017. № 4 (52). С. 38–41. ISSN 1817-6089.
  15. Устьянцев С. В., Першхайло Н. В. Эра Лоренцо. Опыт успешной адаптации иностранных конструкций и технологий транспортного машиностроения. Нижний Тагил : УВЗ, 2012. 196 с.
  16. Сочлененный вагон как способ повысить эффективность перевозок. URL: [https://www.uniwagon.com/multimedia/media\\_about\\_us/sochlenennyj-vagon-kak-sposob-povysit-effektivnost-perevozok/](https://www.uniwagon.com/multimedia/media_about_us/sochlenennyj-vagon-kak-sposob-povysit-effektivnost-perevozok/) (дата обращения: 10.10.2023).
  17. Применение сменных кузовов в специализированных вагонах / С. А. Федоров, И. А. Хиллов, А. С. Кононенко [и др.] // Железнодорожный транспорт. 2022. № 7. С. 26–35. ISSN 0044-4448.
  18. Достойная смена. Время ОБК. 2021. № 1 (16), апрель. С. 9–11.
  19. Презентация «Развитие контейнерных перевозок». URL: <https://www.asmap.ru > upload > iblock > 05Пр./> (дата обращения: 10.10.2023).
  20. К борьбе проектов скоростных фитинговых платформ официально присоединилась «РМ Рейл». URL: <https://rollingstockworld.ru/gruzovye-vagony/k-borbe-proektov-skorostnyh-fitingovyh-platform-ocialno-prisoedinilas-rm-rejl/> (дата обращения: 10.10.2023).
  21. Первые в России вагоны-платформы для перевозки контейнеров со скоростью до 160 км/ч. URL: <https://zdmira.com/news/pervye-v-rossii-vagony-platformy-dlya-perevozki-konteynerov-so-skorostyu-do-160-km-ch/> (дата обращения: 10.10.2023).
  7. Filippov V. N., Smolyaninov A. V., Kozlov I. V., Podlesnikov Ya. D. The options of innovation railway cars and some problems of their realization [Parametry innovatsionnykh vagonov i nekotorye problemy ikh realizatsii]. *Transport of the Urals*. 2017. No. 1 (52). Pp. 25–31. DOI: 10.20291/1815-9400-2017-1-25-31.
  8. Gapanovich V. A., Kaletin S. V. Prospects for the development of innovative carriage building [Perspektivy razvitiya innovatsionnogo vagonostroeniya]. *Railway Transport*. 2020. No. 7. Pp. 58–62. ISSN 0044-4448.
  9. Titova T. S., Boronenko Yu. P., Pokrovskaya O. D. Assessment of new freight wagons based on metrics of innovation [Metodika opredeleniya innovatsionnosti novykh gruzovykh vagonov]. *Transport of the Russian Federation*. 2022. No. 3 (100). Pp. 23–28. ISSN 1994-831X.
  10. Innovative wagon: myths and reality [Innovatsionnyy vagon: mify i real'nost']. URL: [https://www.uniwagon.com/multimedia/media\\_about\\_us/innovacionnyj-vagon-mify-i-realnost/](https://www.uniwagon.com/multimedia/media_about_us/innovacionnyj-vagon-mify-i-realnost/) (access date: 12.12.2022).
  11. Kaletin S. V. PRO innovative railcar [PRO innovatsionnyy vagon]. URL: <http://railwayexpo.ru/ru/component/content/article?id=179:materialy-konferentsii&Itemid=141> (access date: 12.12.2022).
  12. Smolyaninov A. V., Lapshin V. F., Kolyasov K. M., Cherepov O. V. The impact of economic sanctions on the production and repair of innovative railcars [Vliyaniye ekonomicheskikh sanktsiy na proizvodstvo i remont innovatsionnykh vagonov]. *Herald of USURT*. 2023. No. 2 (58). Pp. 56–66. DOI: 10.20291/2079-0392-2023-2-56-66.
  13. Smolyaninov A. V., Kolyasov K. M. Analysis of parameters and design solutions of bodies for innovative cars [Analiz parametrov i konstruktivnykh resheniy kuzovov innovatsionnykh vagonov]. *Transport of the Urals*. 2020. No. 4 (67). Pp. 34–39. DOI: 10.20291/1815-9400-2020-4-34-39.
  14. Sokolov A. M., Semenov E. Yu., Dmitriev S. V., Monastirev E. A. About the progress of controlled operation of the infrastructure of the Kachkanar — Smychka section under gondola cars with an axle load of 27 ton-force [O khode podkontrol'noy ekspluatatsii infrastruktury uchastka Kachkanar — Smychka pod poluvagonami s osevoy nagruzkoy 27 ts]. *Railway Cars and Carriage Equipment*. 2017. No. 4 (52). Pp. 38–41. ISSN 1817-6089.
  15. Ust'yantsev S. V., Pershkhaylo N. V. Era of Lorenzo. Experience of successful adaptation of foreign designs and technologies in transport engineering [Era Lorentso. Opyt uspehnoy adaptatsii inostrannykh konstruktivnykh i tekhnologiy transportnogo mashinostroeniya]. *Nizhny Tagil*, 2012. 196 p.
  16. Articulated car as a way to improve transportation efficiency [Sochlenennyy vagon kak sposob povysit' effektivnost' perevozok]. URL: [https://www.uniwagon.com/multimedia/media\\_about\\_us/sochlenennyj-vagon-kak-sposob-povysit-effektivnost-perevozok/](https://www.uniwagon.com/multimedia/media_about_us/sochlenennyj-vagon-kak-sposob-povysit-effektivnost-perevozok/) (access date: 10.10.2023).
  17. Fedorov S. A., Khilov I. A., Kononenko A. S. [et al.]. The use of interchangeable bodies in specialized cars [Primenenie smennykh kuzovov v spetsializirovannykh vagonakh]. *Railway Transport*. 2022. No. 7. Pp. 26–35. ISSN 0044-4448.
  18. Worthy change [Dostoy'naya smena]. *Time of UWC*. 2021. No. 1 (16), April. Pp. 9–11.
  19. Presentation «Development of piggyback transportation» [Prezentatsiya «Razvitie konteylernykh perevozok»]. URL: <https://www.asmap.ru , upload , iblock , 05Пр./> (access date: 10.10.2023).
  20. «RM Rail» officially joined the fight for high-speed fitting platform projects [K bor'be proektov skorostnykh fitingovykh platform ofitsial'no prisoedinilas' «RM Rail»]. URL: <https://rollingstockworld.ru/gruzovye-vagony/k-borbe-proektov-skorostnyh-fitingovyh-platform-ocialno-prisoedinilas-rm-rejl/> (access date: 10.10.2023).
  21. The first flat cars in Russia for transporting containers at speeds of up to 160 km/h [Pervye v Rossii vagonny-platformy dlya perevozki konteynerov so skorost'yu do 160 km/ch]. URL: <https://zdmira.com/news/pervye-v-rossii-vagony-platformy-dlya-perevozki-konteynerov-so-skorostyu-do-160-km-ch/> (access date: 10.10.2023).



Научная статья  
УДК 629.4.014.7

## Анализ отцепок вагонов для перевозки минеральных удобрений с осевой нагрузкой 25 тс в текущий ремонт

Олег Вячеславович Черепов<sup>1</sup>, Василий Федорович Лапшин<sup>1</sup>, Марина Александровна Звягина<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Уральский государственный университет путей сообщения, Екатеринбург, Россия

## Analysis of uncoupling cars for the transportation of mineral fertilizers with an axle load of 25 ton-force for current repairs

Oleg V. Cherepov<sup>1</sup>, Vasily F. Lapshin<sup>1</sup>, Marina A. Zvyagina<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ural State University of Railway Transport, Ekaterinburg, Russia

### Аннотация

Представлены результаты второго этапа анализа отцепок в текущий ремонт вагонов с осевой нагрузкой 25 тс (инновационных), применяемых для перевозки минеральных удобрений, в сравнении с вагонами-минераловозами на тележках с нагрузкой 23,5 т/ось.

Отмечено, что критерии новизны ряда технических характеристик (увеличенная нагрузка на ось и значительные межремонтные пробеги), влияющие на потребительские свойства вагонов, должны быть согласованы с возможностью поддерживать подвижной состав в работоспособном состоянии, т.е. с сокращением количества отцепок и времени нахождения в текущем ремонте, минимизацией затрат, связанных с проведением технического обслуживания и ремонта.

При оценке количества и причин неисправностей за основу приняты отцепки вагонов в текущие отцепочные ремонты за период эксплуатации. Показано, что значительная доля отцепок вагонов с «улучшенными характеристиками» в текущий ремонт ТР-2 производится по неисправностям колесных пар (тонкий гребень, выщербина и др.), что на 24 % выше, чем у типовых вагонов. По сравнению с предыдущим этапом работы отмечено, что количество претензий к качеству изготовления вагонов-минераловозов с осевой нагрузкой 25 тс выросло на 11 %.

**Ключевые слова:** вагон-минераловоз, критерий инновационности, нагрузка на ось, бруска с кассетным подшипником, отцепка, колесная пара, повреждаемость, наработка на отказ, эффект в эксплуатации

### Abstract

The results of the second part presents the analysis of uncouplings for current repair of wagons with an axle load of 25 tf (innovative) used for the transportation of mineral fertilizers in comparison with mineral hoppers on bogies with an axle load of 23.5 tf.

It is noted that the novelty criteria for a number of technical characteristics (increased axle load and significant overhaul runs) which affect the consumer properties of wagons and must be consistent with the ability to maintain the rolling stock in working condition, i.e. with a reduction in the number of uncouplings and time spent in current repairs minimizing costs on maintenance and repair.

While assessing the number and causes of malfunctions in wagons uncoupling during were taken as a basis during current uncoupling repairs within the operation time. It is shown that a significant proportion of uncouplings of cars with «improved characteristics» for the current repair of TR-2 are made due to faults in the wheelsets (thin ridge, gouge, etc.), which is 24 % higher than for standard wagons. Compared with the previous stage of work it was noted that the number of complaints about the quality of manufacture of mineral hoppers with an axle load of 25 tf increased by 11 %.

**Keywords:** mineral hopper, innovation criterion, axle load, axle box with cassette bearing, uncoupling, wheelset, damageability, mean time between failures, effect in operation

DOI: 10.20291/1815-9400-2024-1-18-23

### ВВЕДЕНИЕ

Оценка эффективности подвижного состава нового поколения сводится к определению значений критериев, влияющих на ключевые характеристики производительности и эксплуатационные качества грузовых вагонов. В данном случае значения критериев инновационности выступают как фактор успешной эксплуатации, точного технико-экономического анализа необходимости использования подвижного состава [1] и формируют заинтересованность операторского сообщества в подвижном составе нового поколения.

К 2021 г. среди участников перевозочного процесса и производителей инновационных вагонов сложились «весьма неоднозначные, а порой и противоречивые мнения об эффективности инновационных вагонов» [2]. Точки зрения наиболее весомых игроков на этом рынке приведены в табл. 1.

Таблица 1

Оценка эффективности инновационных вагонов (полувагонов)

Оператор (собственник)	
Первая Грузовая Компания [3]	ООО «Восток 1520» [4]
Превышение простоя в текущем отцепочном ремонте ТР-2 на 36 %	На сопоставимом пробеге количество отцепок инновационного вагона в текущий ремонт в 2,4 раза меньше
Увеличение затрат на передислокацию в разы	Общие затраты на содержание одного инновационного полувагона за пробег 1 млн км на 49 % меньше
Средневзвешенные затраты по сравнению с обычными вагонами на 31,4 % больше (на 16 лет эксплуатации)	
Разработчик и производитель инновационных вагонов (Объединенная Вагонная Компания) [5]	
Поддержание инновационного полувагона в исправном состоянии в 2 раза дешевле, чем типового (относится к полувагонам производства ОВК)	

Таблица 2

Характеристика выборочной совокупности вагонов для перевозки минеральных удобрений

Модель вагона (модель тележки)	Год постройки	Доля вагонов в выборке, %	Среднее значение пробега, тыс. км	Среднее число отцепок на 1 вагон	Распределение отцепок по видам ремонта, количество событий	
					ТР-1	ТР-2
Вагоны с нагрузкой 23,5 тс на ось						
19-9814-01 (18-9801)	2018–2020	40	38*	3,3	1,7	1,6
19-9950 (18-9876)	2018–2020	41	64*	4,3	1,9	2,4
19-1274 (18-9801)	2022	14	31	0,21	0,14	0,07
19-1274-01 (18-9801)	2021	4	75	0,75	0,5	0,25
Вагоны с нагрузкой 25 тс на ось						
19-9835-01 (18-9855)	2017–2019	100	389	2,4	0,5	1,9

\*Вагоны, прошедшие деповской ремонт.

Как показывает практика, несмотря на появление инновационных вагонов «с уникальными технико-экономическими характеристиками, высокими показателями надежности и безопасности», количество отцепок в текущий отцепочный ремонт (ТОР) продолжает расти [6]. Основная причина кроется в преобладающем числе отцепок из-за неисправностей колесных пар — самого дорогого элемента при восстановлении исправного состояния вагона. Проведенный нами ранее анализ показал, что у вагонов с осевой нагрузкой 25 тс количество отцепок в текущий ремонт ТР-2 по неисправностям колесных пар — более 68 % (в то время как у типовых вагонов — 64 % [2]).

Таким образом, несмотря на противоречивые точки зрения (см. табл. 1), достоверная оценка инновационности наряду с экономическими критериями должна включать и показатели технической новизны, которые по сравнению с признанными эталонами дают эффект при эксплуатации. Не случайно в последнее время предлагается заменить термин «инновационные вагоны» на определение «вагоны с улучшенными характеристиками» [7]. По заявлению производителей преимущество таких вагонов — «улучшенная динамика в совокупности с использованием колес повышенной твердости и специальных тормозных колодок», что позволяет снижать «скорость износа и темп развития выщербин колес» [8]. Это соответствует одному из ключевых факторов, определяющих эффективность любой технической системы, в том числе и вагона, — способности выполнять установленные для этой системы задачи с минимальными затратами, связанными с проведением технического обслуживания и текущего ремонта.

Имеющиеся в профессиональной среде публикации [9–11] рассматривают данные об отцепках в текущий отцепочный ремонт в зависимости от вида ремонта с разбивкой по основным узлам грузовых вагонов, выделяют неисправности, приводящие к наиболее массовым поступлениям в ТОР вагонов грузо-

вого парка в целом. Исключение составляют полувагоны, как наиболее массовый тип вагонов (модель 12-132), в том числе и с осевой нагрузкой 25 тс (модели 12-196-01, 12-196-02, 12-9853, 12-2143) [5].

Представленный в нашей статье материал является результатом второго этапа эксперимента по анализу отцепок вагонов-минераловозов в текущий ремонт на основе данных из АСУ ПТО и формирования объективного суждения об эффекте в эксплуатации вагонов-минераловозов с осевой нагрузкой 25 тс.

**ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ**

Основные методические подходы проведения эксперимента изложены в статье [9]. В рамках текущего этапа работы выполнен анализ отцепок в текущий ремонт вагонов для перевозки минеральных удобрений с осевой нагрузкой 25 тс в сравнении с вагонами на аналогах тележки 18-100 с осевой нагрузкой 23,5 тс (типовыми).

В выборочную совокупность включены вагоны-минераловозы со сроком эксплуатации от 1 года до 6 лет, находящиеся на станциях массовой погрузки минеральных удобрений в период с 15 июля по 15 августа 2023 г. (табл. 2). Общее количество — 100 типовых и 100 вагонов с осевой нагрузкой 25 тс.

За ключевые качественные показатели надежности приняты удельная повреждаемость [9] и наработка на отказ. Понятие «удельная повреждаемость» распространяется на все неисправности независимо от причины возникновения (технологические, эксплуатационные, повреждения), являющиеся основанием для отцепки вагона в текущий ремонт.

**РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ**

Анализ отцепок типовых вагонов подтверждает ранее сделанный вывод [2]: на количество отцепок существенное влияние оказывает качество изготовления и деповского ремонта. Так, у вагона модели 19-9950 № 959...571 было 10 отцепок за

3,5 года эксплуатации. Из них 4 отцепки по коду 157 (нагрев подшипника в корпусе буксы) [12] и кодам 912, 914 (претензии к качеству деповского ремонта и претензии к качеству изготовления вагона соответственно). В то же время (как пример) вагон модели 19-9814 № 959...454 за 3,5 года не имел отцепок в текущий ремонт.

Для вагонов-минераловозов с осевой нагрузкой 25 тс — аналогичная картина. Например, у вагона № 902...724 было 8 отцепок за 5 лет эксплуатации. В то же время у вагона № 902...280 за 6,2 года эксплуатации всего 1 отцепка. Из 100 вагонов с осевой нагрузкой 25 тс 26 вагонов отцеплялись в ТОР по коду 914 — претензии к качеству изготовления вагона. Основные неисправности, несмотря на заявленные преимущества [8], — тонкий гребень (код 102) и выщербина обода колеса (код 107).

На рис. 1а, б показано распределение отцепок по неисправностям основных узлов в текущий отцепочный ремонт ТР-2 и ТР-1 соответственно для каждой модели вагона (модели 19-1274 и 19-1274-01 не рассматривались ввиду незначительного количества в выборочной совокупности). В целом структура и характер неисправностей поступающих в ТОР минераловозов повторяют результаты предыдущего этапа эксперимента [9] и соответствуют общей картине отцепок вагонов на железных дорогах Российской Федерации. Основная доля отцепок минераловозов с осевой нагрузкой 25 тс в ТР-2 (с отцепкой от состава поезда) обусловлена неисправностями колесных пар и тележек — 75 % (63 %)\* и 10 % (8 %).

У типовых конструкций в зависимости от модели вагона эти показатели существенно различаются. Так, у модели 19-9814-01 (ОАО «Рухзиммаш») количество отцепок по неисправностям колесных пар составляет 80 %, по неисправностям тележек — 12 %, тормозного оборудования — 8 %. Основная доля отцепок вагонов модели 19-9950 (АО «Барнаульский ВРЗ») в ТР-2 также связана с неисправностями колесных пар — 64 %. Несмотря на существенно меньший процент отцепок по неисправностям колесных пар в сравнении с моделью 19-9814-01, общее количество отцепок на один вагон составляет 2,4 раза за период эксплуатации, что существенно превышает этот показатель у модели 19-9814-01 — 1,6 раза.

Около 70 % отцепок в ТР-1 для всех рассмотренных моделей приходится на неисправности кузова, причем преобладание таких отцепок в ТР-1 — характерная особенность практически любого типа вагонов [13]. Однако существенное превышение отцепок по неисправностям автосцепного и тормозного оборудования (см. рис. 1б) у модели с нагрузкой на ось 25 тс в сравнении с типовыми моделями, скорее всего, связано с особенностями конструкции.

На рис. 2 представлено распределение отцепок вагонов в ТР-2 по неисправностям колесных пар. Основные причины отцепок вагонов с нагрузкой на ось 25 тс: тонкий гребень (код 102) — 74 % и выщербины обода колеса (код 107) — 22 %. В то же время у типовых вагонов этот суммарный показатель не превышает 52 % по коду 102 (тонкий гребень), а по коду 107 (выщербины обода колеса) — 35 %.

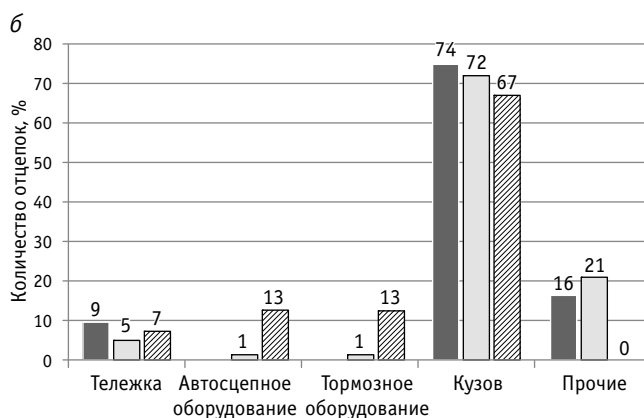
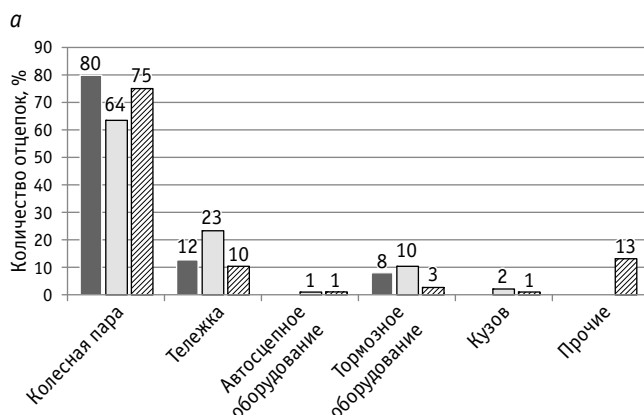


Рис. 1. Распределение отцепок вагонов в текущий ремонт ТР-2 (а) и ТР-1 (б) по неисправностям основных узлов:

■ — 19-9814; □ — 19-9950; ▨ — 19-9835-01

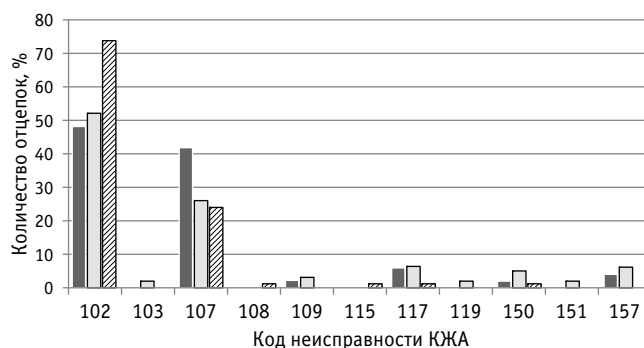


Рис. 2. Распределение отцепок вагонов в ТР-2 по неисправностям колесных пар:

■ — 19-9814; □ — 19-9950; ▨ — 19-9835-01

Удельная повреждаемость по коду 102 (тонкий гребень) у модели 19-9835-01 составляет 1,28 (0,78) [9] отцепок на каждый вагон за период эксплуатации против 0,64 (0,32) [9] у типовых. По коду 107 (выщербины обода колеса) — соответственно 0,41 и 0,46. В выборке из 100 единиц 31 вагон с осевой нагрузкой 25 тс по коду неисправности 102 отцеплялся за период эксплуатации 2 раза, 8 вагонов — 3 раза.

\*Цифры в скобках — данные предыдущего этапа исследования авторов [9].

Основная причина отцепок в ТОР по неисправностям тележек и у типовых, и у вагонов с осевой нагрузкой 25 тс обусловлена разрегулировкой зазоров в скользунах или их неисправностью. Так, у вагонов модели 19-9835-01 74 % отцепок приходится на наличие зазора между колпаком и ответной частью скользуна (код 238). У типовых вагонов этот показатель составляет 67 % (коды 211, 212, 220).

Одно из основных временных понятий теории надежности — наработка на отказ. Расчетные значения наработки на отказ по коду неисправности 102 (тонкий гребень) приведены в табл. 3. Значение наработки определялось как отношение суммарной наработки за время наблюдения за объектом (либо за группой однотипных объектов) к наблюдаемому числу отказов за это же время [14]. В данном случае в качестве объекта выступает вагон, и не важно, восстанавливается его работоспособность непосредственно ремонтом или заменой его части. Результаты эксплуатации вагонов показывают, что наработка на отказ характеризуется значительным статистическим разбросом, обусловленным различием в условиях и режимах эксплуатации вагонов.

Таблица 3

Наработка на отказ по коду неисправности 102 (тонкий гребень)

Наработка на отказ по коду 102	Вагоны с осевой нагрузкой 25 тс, тыс. км	Вагоны с осевой нагрузкой 23,5 тс, тыс. км*
Средняя	145	96
Минимальная	105	9,6
Максимальная	202	108

\*Вагоны, прошедшие деповской ремонт.

Для сравнения: в [10] приводятся следующие значения наработки на отказ по коду неисправности 102 (тонкий гребень): среднесетевая — 107 тыс. км, у полувагонов с осевой нагрузкой 23,5 тс — 97 тыс. км, у полувагонов с осевой нагрузкой 25 тс — от 316 до 343 тыс. км в зависимости от модели тележки.

Анализ отцепок вагонов в ТР-1 по неисправностям кузова (рис. 3) показал, что основная доля приходится на неисправность погрузочно-разгрузочных механизмов специализированных вагонов (код 549). У вагонов модели 19-9835-01 по этому коду количество отцепок в ТР-1 превышает 95 %, в то время как у типовых моделей — менее 80 %.

Анализ причин возникновения неисправностей (табл. 4) по классификации КЖА [12] показал, что в сравнении с предыдущим этапом исследований [9] у вагонов-минераловозов с осевой нагрузкой 25 тс наблюдается снижение количества отцепок, имеющих эксплуатационный характер (с 84,2 до 68,3 %). Однако этот эффект, скорее всего, обусловлен ростом технологических отцепок на 11 % по коду 914 (претензии к качеству изготовления вагона). Тем не менее отцепки по эксплуатационным причинам у вагонов-минераловозов с улучшенными характеристиками более чем на 18 % превышают этот показатель у типовых вагонов.

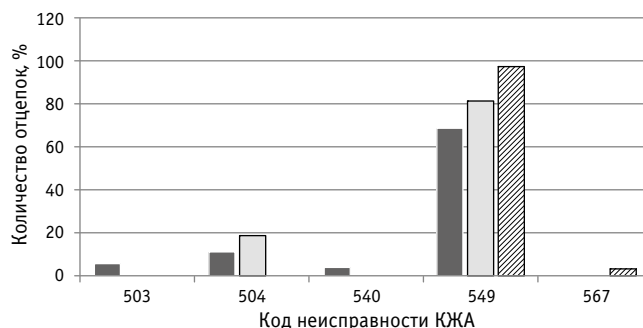


Рис. 3. Распределение отцепок вагонов в ТР-1 по неисправностям кузова:  
■ — 19-9814; □ — 19-9950; ▨ — 19-9835-01

В табл. 5 показана динамика коэффициента отцепок в 2020–2022 гг. Коэффициент отцепок (отношение количества отцепок в текущем году к объему выборочной совокупности [11]) у вагонов с осевой нагрузкой 25 тс в 2022 г. составил 0,81, что превышает среднестатистический коэффициент отцепок по парку грузовых вагонов — прогноз на 2022 г. составлял около 0,7 [11].

Несмотря на то что у вагонов с улучшенными характеристиками значение общего коэффициента отцепок за последние два года практически не меняется, однако коэффициент отцепок в ТР-2 (с отцепкой от состава поезда) растет, составляя 0,7 против 0,53 у типовых. Здесь следует отметить, что количество текущих отцепочных ремонтов (и в первую очередь по отцепкам в ТР-2) влияет на объем технического обслуживания в пути следования и является одной из составляющих эффекта от эксплуатации вагонов [15].

Таблица 4

Распределение причин отцепок вагонов [12]

Тип вагона	Причина отцепки, %*		
	Технологическая	Эксплуатационная	Повреждение
С осевой нагрузкой 23,5 тс	45,9 (43,9)	49,8 (40,6)	4,3 (15,5)
С осевой нагрузкой 25 тс	29,2 (14,6)	68,3 (84,2)	2,5 (1,2)

\*В скобках приведено значение предыдущего этапа исследований [9].

Таблица 5

Динамика отцепок вагонов-минераловозов в 2020–2022 гг.\*

Тип вагона	Коэффициент отцепок**		
	2020 г.	2021 г.	2022 г.
С осевой нагрузкой 25 тс	0,63 (0,53)	0,82 (0,65)	0,81 (0,7)
С осевой нагрузкой 23,5 тс	0,27 (0,13)	0,73 (0,43)	1,0 (0,53)

\*С учетом вагонов моделей 19-1274, 19-1274-01. \*\*В скобках — коэффициент отцепок в ТР-2.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наличие в ходовых частях вагона-минераловоза с осевой нагрузкой 25 тс высокотехнологичных конструкционных решений («колесные пары с колесом из стали марки Т и кассетными подшипниками под адаптером, малогабаритные тормозные приборы и система раздельного торможения, скользуны постоянного контакта, клин из высокопрочного чугуна с износостойкой полимерной накладкой и т.д.» [16]) не дает существенного эффекта в эксплуатации, а количество отказов колесных пар (с отцепкой в ТР-2 от состава поезда) сопоставимо с показателем у типовых вагонов. Так, в среднем каждый вагон с осевой нагрузкой 25 тс отцеплялся в ТР-2 по неисправностям колесных пар за период эксплуатации 1,73 раза против 1,41 раза у типовых.

### Сведения об авторах:

**Олег Вячеславович Черепов**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Вагоны» Уральского государственного университета путей сообщения

**Василий Федорович Лапшин**, доктор технических наук, профессор кафедры «Вагоны» Уральского государственного университета путей сообщения

**Марина Александровна Звягина**, студентка Уральского государственного университета путей сообщения

При оценке эффективности эксплуатации вагонов с улучшенными характеристиками целесообразно использовать показатели надежности (например, наработку на отказ по видам неисправностей) по каждому типу вагонов, их моделям и узлам, что позволит объективно определять межремонтные интервалы. Следует рассмотреть возможность развития системы мониторинга технического состояния вагонов на основе «максимального использования цифровых технологий сбора данных о состоянии подвижного состава с соответствующей их логической обработкой» [17]. Примером может служить мониторинг параметров колес по показаниям КТИ [18], позволяющий сформировать прогноз остаточного ресурса на основе данных из базы геометрических размеров.

### Authors information:

**Oleg V. Cherepov**, PhD in Engineering, Associate Professor of Railway Cars Department, Ural State University of Railway Transport

**Vasily F. Lapshin**, DSc in Engineering, Professor of Railway Cars Department, Ural State University of Railway Transport

**Marina A. Zvyagina**, student, Ural State University of Railway Transport

## Литература

1. Михеев В. А. Влияние инновационных вагонов на производительность подвижного состава в грузовом движении // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 7. С. 223–233. DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-7-223-233>.
2. Звягина М. А., Лапшин В. Ф. Анализ технического состояния инновационных грузовых вагонов // Инновационный транспорт, 2023. № 1 (47). С. 64–68. DOI: 10.20291/2311-164X-2023-1-64-68.
3. Гончаров С. Е. Инновационные вагоны — мнение оператора. URL: <http://railwayexpo.ru/ru/component/content/article?id=179:materialy-konferentsii&Itemid=141> (дата обращения: 12.12.2022).
4. Лосев Д. Н. Эксплуатация вагонов нового поколения и затраты на их содержание. URL: <http://railwayexpo.ru/ru/component/content/article?id=179:materialy-konferentsii&Itemid=141> (дата обращения: 12.12.2022).
5. Калетин С. В. PRO инновационный вагон. URL: <http://railwayexpo.ru/ru/component/content/article?id=179:materialy-konferentsii&Itemid=141> (дата обращения: 12.12.2022).
6. Затраты на содержание и ремонт вагонного парка: основные риски повышения цен в 2022 году. URL: <https://www.rzd-partner.ru/zhd-transport/comments/zatraty-na-soderzhanie-i-remont-vagonnogo-parka-osnovnye-riski-povysheniya-tsen-v-2022-godu/> (дата обращения: 12.04.2023).
7. Развитие инновационного вагоностроения: проблемы и пути решения. URL: <https://wagon-cargo.ru/news/razvitie-innovatsionnogo-vagonostroeniya-problemy-i-puti-resheniya/> (дата обращения: 14.10.2022).
8. Объединенная вагонная компания. Инновационная ходовая часть. URL: [https://www.uniwagon.com/products/bogies/18-9855\\_18-6863/](https://www.uniwagon.com/products/bogies/18-9855_18-6863/) (дата обращения: 12.11.2022).

## References

1. Mikheev V. A. Innovation car influence on rolling stock performance in freight trains [Vliyaniye innovatsionnykh vagonov na proizvoditel'nost' podvizhnogo sostava v gruzovom dvizhenii]. *Proceedings of ISTU*. 2018. Vol. 22. No. 7. Pp. 223–233. DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-7-223-233>.
2. Zvyagina M. A., Lapshin V. F. Analysis of the technical condition of innovative freight rail cars [Analiz tekhnicheskogo sostoyaniya innovatsionnykh gruzovykh vagonov]. *Innotrans*. 2023. No. 1 (47). Pp. 64–68. DOI: 10.20291/2311-164X-2023-1-64-68.
3. Goncharov S. E. Innovative cars — operator's opinion [Innovatsionnye vagony — мнение оператора]. URL: <http://railwayexpo.ru/ru/component/content/article?id=179:materialy-konferentsii&Itemid=141> (access date: 12.12.2022).
4. Losev D. N. Operation of new generation railcars and their maintenance expenses [Ekspluatatsiya vagonov novogo pokoleniya i zatraty na ikh sodержanie]. URL: <http://railwayexpo.ru/ru/component/content/article?id=179:materialy-konferentsii&Itemid=141> (access date: 12.12.2022).
5. Kaletin S. V. PRO innovative railcar [PRO innovatsionnyy vagon]. URL: <http://railwayexpo.ru/ru/component/content/article?id=179:materialy-konferentsii&Itemid=141> (access date: 12.12.2022).
6. Costs for maintaining and repairing the rolling stock: the main risks of price increases in 2022 [Zatraty na sodержanie i remont vagonnogo parka: osnovnye riski povysheniya tsen v 2022 godu]. URL: <https://www.rzd-partner.ru/zhd-transport/comments/zatraty-na-soderzhanie-i-remont-vagonnogo-parka-osnovnye-riski-povysheniya-tsen-v-2022-godu/> (access date: 12.04.2023).
7. Development of innovative car manufacturing: problems and solutions [Razvitie innovatsionnogo vagonostroeniya: problemy i puti resheniya]. URL: <https://wagon-cargo.ru/news/razvitie-innovatsionnogo-vagonostroeniya-problemy-i-puti-resheniya/> (access date: 14.10.2022).
8. United Wagon Company. Innovative undercarriage [Ob'edinennaya vagonnaya kompaniya. Innovatsionnaya khodovaya chast']. URL: [https://www.uniwagon.com/products/bogies/18-9855\\_18-6863/](https://www.uniwagon.com/products/bogies/18-9855_18-6863/) (access date: 12.11.2022).

9. Черепов О. В., Звягина М. А., Лапшин В. Ф. Повреждаемость инновационных вагонов, используемых для перевозки минеральных удобрений // Транспорт Урала. 2023. № 2 (77). С. 16–21. DOI: 10.20291/1815-9400-2023-2-16-21.
10. Анализ отцепок грузовых вагонов в ТОР. Оценка качества изготовления грузовых вагонов. URL: <http://opzt.ru/wp-content/uploads/2018/06/Vopros-1-Ivanov-A.O.-Analiz-ottsepok-gruzovykh-vagonov-v-TOR.pdf> (дата обращения: 11.06.2023).
11. Анализ отцепок грузовых вагонов на сети железных дорог по итогам работы вагонного хозяйства за 6 месяцев 2021 года. URL: [https://galactica34.com/f/analiz\\_otcepok\\_zh\\_6\\_mes\\_2020g.pdf](https://galactica34.com/f/analiz_otcepok_zh_6_mes_2020g.pdf) (дата обращения: 11.06.2023).
12. Классификатор. Основные неисправности грузовых вагонов (КЖА 2005 04) : утв. комиссией Совета по железнодорожному транспорту полномочных представителей вагонного хозяйства железнодорожных администраций, протокол от 23–25 марта 2004 г.
13. Свердлов В. Б., Лапшин В. Ф. Обеспечение сохранности вагонного парка на путях необщего пользования // Транспорт Урала. 2021. № 4 (71). С. 33–39. DOI: 10.20291/1815-9400-2021-4-33-39.
14. Пигунов В. В. Надежность подвижного состава железнодорожного транспорта. Гомель : БелГУТ, 2016. 202 с.
15. Эффект инноваций. URL: <http://www.pult.gudok.ru/archive/detail.php?ID=1375374> (дата обращения: 18.08.2023).
16. Анисеева-Науменко Л. О., Лебедева Е. В. Анализ эффективности использования инновационных грузовых вагонов в современных условиях // Транспортное дело России. 2017. № 5. С. 109–110. ISSN 2072-8689.
17. Концепция перспективных направлений развития вагонного хозяйства : утв. распоряжением Центральной дирекции инфраструктуры от 01.07.2022 г. № ЦДИ-708/р. URL: <http://scbist.com/vagonnoe-hozyaistvo/15339-koncepcii-vagonnogo-hozyaistva.html> (дата обращения: 08.12.2023).
18. Автоматизированная диагностическая система контроля параметров колесных пар вагонов. URL: [https://www.tdisie.nsc.ru/Development/kompleks\\_rus.html](https://www.tdisie.nsc.ru/Development/kompleks_rus.html) (дата обращения: 18.11.2023).
9. Cherepov O. V., Zvyagina M. A., Lapshin V. F. Damage rate of innovative railcars used for transportation of mineral fertilizers [Povrezhdaemost' innovatsionnykh vagonov, ispol'zuemykh dlya perevozki mineral'nykh udobreniy]. *Transport of the Urals*. 2023. No. 2 (77). Pp. 16–21. DOI: 10.20291/1815-9400-2023-2-16-21.
10. Analysis of freight car uncouplings in TOR (current uncoupling repairs). Assessment of manufacturing quality of freight cars [Analiz ottsepok gruzovykh vagonov v TOR. Otsenka kachestva izgotovleniya gruzovykh vagonov]. URL: <http://opzt.ru/wp-content/uploads/2018/06/Vopros-1-Ivanov-A.O.-Analiz-ottsepok-gruzovykh-vagonov-v-TOR.pdf> (access date: 11.06.2023).
11. Analysis of freight car uncouplings on the railway network based on the results of the carriage industry for 6 months of 2021 [Analiz ottsepok gruzovykh vagonov na seti zheleznykh dorog po itogam raboty vagonnogo khozyaystva za 6 mesyatsev 2021 goda]. URL: [https://galactica34.com/f/analiz\\_otcepok\\_zh\\_6\\_mes\\_2020g.pdf](https://galactica34.com/f/analiz_otcepok_zh_6_mes_2020g.pdf) (access date: 11.06.2023).
12. Classifier. The main malfunctions of freight railcars (CRWA 2005 04) [Klassifikator. Osnovnye neispravnosti gruzovykh vagonov (KZhA 2005 04)] : approved by the Commission of the Council for Railway Transport of Authorized Representatives of the Railway Carriage Economy of Railway Administrations, protocol of March 23–25, 2004.
13. Sverdlov V. B., Lapshin V. F. Car fleet safety assurance on non-public railway tracks [Obespechenie sokhrannosti vagonnogo parka na putyakh neobshhego pol'zovaniya]. *Transport of the Urals*. 2021. No. 4 (71). Pp. 33–39. DOI: 10.20291/1815-9400-2021-4-33-39.
14. Pigunov V. V. Reliability of railway rolling stock [Nadezhnost' podvizhnogo sostava zheleznodorozhnogo transporta]. Gomel : Belarusian Institute of Railway Engineers, 2016. 202 p.
15. Innovation effect [Effekt innovatsiy]. URL: <http://www.pult.gudok.ru/archive/detail.php?ID=1375374> (access date: 18.08.2023).
16. Aniseeva-Naumenko L. O., Lebedeva E. V. Analysis of the efficiency of innovative freight cars in modern conditions [Analiz effektivnosti ispol'zovaniya innovatsionnykh gruzovykh vagonov v sovremennykh usloviyakh]. *Transport business of Russia*. 2017. No. 5. Pp. 109–110. ISSN 2072-8689.
17. Concept of perspective ways for the development of the carriage industry [Kontsepsiya perspektivnykh napravleniy razvitiya vagonnogo khozyaystva] : approved by Order of the Central Directorate of Infrastructure dated 01.07.2022 No. TsDI-708/r. URL: <http://scbist.com/vagonnoe-hozyaistvo/15339-koncepcii-vagonnogo-hozyaistva.html> (access date: 08.12.2023).
18. Automated diagnostic system for monitoring the parameters of car wheelsets [Avtomatizirovannaya diagnosticheskaya sistema kontrolya parametrov kolesnykh par vagonov]. URL: [https://www.tdisie.nsc.ru/Development/kompleks\\_rus.html](https://www.tdisie.nsc.ru/Development/kompleks_rus.html) (access date: 18.11.2023).

Объем статьи 0,62 авторских листа

Научная статья  
УДК 629.4.015

## Экспериментальные исследования пассажирских вагонов с упругими межвагонными переходами и оценка прочности с учетом условий эксплуатации

Елена Викторовна Сорокина<sup>1</sup>, Сергей Львович Самошкин<sup>1</sup>, Олег Сергеевич Самошкин<sup>2</sup>, Сергей Дмитриевич Коршунов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Акционерное общество Научная организация «Тверской институт вагоностроения», Тверь, Россия

<sup>2</sup>Акционерное общество «Федеральная пассажирская компания», Москва, Россия

## Experimental studies of passenger cars with elastic gangways and strength assessment taking into account operating conditions

Elena V. Sorokina<sup>1</sup>, Sergey L. Samoshkin<sup>1</sup>, Oleg S. Samoshkin<sup>2</sup>, Sergey D. Korshunov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>JSC Scientific Organization «Tver Institute of Car Engineering», Tver, Russia

<sup>2</sup>JSC «Federal Passenger Company», Moscow, Russia

### Аннотация

Внедрение на отечественных железных дорогах инновационного пассажирского подвижного состава и двухвагонных сцепов потребовало их оснащения принципиально новыми переходными площадками — упругими межвагонными переходами. В статье представлены результаты испытаний по оценке прочности кузова вагона и упругого межвагонного перехода под воздействием сосредоточенных и распределенных по площади нагрузок с учетом внешних эксплуатационных факторов (прохождение сцепом нормативных кривых, устойчивость к воздействию избыточной солнечной радиации, воды, ветровой нагрузки).

**Ключевые слова:** инновационный пассажирский вагон, упругий межвагонный переход, прочность, эксплуатационные испытания, внешние воздействия

### Abstract

The introduction of innovative passenger rolling stock and two-car couplings on domestic railways required them to be equipped with fundamentally new transition platforms — elastic gangways. The article presents the results of tests to assess the strength of the wagon body and the elastic gangways transition under the influence of concentrated and area-distributed loads, taking into account the simulation of external operational factors (passage of regulatory curves by the coupling, resistance to excessive solar radiation, water, wind load).

**Keywords:** innovative passenger car, elastic gangway, strength, operational tests, external influences

DOI: 10.20291/1815-9400-2024-1-24-29

Одно из направлений по внедрению прогрессивных норм обслуживания пассажирских поездов [1] связано с разработкой и изготовлением новых вагонов, предназначенных для малолюдных технологий. Состав такого поезда формируется из двухвагонных сцепов моделей 61-4516 и 61-4517, а также штабного вагона модели 61-4529. Сцеп состоит из двух плацкартных или двух купейных вагонов, соединенных тормозными концами. Вагоны каждой модели изготавливаются в двух вариантах: один — с сервисным помещением, другой — со служебным отделением и купе проводников. Место отдыха проводников сцепа располагается в вагоне со служебным помещением.

По оснащению системами жизнеобеспечения, по металлоконструкции кузова, планировке пассажирских купе или пассажирских помещений вагоны моделей 61-4516 и 61-4517 [2] наиболее близки к серийным вагонам моделей 61-4440 (ку-

пейный) и 61-4447 (некупейный). Сначала вагоны моделей 61-4516 и 61-4517 соединялись между собой герметизированными упругими межвагонными переходами (УМВП) фирмы HÜBNER (Германия), что позволило создать в поезде единый микроклимат и снизить уровень шума.

При эксплуатации сцепа вагонов и (или) сочлененных вагонов, согласно ГОСТу 34681-2020 [3], конструкция ходовых частей, межвагонного перехода и сцепных устройств должна обеспечивать прохождение кривых без саморасцепа (табл. 1). Причем для двухвагонных сцепов, оборудованных УМВП, строгость выполнения требований ГОСТа [3] значительно повышается.

Проведенные на нормативных кривых (см. табл. 1) испытания показали следующее:

на S-образной кривой радиусом 170 м без прямой вставки зазор между балками переходной площадки составляет 0 мм;

Таблица 1

Нормативные кривые для прохождения сцепа вагонов

Расчетный участок железнодорожного пути	Расчетный радиус кривой для пассажирского подвижного состава, м
Круговая кривая и участок сопряжения прямой и кривой без переходного радиуса	120
S-образная кривая без прямой вставки	170

на прямом участке пути зазор между балками переходной площадки равен 32 мм (а с учетом зазора между внутренней поверхностью пятников балки переходной площадки и осью кронштейна — 34 мм);

на участке сопряжения кривой радиусом 120 м с прямой зазор между балками переходной площадки составляет 18 мм (с учетом зазора между внутренней поверхностью пятников балки переходной площадки и осью кронштейна буфера — 20 мм);

на односторонней круговой кривой радиусом 120 м зазор между балками переходной площадки составляет от 60 до 92 мм (с учетом зазора между внутренней поверхностью пятников балки переходной площадки и осью кронштейна буфера — от 62 до 94 мм).

Таким образом, было установлено, что переходные площадки межвагонных переходов полностью соответствуют требованиям безопасности пассажиров, работников поездной бригады и бригады вагона-ресторана.

В соответствии с требованиями ГОСТ 34681-2020 [3] конструкция межвагонного перехода должна включать переходной мостик и ограждение. Переходной мостик рассчитывается на нагрузку 1 кН, приложенную на площади 100×100 мм в любой зоне, а также на распределенную нагрузку 3 кН/м<sup>2</sup>. Уровень напряжений при этом не должен превышать предела текучести материала мостика.

По требованиям ГОСТа 33788-2016 [4] общие и местные напряжения, действующие в несущей конструкции вагона и его составных частей, определяются методами тензометрии. Измерение напряжений производят в наиболее нагруженных зонах несущей конструкции вагона. При неизвестном направлении действия главных напряжений рекомендуется устанавливать розетку из двух ортогональных тензорезисторов и одного под углом 45° к ним.

Специалистами АО НО «ТИВ» были проведены испытания на прочность мостика межвагонного полуперехода: измерялись уровни напряжений в металлоконструкции мостика при нагружении сосредоточенными нагрузками и нагрузками, распределенными по его площади. Тензометрические датчики на переходном мостике размещались в соответствии со схемой, приведенной на рис. 1 и 2.

Деформации определялись по формуле

$$\varepsilon_n = \frac{\sigma_n}{E},$$

где  $E$  — модуль продольной упругости, кг/см<sup>2</sup>;  $\sigma_n$  — напряжения в точке  $n$ , кг/см<sup>2</sup>.

Главные напряжения в розетках тензорезисторов рассчитывались по уравнению

$$\sigma_{1,2} = \frac{E}{1-\mu} \cdot \frac{\varepsilon_a + \varepsilon_c}{2} \pm \frac{E}{\sqrt{2} \cdot (1+\mu)} \cdot \sqrt{(\varepsilon_a - \varepsilon_b)^2 + (\varepsilon_c - \varepsilon_b)^2},$$

где  $\mu$  — коэффициент Пуассона.

Величина эквивалентных напряжений для розетки определялась по формуле

$$\sigma_{\text{ЭКВ}} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1 \sigma_2}.$$

Результаты испытаний показали, что максимальные напряжения в металлоконструкции переходного мостика при приложении сосредоточенной нагрузки составляют 13 МПа, а при приложении распределенной нагрузки — 9 МПа, т.е. не превышают допустимых значений.

В рамках изучения влияния, которое оказывают на вагон факторы внешней среды, были проведены испытания по проверке устойчивости сочленения между половинами УМВП и сочленения между вагонами и половиной УМВП к воздействию воды под давлением. Два вагона, оборудованные УМВП и соединенные между собой, устанавливались в специализированную камеру и подвергались воздействию воды (рис. 3). Испытания проводились при давлении в гидросистеме, установленном в пределах 250+100 кПа, и при расходе воды выше 10 м<sup>3</sup>/ч на каждом из рядов форсунок. Общий расход 30 м<sup>3</sup>/ч эквивалентен 500 л/мин. При использовании 16 форсунок производительность составляет 31,25 л/мин на каждую.

Герметичность межвагонного перехода оценивалась по следующим критериям:

- наличие конденсата из-за разности температур внутри и снаружи перехода допускается;
  - непрерывные струи и капли из контурного уплотнения рамы либо из внешней оболочки сальфона недопустимы;
  - наличие капель в области прохода не допускается.
- Как показали испытания, вагон полностью соответствует всем трем критериям герметичности.

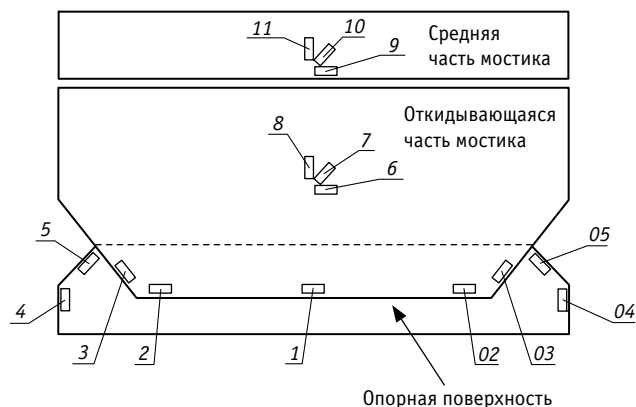


Рис. 1. Схема расстановки тензометрических датчиков на металлоконструкции переходного мостика при прочностных испытаниях

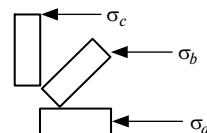


Рис. 2. Обозначение напряжений на розетке тензорезисторов



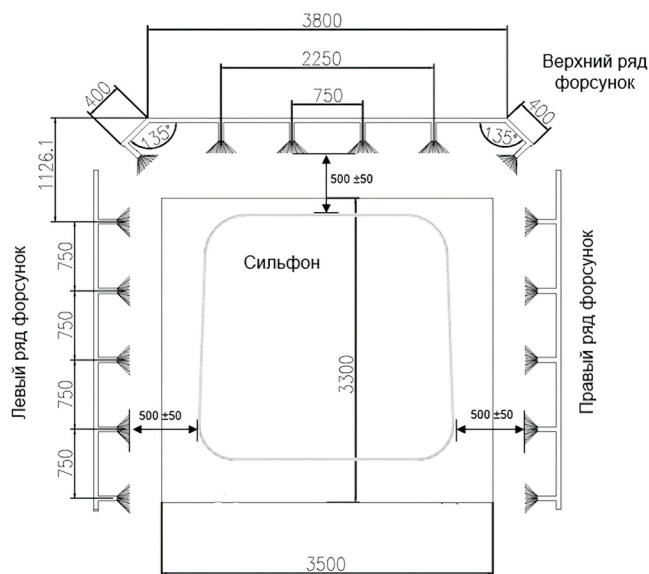


Рис. 3. Схема установки форсунок при испытаниях воздействия воды на УМВП

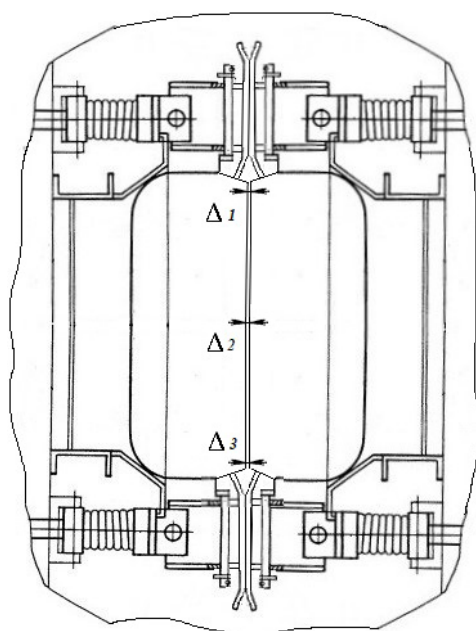


Рис. 4. Расположение точек замера

Для более полного и всестороннего исследования вагонов в составе опытного поезда были проведены эксплуатационные испытания. В соответствии с разработанной методикой выполнялся контроль ряда параметров вагона при движении по магистральным путям, в том числе контроль фактического зазора (расстояния) между переходными площадками (рис. 4–6). Контроль проводился в трех точках пола ( $\Delta_1$ ,  $\Delta_2$ ,  $\Delta_3$ ) не реже одного раза в 30 мин. Первичные зафиксированные данные во время стоянки поезда на прямом участке пути, а также при движении поезда на прямых участках и в кривых приведены в табл. 2 и 3.

При проведении эксплуатационных испытаний установлено: во время стоянок на прямых участках пути зазор между переходными площадками в полу перехода составил от 26 до 31 мм, что соответствует нормативному значению;

при движении на прямых участках, а также в кривых зазор между переходными площадками в полу перехода составил от 26 до 33 мм, что соответствует нормативному значению;

при атмосферных осадках попадание воды в зону переходных площадок межвагонных переходов сцепленных вагонов не зафиксировано;

деформации и повреждения несущих элементов конструкции переходных площадок, буферов и торцевой стены кузова отсутствовали;

«забуферение» (захождение тарелей буферов вагонов сцеп друг за друга) отсутствовало.

С учетом факторов внешней среды (избыточной солнечной радиации, воды, ветровой нагрузки) и установленных межвагонных переходов проведены прочностные испытания кузова вагона при воздействии [5–7]:

массы установленных на кузов межвагонных переходов;

тепловой нагрузки, имитирующей избыточную солнечную радиацию;

боковых нагрузок на кузов, имитирующих ветровые;

нагрузки от эксцентриситета сцепок вагонов при прохождении кривых;

поднятия за сцепку кузова вагона весом тары, равным весу оборудованного экипированного кузова;

поднятия на двух домкратах по диагоналям кузова вагона весом тары, равным весу оборудованного экипированного кузова;

поднятия на двух домкратах с одной стороны под шкворневую балку кузова вагона весом брутто, равным весу оборудованного экипированного кузова с максимальной полезной нагрузкой;

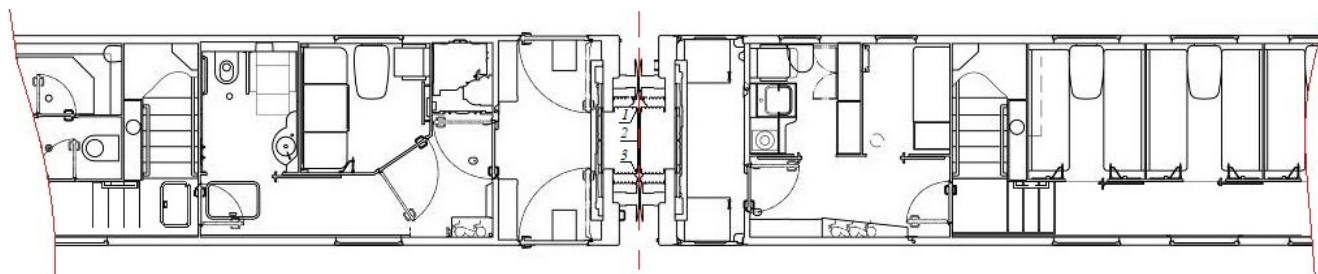


Рис. 5. Контроль зазора между переходными площадками вагонов в полу перехода во время стоянки поезда или при движении на прямом участке пути

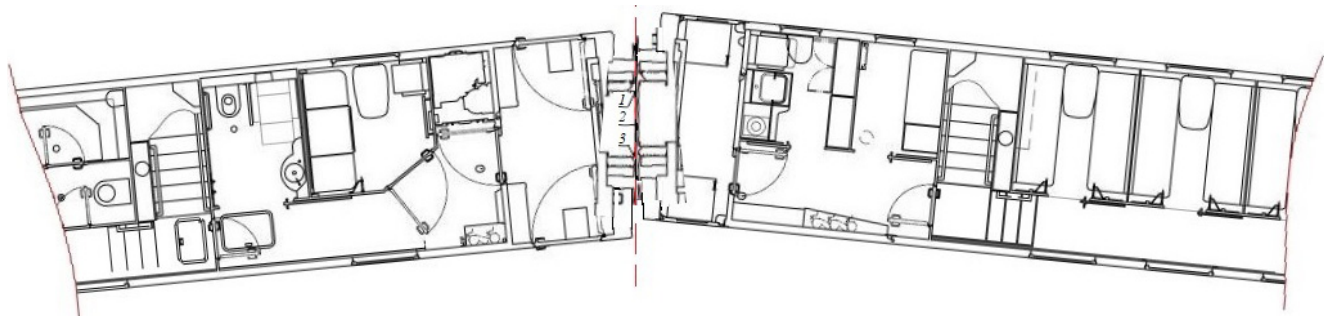


Рис. 6. Контроль зазора между переходными площадками в полу перехода во время движения поезда в существующих кривых

Таблица 2

Первичные данные, полученные во время стоянки поезда

Показатель	Нормативное значение	Значение, полученное по результатам испытаний	
		Точка $\Delta_1$	Точка $\Delta_2$
Зазор (расстояние) между переходными площадками в полу перехода, мм	От 32 до 34	Точка $\Delta_1$	26
		Точка $\Delta_2$	30
		Точка $\Delta_3$	31

Таблица 3

Первичные данные, полученные во время движения поезда

Время проведения замера	Нормативное значение контролируемого показателя	Значение, полученное по результатам испытаний		
		Точка $\Delta_1$	Точка $\Delta_2$	Точка $\Delta_3$
16.00	На прямом участке от 32 до 34 мм; на односторонней кривой от 60 до 94 мм	28	27	30
16.30		32	31	29
17.00		33	29	29
17.30		29	31	29
18.00		27	29	26
18.30		30	29	29
19.00		27	28	27
19.30		31	30	32
20.00		29	30	30
20.30		30	28	29
21.00		27	29	27
21.30		29	31	30
22.00		27	31	28
22.30		29	29	27
23.00		30	32	28
23.30		29	30	30
00.00		29	28	29

продольных нагрузок сжатия 2,5 и 1,0 МН, приложенных к задним упорам хребтовой балки;

продольных нагрузок растяжения 1,5 и 1,0 МН, приложенных к передним упорам хребтовой балки;

вертикальной нагрузки весом брутто кузова вагона, равным весу оборудованного экипированного кузова с максимальной полезной нагрузкой.

По результатам испытаний при соударениях вагона силой до 2,5 МН и движении в нормативных кривых с допускаемыми скоростями определены напряжения в несущих элементах вагона, а также выполнена верификация экспериментальных и расчетных значений, которая показала их удовлетворительную сходимость (расхождение не более 13 %) [8].

В рамках программы импортозамещения ООО «Центр транспортной комплектации» разработало унифицированный межвагонный переход [9], который может быть установлен на отечественные магистральные пассажирские вагоны и по своим геометрическим размерам позволяет осуществлять сцепление с вагонами, оснащенными УМВП фирмы HÜBNER. Для проверки этой возможности был выполнен комплекс натуральных испытаний [10].

На первом этапе определены габариты заглушки половины перехода в сложенном состоянии для транспортировки, вес заглушки и время ее установки. Рассмотрены два варианта сложения заглушки в транспортировочное состояние: первый — заглушка складывается вчетверо (один раз вдоль вертикальной оси и потом второй раз вдоль горизонтальной); второй — заглушка сначала складывается вдоль вертикальной оси, а затем скатывается в рулон. Результаты показали, что унифицированный межвагонный переход соответствует требованиям технического задания [9].

На втором этапе проверялась совместимость половины этого УМВП с половиной унифицированного межвагонного перехода производства HÜBNER GmbH. Контролировались сцепляемость и расцепляемость устройств между собой, прохождение кривой радиусом 120 м сцепом вагонов в рабочем и сложенном положениях межвагонного перехода и устойчивость к воздействию воды под давлением. Результаты испытаний показа-

ли, что унифицированный межвагонный переход, предложенный ООО «Центр транспортной комплектации», соответствует требованиям технического задания [9].

На третьем этапе проверялись совместимость унифицированного перехода в сложенном положении и половины перехода баллонного типа, а также сцепляемость и расцепляемость унифицированных межвагонных переходов между собой, геометрические размеры, маркировка, прохождение сцепом вагонов кривой радиусом 120 м и сопряжения прямого участка с кривой. Испытания подтвердили, что предложенный унифицированный межвагонный переход соответствует требованиям технического задания [9].

Таким образом, результаты проведенного комплекса натуральных испытаний позволяют сделать следующие выводы.

1. Стендовые и путевые испытания унифицированного межвагонного перехода, предложенного в рамках выполнения программы импортозамещения [9], показали его совместимость с упругим межвагонным переходом фирмы HÜBNER (Германия) и с российскими переходными площадками баллонного типа, которыми оснащены отечественные пассажирские вагоны.

2. Для принятия решения о серийном производстве предложенного универсального межвагонного перехода необходимо изготовить опытную партию и провести подконтрольные эксплуатационные испытания в составе вагонов магистральных пассажирских поездов.

#### Сведения об авторах:

**Елена Викторовна Сорокина**, ведущий инженер АО НО «Тверской институт вагоностроения»

**Сергей Львович Самошкин**, доктор технических наук, начальник управления научно-технического обеспечения и развития АО НО «Тверской институт вагоностроения»

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

**Сергей Дмитриевич Коршунов**, кандидат технических наук, главный специалист АО НО «Тверской институт вагоностроения»

#### Authors information:

**Elena V. Sorokina**, Principal Engineer, JSC Scientific Organization «Tver Institute of Car Engineering»

**Sergey L. Samoshkin**, DSc in Engineering, Head of Division of Scientific and Technical Support and Development, JSC Scientific Organization «Tver Institute of Car Engineering»

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

**Sergey D. Korshunov**, PhD in Engineering, Head Specialist, JSC Scientific Organization «Tver Institute of Car Engineering»

#### Литература

1. Поярков М. Г. Перевозка пассажиров, в том числе маломобильных, подвижным составом нового поколения. Соответствие принципам ESG в современных реалиях // Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты : материалы XVI международной научно-практической конференции. Санкт-Петербург : Изд-во ПГУПС, 2022. С. 197–204.
2. Поярков М. Г., Самошкин О. С. Двухвагонный сцеп пассажирских вагонов: технические решения и уровень комфорта пассажиров // Вагоны и вагонное хозяйство. 2022. № 1 (69). С. 35–38. ISSN 1817-6089.
3. ГОСТ 34681-2020. Вагоны пассажирские локомотивной тяги. Общие технические требования. Москва : Стандартинформ, 2020. 36 с.

#### References

1. Poyarkov M. G. Transportation of passengers, including those with limited mobility, by a new generation of rolling stock. Compliance with ESG principles in modern realities [Perevozka passazhirov, v tom chisle malomobil'nykh, podvizhnym sostavom novogo pokoleniya. Sootvetstvie printsipam ESG v sovremennykh realiyakh]. *Rolling stock of the XXI century: ideas, requirements, projects* : proceedings of the 16th International scientific and practical conference. St. Petersburg : Publishing House of PSTU, 2022. Pp. 197–204.
2. Poyarkov M. G., Samoshkin O. S. Two-car coupler of passenger cars: technical solutions and level of comfort for passengers [Dvukhvaгонnyy stseп passazhiрskikh vagonov: tekhnicheskie resheniya i uroven' komforta passazhirov]. *Railway Cars and Carriage Equipment*. 2022. No. 1 (69). Pp. 35–38. ISSN 1817-6089.
3. GOST 34681-2020. Passenger cars on locomotive traction. General technical requirements [Vagony passazhiрskie lokomotivnoy tyagi. Obshhie tekhnicheskie trebovaniya]. Moscow : Standardinform, 2020. 36 p.

4. ГОСТ 33788–2016. Вагоны грузовые и пассажирские. Методы испытаний на прочность и динамические качества. Москва : Стандартинформ, 2016. 43 с.
5. Испытания кузова на прочность и устойчивость от воздействия нормативных ремонтных нагрузок при облучении солнечной радиацией крыши / С. Д. Коршунов, Д. И. Гончаров, Д. В. Красивов [и др.] // Проблемы и перспективы развития вагоностроения : сборник трудов VIII Всероссийской научно-практической конференции. Брянск : БГТУ, 2019. С. 72–75.
6. Методика расчетно-экспериментальных исследований кузовов современного подвижного состава / С. Д. Коршунов, А. Н. Скачков, С. Л. Самошкин [и др.] // Известия ПГУПС. 2015. № 4. С. 38–47. ISSN 1815-588X.
7. Программа-методика предварительных (приемочных) испытаний кузова вагона пассажирского купейного модели 61-4517 : ПМ 4517/05-2018. Тверь : ЗАО НО «ТИВ», 2018. 16 с.
8. Исследование и анализ прочностных показателей кузова пассажирского купейного вагона модели 61-4517 : отчет о НИР 265.293.19. Тверь : ЗАО НО «ТИВ», 2019. 50 с.
9. Межвагонный переход унифицированный для пассажирских вагонов : ТЗ 42469589.660729.001. Москва : ООО «Центр транспортной комплектации», 2021. 58 с.
10. Межвагонный переход унифицированный для пассажирских вагонов. Программа и методика предварительных испытаний : ПМ 42469589.660729.015. Москва : ООО «Центр транспортной комплектации», 2021. 56 с.
4. GOST 33788–2016. Freight and passenger railcars. Methods of testing structural strength and dynamic performance [Vagony грузовые i passazhirskie. Metody ispytaniy na prochnost' i dinamicheskie kachestva]. Moscow : Standardinform, 2016. 43 p.
5. Korshunov S. D., Goncharov D. I., Krasivov D. V. [et al.]. Tests of the body's strength and stability under the effects of regulatory repair loads when exposed to the solar radiation from the roof [Ispytaniya kuzova na prochnost' i ustoychivost' ot vozdeystviya normativnykh remontnykh nagruzok pri obluchenii solnechnoy radiatsiy kryshi]. *Problems and prospects of car building development* : proceedings of the 8th All-Russian scientific and practical conference. Bryansk : BSTU, 2019. Pp. 72–75.
6. Korshunov S. D., Skachkov A. N., Samoshkin S. L. [et al.]. Method for calculation and experimental studies of modern rolling stock bodies [Metodika raschetno-eksperimental'nykh issledovaniy kuzovov sovremenno-go podvizhnogo sostava]. *Proceedings of Petersburg Transport University*. 2015. No. 4. Pp. 38–47. ISSN 1815-588X.
7. The program-methodology for preliminary (acceptance) tests of the car body of a passenger compartment model 61-4517 [Programma-metodika predvaritel'nykh (priemochnykh) ispytaniy kuzova vagona passazhirskogo kupeynogo modeli 61-4517] : PM 4517/05-2018. Tver : JSC Scientific Organization «Tver Institute of Car Engineering», 2018. 16 p.
8. Research and analysis of the strength parameters of the body of the passenger compartment car model 61-4517 [Issledovanie i analiz prochnostnykh pokazateley kuzova passazhirskogo kupeynogo vagona modeli 61-4517] : research report 265.293.19. Tver : JSC Scientific Organization «Tver Institute of Car Engineering», 2019. 50 p.
9. Unified gangway for passenger cars [Mezhvagonnyy perekhod unifikirovannyy dlya passazhirskikh vagonov] : technical specification 42469589.660729.001. Moscow : LLC «Center of transport equipment», 2021. 58 p.
10. Unified gangway for passenger cars. The program and methodology of preliminary tests [Mezhvagonnyy perekhod unifikirovannyy dlya passazhirskikh vagonov. Programma i metodika predvaritel'nykh ispytaniy] : PM 42469589.660729.015. Moscow : LLC «Center of transport equipment», 2021. 56 p.

Объем статьи 0,6 авторских листа

Научная статья

УДК 629.4.027:539.37

## Кусочно-линейная регрессия для оценки зон скольжения

 Сергей Викторович Кротов<sup>1</sup>, Дмитрий Павлович Кононов<sup>2</sup>, Александр Петрович Буйносов<sup>3</sup>
<sup>1</sup>Ростовский государственный университет путей сообщения, Ростов-на-Дону, Россия

<sup>2</sup>Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup>Уральский государственный университет путей сообщения, Екатеринбург, Россия

## Piecewise linear regression for estimating slip zones

 Sergey V. Krotov<sup>1</sup>, Dmitriy P. Kononov<sup>2</sup>, Alexander P. Buynosov<sup>3</sup>
<sup>1</sup>Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russia

<sup>2</sup>Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

<sup>3</sup>Ural State University of Railway Transport, Ekaterinburg, Russia

### Аннотация

Прочное соединение колеса и оси — важный параметр несущей способности колесной пары. В эксплуатации зоны взаимного проскальзывания колеса и оси снижают надежность соединения, а их прямое измерение не представляется возможным. В статье рассмотрена допустимость применения кусочно-линейной регрессии с точкой останова для прогнозирования такого состояния прессового соединения, при котором зоны скольжения могут достигать значительных величин. Это угрожает безопасности движения, особенно при использовании подвижного состава с повышенными осевыми нагрузками. Колесная пара рассчитана методом конечных элементов для определения величины и направления скольжения в соединении. Проанализированы показатели предлагаемой модели регрессии. Рассмотрена возможность использования взвешивания переменной, варьируемой на трех уровнях. Полученные модели с высокой степенью точности можно использовать для прогнозирования величины зон скольжения при неблагоприятном сочетании внешних силовых воздействий. Представленные исследования будут полезны для понимания сложности процессов и количественной оценки взаимодействия колеса и оси в прессовом соединении.

**Ключевые слова:** прессовое соединение, зона скольжения, осевая нагрузка, кусочно-линейная модель, функция отклика, профиль катания, уравнение регрессии

### Abstract

A strong connection between a wheel and an axle is an important parameter for the load-bearing capacity of a wheelset. While operating mutual slip zones of the wheel and axle reduce the reliability of the connection and their direct measurement is not possible. The article examines the admissibility of using piecewise linear regression with a breakpoint to predict the state of a press connection in which slip zones can reach significant values. This is a danger for traffic safety especially while running rolling stock with increased axle loads. The wheelset parameter is calculated using the final element method to determine the magnitude and direction of slip at the joint. The indicators of the proposed regression model are analyzed. The possibility of weighting of a variable is considered at three levels. The resulting models can be used with a high degree of accuracy to predict the size of slip zones under unfavorable combination of external force influences. The present research will be useful to understand the complexity of the processes and to quantify the wheel-axle interaction in a press joint.

**Keywords:** press connection, sliding zone, axial load, piecewise linear model, response function, rolling profile, regression equation

DOI: 10.20291/1815-9400-2024-1-30-34

Одним из ключевых индикаторов эффективности эксплуатации колесной пары является прочность соединения колеса с осью методом прессовой посадки. В процессе эксплуатации в соединении возникают зоны сцепления и скольжения, которые при определенных сочетаниях множества нагружающих факторов могут привести к сдвигу колеса с оси и, как следствие, к значительному экономическому урону и угрозе безопасности движения в целом. Начиная с 2010 г. этот дефект в количественном выражении находится на пятой позиции, а с точки зрения экономического ущерба прочно удерживает третью позицию в США: в среднем каждый случай оценивается в 636 тыс. долл. ущерба [1]. При этом нагрузка на ось составляет 32,5 т и выше, а в нашей стране она постепенно повышается с 23,5 до 25 т/ось и далее.

Учитывая тенденцию роста осевой нагрузки на железнодорожном транспорте России, необходимо применять методы прогнозирования потенциально опасного состояния прессового соединения, которое при высоких осевых нагрузках подвержено разрушению [1].

Для получения прогностических моделей необходима информация о физических и геометрических параметрах колесной пары: о сочетании нагружающих факторов, влиянии температуры при торможении, износе колеса и т.п.

При эксплуатации вагона измерение геометрии колесной пары выполняется при помощи приборов лазерного излучения, и это внедрено на части российских железных дорог [2]. Комплекс показал хорошие результаты в обеспечении безопасности с точки зрения надежности прессового соединения, так как следит и за расстоянием между колесами.

Выполнены 96 расчетов колесной пары методом конечных элементов при всех возможных сочетаниях шести нагружающих факторов для получения исчерпывающих данных при полном факторном эксперименте [3].



В результате определены десятки показателей — это напряжения, деформации, перемещения как в колесе, так и в оси, а также параметры прессового соединения [3, 4].

Кусочная регрессионная модель относится к нелинейному оцениванию. В данном случае исследуется величина площади зон относительного взаимного перемещения ступицы колеса и подступичной части оси в месте посадки при принятом сочетании нагрузок. В статистическом анализе в качестве независимых переменных учтены: осевая нагрузка (нами принято обозначение VERT), реакция взаимодействия колеса и рельса (POPER) при движении в кривой, изменение температуры при различных режимах торможения (TORM), эксцентриситет приложения нагрузки (EXCENT), крутящий момент (MOKR) и толщина обода (TOLOBOD). Все параметры вводятся на двух уровнях, температурное воздействие представлено тремя режимами торможения [4]. На рис. 1 показано нормальное распределение полученных результатов зон скольжения в процентах всей площади соединения. Характеристика теста Колмогорова — Смирнова  $d$  превышает вероятность  $p = 0,05$ , при которой не подтверждается нормальное распределение. Некорректное применение гипотез о нормальности и однородности дисперсии приводит к неточным расчетам стандартных ошибок и доверительных интервалов параметров модели. Поэтому тест на нормальность необходим. Из распределения видно, что в 15 случаях зона скольжения достигает и превышает 50 %, а в двух случаях превышает 60 % общей площади соединения «колесо — ось».

Очевидно, что под динамическим воздействием целостность соединения при определенном сочетании нагружающих факторов может быть нарушена. В соединении колеса и оси узлы контакта перемещаются в зонах сцепления совместно, а в зонах скольжения в одном направлении (например, вдоль оси) неодинаково, и может возникнуть эффект самораспрессовки соединения [4].

Суммарная величина участков скольжения, определяющая прочность посадки колеса на оси, представлена функцией отклика в моделях регрессии [5, 6].

При анализе взаимосвязи между функцией отклика и объясняющими переменными очевидно, что в зависимости от диапазона изменения переменных вид линейной зависимости может меняться [5, 6]. В таких случаях одной линейной модели может быть недостаточно для адекватного описания. Кусочная регрессия позволяет использовать несколько линейных моделей для различных диапазонов переменных. Граница диапазона, на котором изменяется наклон линейной функции, назы-

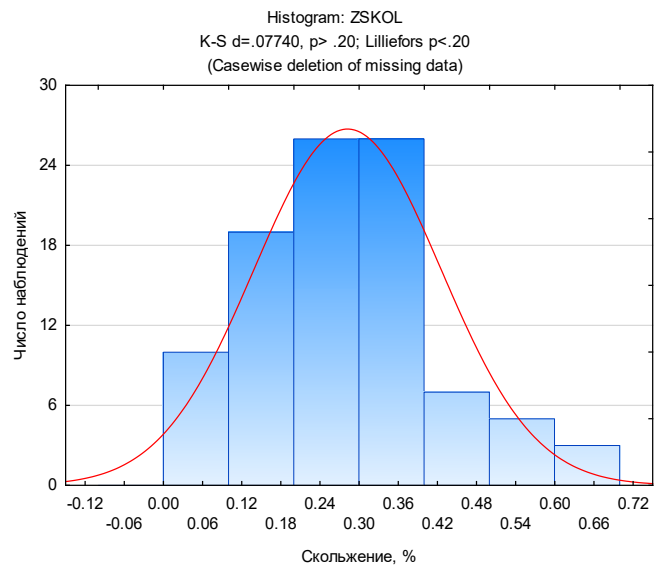


Рис. 1. Распределение зон скольжения, % площади прессового соединения

вается точкой разрыва. Значение точки разрыва может быть заранее известно или определяется в процессе анализа. Регрессионная функция в точке разрыва представляется таким образом, чтобы она была непрерывной, это позволяет избежать скачков значений функции в точке разрыва. Затем стандартная модель линейной регрессии подгоняется ко всему диапазону данных [7, 8].

Для повышения качества прогноза существуют показатели, улучшающие регрессионные зависимости. Тип регрессионной зависимости между переменными-предикторами и функцией отклика будет отличаться на разных уровнях значений предсказываемых переменных [7]. Приводим результаты Quasi-Newton-метода оценки (estimate) функции отклика (dependent variable ZONESKOL) — зависимой переменной, величины площади зон скольжения (табл. 1) [8, 9]. Число взаимодействий функции отклика с переменными равно 96 — полный факторный эксперимент для шести параметров.

Был использован Quasi-Newton-метод, который дает возможность определить значения функции в разных точках, оценить первую производную (скорость изменения угла наклона), вторую производную (ускорение изменения угла наклона) и далее минимизировать целевую функцию (final loss) [7, 8].

Таблица 1

Основные показатели регрессионной модели

Model is: Piecewise linear regression with breakpoint (Spreadsheet3_(Recovered))								
Dependent variable: ZONESKOL Loss: Least squares								
Final loss: 0.482625894 R= 0.86755 Variance explained: 75.264%								
N=96	Const.B0	VERT	POPER	MOKR	TORM	EXCENT	TOLOBOD	Breakpt.
Estimate	0.092150	0.000531	0.001127	-0.000037	-0.000047	-0.015099	-0.001789	0.282249
Estimate	0.127690	0.001018	0.000962	0.000012	-0.000206	-0.008178	-0.006546	

Для этого применен метод наименьших квадратов (least squares), позволяющий минимизировать сумму квадратов различий между предсказанными и наблюдаемыми значениями, т.е. в нашем случае это полученные в результате расчета значения площади зон скольжения в соединении [7, 8].

При такой оценке целевая функция равна 0,4826. Суммируемая дисперсия, объясняемая данным типом регрессии, равна 0,75264, что эквивалентно 75,3 % всей дисперсии значений площади скольжения. Коэффициент детерминации  $R = 0,86755$ , что говорит о высоком качестве регрессии [8, 9].

До точки останова (breakpoint) 0,282249 (это соответствует площади зон скольжения, равной 28,2 % площади контакта колеса и оси) зависимость функции отклика от переменных имеет вид

$$\begin{aligned} ZSKOL = & 0,09215 + 0,00053 \cdot VERT + \\ & + 0,00113 \cdot POPER - 0,00004 \cdot MOKR - \\ & - 0,00005 \cdot TORM - 0,0151 \cdot EXCENT - \\ & - 0,0018 \cdot TOLOBOD. \end{aligned}$$

Далее зависимость описывается уравнением

$$\begin{aligned} ZSKOL = & 0,1277 + 0,0011 \cdot VERT + \\ & + 0,001 \cdot POPER + 0,00001 \cdot MOKR - \\ & - 0,00021 \cdot TORM - 0,0082 \cdot EXCENT - \\ & - 0,0066 \cdot TOLOBOD. \end{aligned}$$

Таким образом, получена сравнительная оценка двух линейных уравнений регрессии.

Расчетную величину всей площади относительного перемещения колеса и оси получим, подставив в уравнения значения предикторов.

Теперь взвешиваем одну из независимых переменных, в частности TORM (табл. 2) [9]. Таким образом, эта переменная будет учтена в уравнении регрессии с учетом перемножения со всеми другими (число взаимодействий 6112), что должно повысить качество уравнения регрессии для функции отклика.

В данном случае дисперсия равна 82,4 %, коэффициент множественной корреляции достиг 0,91, что говорит о высоком качестве полученного уравнения [8].

Точка разрыва теперь равна 26 %. До этого значения можно использовать параметры первой оценки (estimate), после — второй, а уравнения регрессии могут быть записаны аналогично предыдущей модели.

Отметим, что другие переменные-предикторы не дают улучшения показателей модели. В частности, при использовании переменной VERT дисперсия функции отклика, объясняемая уравнением, имеет показатель 50 %.

На рис. 2 показана зависимость предсказываемых зон взаимного перемещения колеса и оси по отношению к невязкам регрессионной модели в случае учета значимости переменной TORM. Линейное уравнение имеет вид  $y = 3,0247 \cdot 10^{-9} - 7,66 \cdot 10^{-9}x$ , и фактическая зависимость близка к нулевому значению. Известно [8], что в этом случае принятая регрессионная модель адекватно описывает зависимость между управляемыми переменными и целевой переменной.

На рис. 3 представлена линейная зависимость между рассчитанными значениями зон скольжения по результатам численного эксперимента и значениями, полученными по уравнениям регрессии для прессового соединения, со взвешиванием переменной TORM. Разброс остатков незначителен, уравнение имеет вид  $y = -3,0133 \cdot 10^{-9} + 1 \cdot x$ . При этом известно

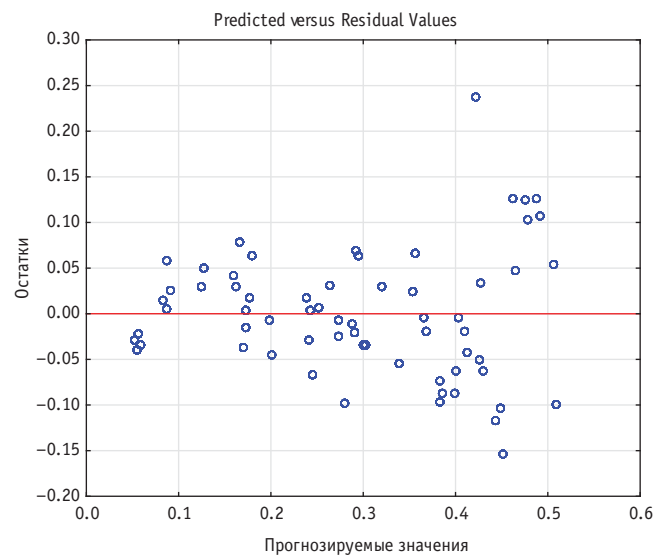


Рис. 2. Распределение прогнозируемых величин зон скольжения с учетом взвешенной переменной

Таблица 2

Основные показатели регрессионной модели с учетом взвешенной переменной

N=6112	All Groups Model is: Piecewise linear regression with breakpoint (planFac32 макс) Dependent variable: ZONESKOL Loss: Least squares Final loss: 18.050507329 R= 0.90768 Variance explained: 82.388%							
	Const.B0	VERT	POPER	MOKR	TORM	EXCENT	TOLOBOD	Breakpt.
Estimate	0.277479	0.000108	0.001903	0.000042	0.000281	0.025723	0.000775	0.259516
Estimate	0.431425	0.000099	0.000441	0.000038	0.001090	0.003739	0.002560	

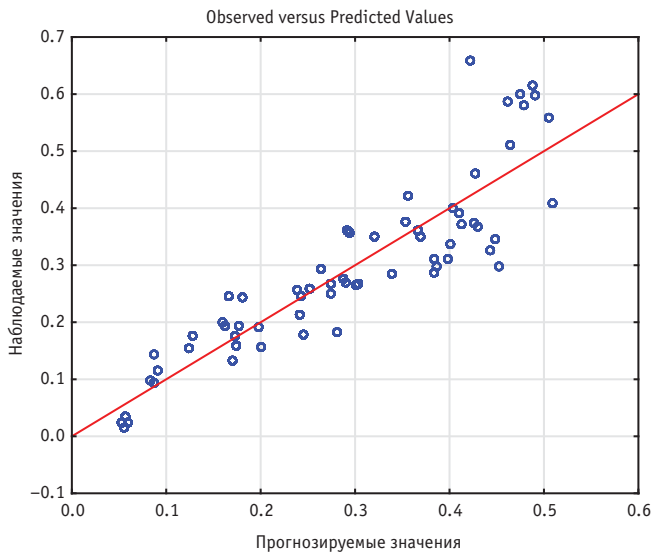


Рис. 3. Распределение зон скольжения с учетом взвешенной переменной

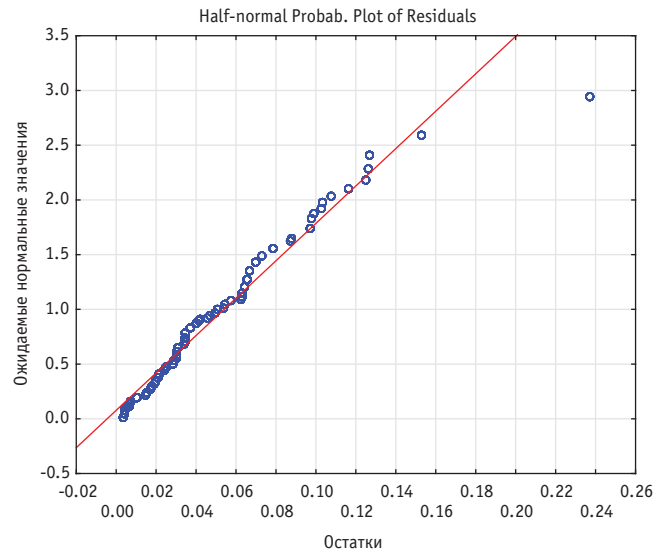


Рис. 4. Вероятность нормального распределения остатков

[9, 10], что тангенс угла наклона графика, равный 1, адекватно описывает данные.

Кусочно-линейная модель подгоняется к вторичным наборам данных, и оценки параметров сохраняются. Если данные демонстрируют нарушения допущений о нормальности и гомоскедастичности, а также допущения о независимости, нужно провести тест на нормальность [9, 11]: в нашем случае выполнен тест на нормальность остатков, результаты показаны на рис. 4.

Распределение вероятности, представленное на рис. 4, получено следующим образом. Невязки (остатки) ранжируются, а стандартизованные значения нормального распределения располагаются по оси  $y$ . Если получившиеся остатки (нанесены на график по оси  $x$ ) имеют нормальное распределение, то все значения должны располагаться на прямой, что и наблюдается на графике [8, 9, 12].

В заключение приведем полиномиальное представление (формулы полиномов представлены на рис. 5) рассчитанных (○) и прогнозируемых (□) по нелинейной модели значений зон скольжения в прессовом соединении. Как видно из рис. 5, графики практически идентичны.

Таким образом, можно заключить, что нелинейная оценка на основе кусочной регрессии с точкой останова при взвешивании переменной дает возможность достаточно точно прогнозировать параметры взаимных перемещений колеса и оси при всевозможных сочетаниях указанных факторов, варьируемых на разных уровнях. Это позволяет контролировать величину

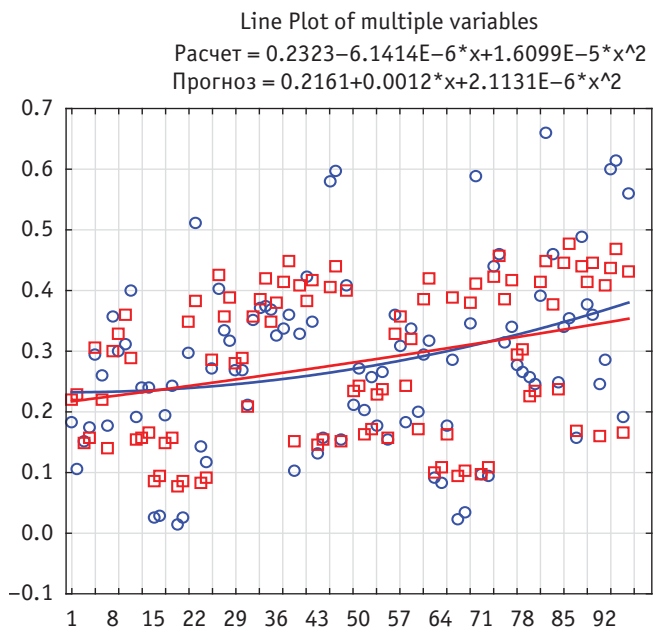


Рис. 5. Полиномиальное представление функции отклика: —○— расчет; —□— прогноз

скольжения, одного из параметров несущей способности прессового соединения колесной пары железнодорожного вагона, в условиях роста грузоподъемности подвижного состава [3].

#### Сведения об авторах:

**Сергей Викторович Кротов**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительная механика» Ростовского государственного университета путей сообщения

**Дмитрий Павлович Кононов**, доктор технических наук, профессор кафедры «Наземные транспортно-технологические комплексы» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I

**Александр Петрович Буйносов**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Электрическая тяга» Уральского государственного университета путей сообщения

#### Authors information:

**Sergey V. Krotov**, PhD in Engineering, Associate Professor of Structural Mechanics Department, Rostov State Transport University

**Dmitriy P. Kononov**, DSc in Engineering, Professor of Mechanical Handling and Road Building Machines Department, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University

**Alexander P. Buynosov**, DSc in Engineering, Professor, Professor of Electric Traction Department, Ural State University of Railway Transport

#### Литература

1. Annual report. Safety statistics / Federal Railroad Administration, USA. URL: <https://safetydata.fra.dot.gov/OfficeofSafety/Default.aspx> (дата обращения: 17.11.2023).
2. Лазерный диагностический комплекс для контроля колесных пар вагонов на ходу поезда / С. В. Плотников, А. Н. Байбаков, В. М. Гуренко [и др.] // Гео-Сибирь. 2005. Т. 6. С. 64–70.
3. Кротов С. В. Основы теории несущей способности прессовых соединений колесных пар железнодорожных вагонов. Москва : УМЦ ЖДТ, 2011. 152 с.
4. Кротов В. П., Кротов С. В. Оценка несущей способности колесной пары при повышенных нагрузках // Вестник РГУПС. 2005. № 1. С. 35–39. ISSN 0201-727X.
5. Кротов С. В., Сладковски А. В. Факторный анализ расчета несущей способности колесной пары вагона // Транспорт Урала. 2012. № 2 (33). С. 36–40. ISSN 1815-9400.
6. Кротов С. В. Факторный анализ несущей способности колесной пары железнодорожного вагона. Ростов-на-Дону : РГУПС, 2011. 137 с.
7. 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.
8. Афифи А., Эйзен С. Статистический анализ: Подход с использованием ЭВМ. Москва : Мир, 1982. 488 с.
9. Боровиков В. П. Популярное введение в программу STATISTICA. Москва : КомпьютерПресс, 1998. 267 с.
10. Балдин В. Л., Буйносов А. П., Тихонов В. А. Повышение долговечности колесных пар за счет упрочнения гребней бандажей локомотивов // Вестник транспорта Поволжья. 2011. № 5 (29). С. 57–61. ISSN 1997-0722.
11. Буйносов А. П., Худояров Д. Л. Влияние упрочнения гребней на ресурс бандажей колесных пар // Транспорт Урала. 2010. № 1 (24). С. 63–68. ISSN 1815-9400.
12. Буйносов А. П. Еще раз об износе колеса и рельса // Путь и путевое хозяйство. 2010. № 9. С. 23–26. ISSN 0033-4715.

#### References

1. Annual report. Safety statistics. Federal Railroad Administration, USA. URL: <https://safetydata.fra.dot.gov/OfficeofSafety/Default.aspx> (access date: 17.11.2023).
2. Plotnikov S. V., Baybakov A. N., Gurenko V. M. [et al.]. Laser diagnostic complex for monitoring wheelsets of cars while the train is moving [Lazernyy diagnosticheskiy kompleks dlya kontrolya kolesnykh par vagonov na khodu poezda]. *Geo-Siberia*. 2005. Vol. 6. Pp. 64–70.
3. Krotov S. V. Basics of theory on carrying capacity of press-fit connections of wheelsets for railway cars [Osnovy teorii nesushhey sposobnosti pressovyykh soedineniy kolesnykh par zheleznodorozhnykh vagonov]. Moscow : UMTs ZhDT, 2011. 152 p.
4. Krotov V. P., Krotov S. V. Assessment of the load-bearing capacity of a wheelset under increased loads [Otsenka nesushhey sposobnosti kolesnoy pary pri povyshennykh nagruzkakh]. *Vestnik RGUPS*. 2005. No. 1. Pp. 35–39. ISSN 0201-727X.
5. Krotov S. V., Sladkowski A. Factor analysis of bearing capacity calculation of railcar's wheel set [Faktornyy analiz rascheta nesushhey sposobnosti kolesnoy pary vagona]. *Transport of the Urals*. 2012. No. 2 (33). Pp. 36–40. ISSN 1815-9400.
6. Krotov S. V. Factor analysis of bearing capacity of railcar's wheel set [Faktornyy analiz nesushhey sposobnosti kolesnoy pary zheleznodorozhnogo vagona]. Rostov-on-Don : RGUPS, 2011. 137 p.
7. 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.
8. Afifi A., Azen S. Statistical analysis: a computer oriented approach [Statisticheskiy analiz: Podkhod s ispol'zovaniem EVM]. Moscow : World, 1982. 488 p.
9. Borovikov V. P. Popular introduction to the program STATISTICA [Populyarnoe vvedenie v programmu STATISTICA]. Moscow : ComputerPress, 1998. 267 p.
10. Balдин V. L., Buynosov A. P., Tikhonov V. A. Increasing the durability of wheelsets by strengthening the flanges of locomotive tires [Povyshenie dolgovechnosti kolesnykh par za schet uprochneniya grebney bandazhey lokomotivov]. *Bulletin of transport of the Volga region*. 2011. No. 5 (29). Pp. 57–61. ISSN 1997-0722.
11. Buynosov A. P., Khudoyarov D. L. Influence of crests' hardening on the resource of wheel sets' bandages [Vliyaniye uprochneniya grebney na resurs bandazhey kolesnykh par]. *Transport of the Urals*. 2010. No. 1 (24). Pp. 63–68. ISSN 1815-9400.
12. Buynosov A. P. Once again about wheel and rail wearout [Eshhe raz ob iznose koleasa i rel'sa]. *Railway Track and Facilities*. 2010. No. 9. Pp. 23–26. ISSN 0033-4715.

Объем статьи 0,56 авторских листа

Научная статья  
УДК 629.423.31

## Развитие остаточных напряжений в изоляции тяговых электродвигателей при отверждении пропиточного состава

Марина Александровна Шрайбер<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Санкт-Петербург, Россия

## The development of residual stresses in the insulation of traction motors during the curing of the impregnation composition

Marina A. Shrayber<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

### Аннотация

В изоляции тяговых электродвигателей тепловозов при отверждении возникают остаточные напряжения, которые существенно влияют на деформацию и изменение механических свойств изоляционных материалов. Экспериментальное измерение остаточных напряжений при затвердевании пропиточного состава, с одной стороны, самый объективный и достоверный, но, с другой стороны, весьма дорогостоящий и сложный способ. Поэтому для определения уровня остаточных напряжений более предпочтительны методы математического моделирования. В статье рассматривается модель для прогнозирования уровня остаточных напряжений в изоляции при отверждении, включающая термохимическую модель и модель остаточного напряжения, с учетом зависящих от времени отверждения характеристик пропиточного материала.

**Ключевые слова:** изоляция, тяговый электродвигатель, надежность, пропиточный состав, остаточные напряжения

### Abstract

When curing in the insulation of traction electric motors of diesel locomotives, residual stresses arise, which significantly affect the deformation and change in the mechanical properties of insulating materials. Experimental measurement of residual stresses during solidification of the impregnation composition is the most objective and reliable, but at the same time expensive and complex method. Therefore, mathematical modeling methods are more preferable for determining the level of residual stresses. The paper considers a model for predicting the level of residual stresses in insulation during curing, including a thermochemical model and a residual stress model, taking into account the characteristics of the impregnating material depending on the curing time.

**Keywords:** insulation, traction motor, reliability, impregnation composition, residual stresses

DOI: 10.20291/1815-9400-2024-1-35-40

### ВВЕДЕНИЕ

Показатели надежности изоляции обмоток тяговых электродвигателей (ТЭД) определяются в процессе изготовления и зависят от материала изоляции обмоток, намоточного оборудования, технологий пропитки и сушки, при нарушении которых появляются очаги дополнительных напряжений.

По мнению авторов статьи [1], источники напряжений в многослойных материалах можно разделить на внутренние и внешние. Внутренние связаны с материалом изоляции, его компоновкой и формой, создают остаточные напряжения на уровне компонентов (стекловолокна и пропиточного состава) и действуют изнутри. Внешние источники образуют напряжения на границах разделения слоев и материалов, действуют снаружи и внутрь.

Остаточные напряжения в многослойных материалах изоляции ТЭД можно определить как заблокированные внутри его напряжения без приложения каких-либо внешних сил. Они являются прямым следствием химической усадки пропиточного состава и несоответствия теплового сжатия между компонентами изоляции во время охлаждения, могут оказывать существенное влияние на механические характеристики материала изоляции, вызывая его коробление или повреждение без предварительной нагрузки (например, отслоение вдоль границы раздела слоев и появление микротрещины). Определение остаточных напряжений очень важно для прогнозирования срока службы ТЭД, однако, насколько нам известно, исследования, связанные с изучением их влияния на безотказность и эффективность эксплуатации ТЭД, не проводились.

Анализ воздействия остаточных напряжений в изоляционных материалах поможет эффективнее прогнозировать надежность работы ТЭД и совершенствовать технологические процессы изготовления в пределах заданных характеристик с использованием новых материалов.

Считается [2], что основные факторы, влияющие на уровень остаточных напряжений в материале изоляции, — это тепловое расширение и химическая усадка при отверждении пропиточного состава (которая, например, для пропиточного компаунда Элпласт-180 ИД составляет 8–10 %, для пропиточного лака



КО-916К — 40–45 % [3]), а также релаксация напряжений во время отверждения или после него. Усадка во время отверждения и несоответствие коэффициентов теплового расширения между сталью сердечника, медным проводником, стекловолоконным и пропиточным составом — наиболее важные причины остаточных напряжений. Поскольку коэффициент теплового расширения стекловолокна ниже по сравнению с коэффициентом теплового расширения пропиточного состава, результирующие термические остаточные напряжения имеют сжимающий характер в волокне и растягивающий характер в пропиточном составе [4].

После отверждения и охлаждения пропиточный материал подвергается трехосному напряженному состоянию. Возникающие во время отверждения пропиточного состава остаточные напряжения вызывают растрескивание материала изоляции [5] и ее деформацию, что приводит к трудностям при сборке обмотки ТЭД.

### АНАЛИЗ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

Несмотря на все существующие знания, точное определение остаточных напряжений в материалах изоляции ТЭД остается трудноразрешимой задачей из-за сложности процесса отверждения. Типичная изоляция ТЭД состоит из двух или более видов материалов с разными физическими и химическими свойствами, а затем отверждается при высокой температуре и высоком давлении с разными структурными масштабами (микроскопический и макроскопический уровень). Для понимания характера остаточных напряжений были предложены различные методы, включая решение упругости, метод конечных элементов и теорию цилиндра [6, 7].

В работе [8] дано такое обобщенное описание развития остаточных напряжений во время отверждения.

Этап 1. Смола находится в вязком состоянии, и степень отверждения низкая. Следовательно, температура стеклования низкая. При этом незначительные остаточные напряжения не возникают. В материале изоляции волокно и пропиточный состав либо прилегают друг к другу, либо окружают друг друга. Первоначально, т.е. при незатвердевшей пропитке, они не будут друг с другом связаны.

Этап 2. Начало гелеобразования пропиточного состава. Для эпоксидных смол это происходит при степени отверждения около 0,6. С этого момента модуль упругости пропиточного состава начинает расти, и материал приобретает некоторые напряжения, которые быстро снимаются, поскольку пропиточный состав все еще является вязкоупругим. На ранних стадиях отверждения пропиточный состав не способен выдерживать значительных нагрузок. Течение пропиточного состава и его затвердевание могут вызывать изменения геометрии материала изоляции и, как следствие, способствовать деформации, например, из-за перекрытия витков стеклоленты [9]. Напряжения вдоль оси паза из-за термических эффектов и усадки на этой стадии отверждения, как правило, очень малы и потому не вызывают значительных деформаций.

Этап 3. Начало стеклования смолы — это точка, в которой текущая температура совпадает с температурой отверждения. С этого момента, пока обмотка не остынет до комнатной тем-

пературы, возникающие напряжения вносят значительный вклад в общую величину остаточного напряжения материала изоляции. Когда пропиточный состав затвердевает (стеклообразное состояние), он приобретает значительную жесткость и может рассматриваться как упругопластическое твердое тело. С этого момента возникают тепловые напряжения и связанные с ними деформации. Химическая усадка на данном этапе эквивалентна тепловой деформации. Величина химической усадки после стеклования обычно невелика, поэтому преобладают тепловые эффекты.

Следует отметить, что на практике очень трудно определить границы выделенных этапов, кроме того, для разных пропиточных составов указанные эффекты могут накладываться друг на друга.

Остаточные напряжения можно анализировать с микро-механической или макромеханической точки зрения. В микро-механическом масштабе остаточные напряжения возникают внутри и вокруг отдельных волокон стеклоткани из-за несоответствия тепловых свойств компонентов (например, из-за разницы в коэффициентах теплового расширения). На макроскопическом уровне остаточные напряжения в материале изоляции ТЭД развиваются из-за различия термических свойств отдельных его слоев.

Известно [10], что остаточные напряжения на уровне волокнистой структуры материала изоляции не учитываются явно при проектировании ТЭД, поскольку могут учитываться в итоговых показателях надежности электрических машин локомотивов.

Прежде чем оценивать вызванные процессом отверждения напряжения и деформации изоляционного материала, необходимо учесть теплопередачу, которая подробно описана в [11].

На основе зависящего от времени энергетического баланса и закона теплообмена Фурье трехмерная термохимическая модель отверждения пропиточного состава задается следующим образом [12]:

$$\rho_c c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \chi_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \chi_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \chi_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\partial H_T}{\partial t}, \quad (1)$$

где  $\rho_c$  — плотность материала изоляции, кг/м<sup>3</sup>;  $c_p$  — удельная теплоемкость материала изоляции, Дж·кг<sup>-1</sup>·К<sup>-1</sup>;  $\chi_x, \chi_y, \chi_z$  — коэффициенты теплопроводности по осям координат, Вт/м·К;  $H_T$  — выделение теплоты при отверждении, Дж.

В процессе отверждения в пропиточном материале происходят сложные химические реакции с массивным источником тепловыделения, количество которого можно определить по уравнению [12]

$$H_T = \rho_r (1 - V_f) H_r \frac{d\epsilon}{dt}, \quad (2)$$

где  $\rho_r$  — плотность пропиточного материала, кг/м<sup>3</sup>;  $V_f$  — объемная доля волокна в материале изоляции;  $H_r$  — общее тепловыделение при отверждении, Дж;  $\epsilon$  — степень отверждения.

Для моделирования скорости реакции отверждения пропиточного состава воспользуемся выражением [6, 8]

$$\frac{d\epsilon}{dt} = a_p \exp\left(-\frac{W_a}{RT}\right) (1-\epsilon)^{a_o} \epsilon^{a_T}, \quad (3)$$

где  $a_o, a_p, a_T$  — показатели кинетики отверждения;  $W_a$  — энергия активации, Дж/моль;  $R$  — универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К).

Кинетические параметры отверждения  $a_o, a_p, a_T$  определяются экспериментально с помощью методов термического анализа.

Механические свойства композитного материала изменяются по мере отверждения. В частности, упругая податливость  $e_{\Pi}$  претерпевает существенные изменения во время отверждения. Это поведение может быть смоделировано степенным эмпирическим законом вида [8]

$$e_{\Pi} = e_{\Pi 0} f(t) + a_{\text{кп}} \left[ \frac{t}{k_T} \right]^{a_{\text{пп}}}, \quad (4)$$

где  $e_{\Pi 0}$  — начальная податливость материала изоляции, м/Па;  $f(t)$  — функция, зависящая от свойств материала изоляции;  $a_{\text{кп}}$  — коэффициент ползучести;  $k_T$  — коэффициент сдвига;  $a_{\text{пп}}$  — показатель ползучести.

Начальная податливость  $e_{\Pi 0}$  соответствует упругой реакции материала изоляции на возникающее напряжение.

Параметры ползучести  $a_{\text{кп}}$  и  $a_{\text{пп}}$  могут быть получены в ходе экспериментальных исследований, а также могут быть представлены как линейные функции от  $\epsilon$ .

Упругие податливости по осям  $x$  и  $y$  определяются выражениями [8]:

$$e_{\text{их}} = \frac{1}{E_x}; \quad (5)$$

$$e_{\text{иу}} = \frac{1}{E_y}, \quad (6)$$

где  $e_{\text{их}}$  и  $e_{\text{иу}}$  — податливость материала изоляции по осям  $x$  и  $y$  соответственно, м/Па;  $E_x$  и  $E_y$  — модули упругости в полностью отвержденном материале по осям  $x$  и  $y$  соответственно, Па.

Результирующую упругую податливость материала изоляции можно определить по выражению

$$e_{\text{и}} = \sqrt{e_{\text{их}}^2 + e_{\text{иу}}^2}. \quad (7)$$

Коэффициенты жесткости  $c$  материала изоляции в плоскости  $xу$  связаны с податливостью по осям координат выражениями [8]:

$$K_{\text{их}} = \frac{e_{\text{иу}}}{e_{\text{их}}e_{\text{иу}} - e_{\text{их}}^2}; \quad (8)$$

$$K_{\text{иу}} = \frac{e_{\text{их}}}{e_{\text{их}}e_{\text{иу}} - e_{\text{их}}^2}, \quad (9)$$

где  $K_{\text{их}}$  и  $K_{\text{иу}}$  — коэффициенты жесткости материала изоляции по осям  $x$  и  $y$  соответственно, Н/м.

Для исследования напряженно-деформированного состояния изоляции в процессе отверждения пропиточного состава воспользуемся математической моделью, которая достаточно подробно описывает термомеханические реакции в многослойных композитных материалах [7].

В нашем исследовании применяется трехмерная термомеханическая модель для прогнозирования остаточных напряжений при отверждении материала изоляции ТЭД. В модели материалы изоляции рассматриваются как сплошные среды. Предполагается, что температура и степень отверждения постоянны в каждом элементе объема в соответствии с результатами, рассчитанными с помощью разработанной твердотельной модели в среде SolidWorks [11, 13], схема которой представлена на рис. 1. При этом один из компонентов в процессе отверждения изменяет свое фазовое состояние.

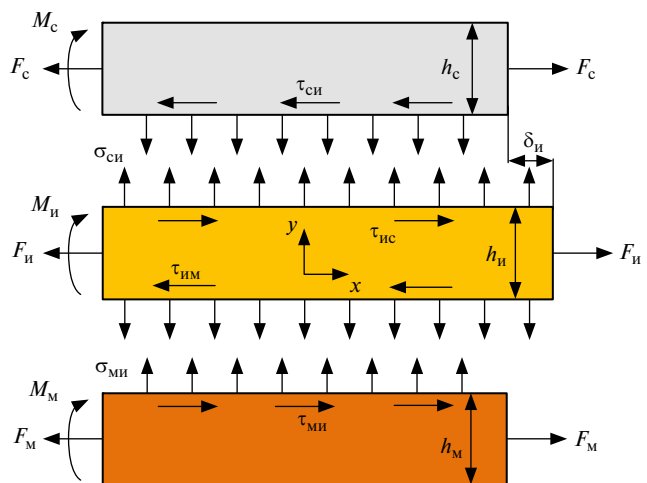


Рис. 1. Расчетная схема напряженного состояния:

$F_c, F_i, F_m$  — силы, действующие в сердечнике, изоляции и медном проводнике;  $M_c, M_i, M_m$  — изгибающие моменты в сердечнике, изоляции и медном проводнике;  $h_c, h_i, h_m$  — толщина слоя материала сердечника, изоляции, медного проводника;  $\tau_{\text{сн}}, \tau_{\text{ис}}, \tau_{\text{им}}, \tau_{\text{ми}}$  — касательные напряжения в контакте «сталь — изоляция», «изоляция — сталь», «изоляция — медный проводник», «медный проводник — изоляция»;  $\sigma_{\text{сн}}, \sigma_{\text{ми}}$  — нормальные напряжения в контакте «сталь — изоляция», «медный проводник — изоляция»

Поскольку отверждение пропиточного материала изоляции происходит при установившейся температуре, будем считать, что нормальные напряжения в контакте «сталь — изоляция» и «изоляция — медный проводник»  $\sigma_{\text{сн}} = \sigma_{\text{ми}} = \sigma_o$ , а касательные напряжения  $\tau_{\text{сн}} = \tau_{\text{ис}} = \tau_{\text{им}} = \tau_{\text{ми}} = 0$ .

Предполагая, что до момента времени  $t_0 = 0$  не произошло никакой деформации, и учитывая, что жесткость материала зависит от температуры и степени отверждения, напряжение в материале изоляции  $\sigma_o$  можно выразить с использованием принципа эквивалентности «время — температура» следующим образом [8]:

$$\sigma_o(t) = \int_0^t K_i \frac{\partial \delta_{\text{и}}}{\partial T} dt, \quad (10)$$

где  $K_i$  — матрица жесткости многослойного материала изоляции;  $\delta_{и}$  — деформация материала изоляции, м;  $T$  — температура, °С.

Анализ остаточных напряжений и деформации для несимметричных многослойных материалов с поперечными слоями дается далее на основе расчета химической и термической деформации на первом этапе. Продольную химическую деформацию можно принять равной нулю, поскольку волокна не испытывают химических деформаций в течение технологического цикла. Экспериментальные результаты показывают [14], что коэффициент теплового расширения  $\alpha$  не зависит от степени отверждения.

Термические остаточные напряжения в сочетании с механическими напряжениями, возникающими из-за приложенных извне нагрузок, могут вызвать преждевременное разрушение материала изоляции. Чтобы эффективно спроектировать его, необходим быстрый и точный метод оценки напряженного и деформационного состояний для различных граничных условий.

Баланс сил в материале изоляции будет равен

$$\sigma_{св}S_{св} + \sigma_{п}S_{п} = 0, \quad (11)$$

где  $\sigma_{св}$  и  $\sigma_{п}$  — предел прочности стекловолокна и пропиточного состава соответственно, Па;  $S_{св}$  и  $S_{п}$  — площадь сечения стекловолокна и пропиточного состава соответственно, м<sup>2</sup>.

Приравнявая деформации на единицу длины, получим

$$\frac{\sigma_{п}}{E_{п}} - \frac{\sigma_{св}}{E_{св}} = (\alpha_{п} - \alpha_{св})\Delta T, \quad (12)$$

где  $E_{п}$  и  $E_{св}$  — модули упругости пропиточного состава и стекловолокна соответственно, Па;  $\alpha_{п}$  и  $\alpha_{св}$  — коэффициенты теплового расширения пропиточного состава и стекловолокна соответственно, 1/°С.

Охлаждение материала изоляции до температуры отверждения или температуры, при которой происходит полное склеивание, вызывает сжимающее напряжение в стекловолокне, имеющем более низкий коэффициент теплового расширения, и растягивающее напряжение в пропиточном составе, который имеет более высокий коэффициент теплового расширения. Это напряжение пропорционально разнице в коэффициентах расширения, а также изменению температуры и модуля более высокого компонента расширения.

Из уравнения (12) получим выражение для определения значения напряжения в материале изоляции при отверждении пропиточного состава:

$$\sigma_{о} = (\alpha_{п} - \alpha_{св})\Delta TE_{п}. \quad (13)$$

Химическая усадка вызывает эффекты, аналогичные тепловому сжатию. В этом случае общая деформация материала изоляции  $\delta_{о}$  равна

$$\delta_{о} = \delta_{и}^x + \delta_{и}, \quad (14)$$

где  $\delta_{и}^x$  — химическая деформация усадки материала изоляции, м.

Предполагаем, что деформация изменяется линейно по толщине слоя материала изоляции. Имея из теории слоистого материала сведения об общих деформациях и напряжениях, вызванных процессом отверждения, нормальную нагрузку  $F_{и}$  и изгибающие моменты  $M_{м}$  и  $M_{с}$  найдем так:

$$F_{и} = \int_0^n \sigma_{о} dx; \quad (15)$$

$$M_{м} = M_{с} = \int_0^n \sigma_{о} x dx. \quad (16)$$

В конечном счете эти рассмотренные модели были объединены тремя связанными вычислительными модулями — мгновенной теплопроводностью, кинетикой отверждения и механическим вязкоупругим модулем. Учитывая, что выходные данные одних модулей считаются входными данными других, порядок загрузки этих модулей имеет решающее значение в модели. Остаточные напряжения и деформации изоляционного материала моделировались с использованием описанного выше вязкоупругого подхода и модифицированного метода расчета напряженно-деформированного состояния слоистых материалов, описанного в [4].

На рис. 2 представлен алгоритм работы модели определения остаточных напряжений и деформаций при отверждении материала изоляции ТЭД.

## РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Полученные термические остаточные напряжения для пропиточного компаунда Элпласт-180 ИД находятся в области не более 6,2 мПа, для пропиточного лака КО-916К до примерно 15,6 мПа в зависимости от конфигурации материала (рис. 3).

Как показано на рис. 3, механические напряжения в направлении осей  $x$  и  $y$  несут растягивающий характер из-за повышения температуры примерно до  $10 \times 10^3$  с и немного падают из-за снижения температуры в течение  $8 \times 10^3$  с. В процессе вычислений отмечено, что из-за реакции отверждения пропиточного компаунда в центральной точке появляется термический пик, наблюдаемый в первый и второй периоды выдержки цикла отверждения. В начале второй выдержки скорость уменьшения механических напряжений в направлении оси  $y$  быстрее, чем в направлении оси  $x$ , т.е. эффект химической усадки пропиточного состава начинает проявляться более явно. Величины сжимающих деформаций в центральной точке материала изоляции еще больше увеличиваются в процессе охлаждения.

Результаты моделирования в достаточной степени идентичны и совпадают с данными, полученными в [15]. Максимальное отклонение результатов не превышает 7,6 %. Это указывает на то, что модули теплопроводности и кинетики вполне соответствуют требованиям для оценки параметров материала изоляции во время его отверждения.

Качество изоляции обмоток ТЭД невозможно улучшить без модернизации технологии пропитки и сушки. Совершенствование этих операций и быстрое устранение технологических причин, приводящих к некачественной пропитке и сушке, за-

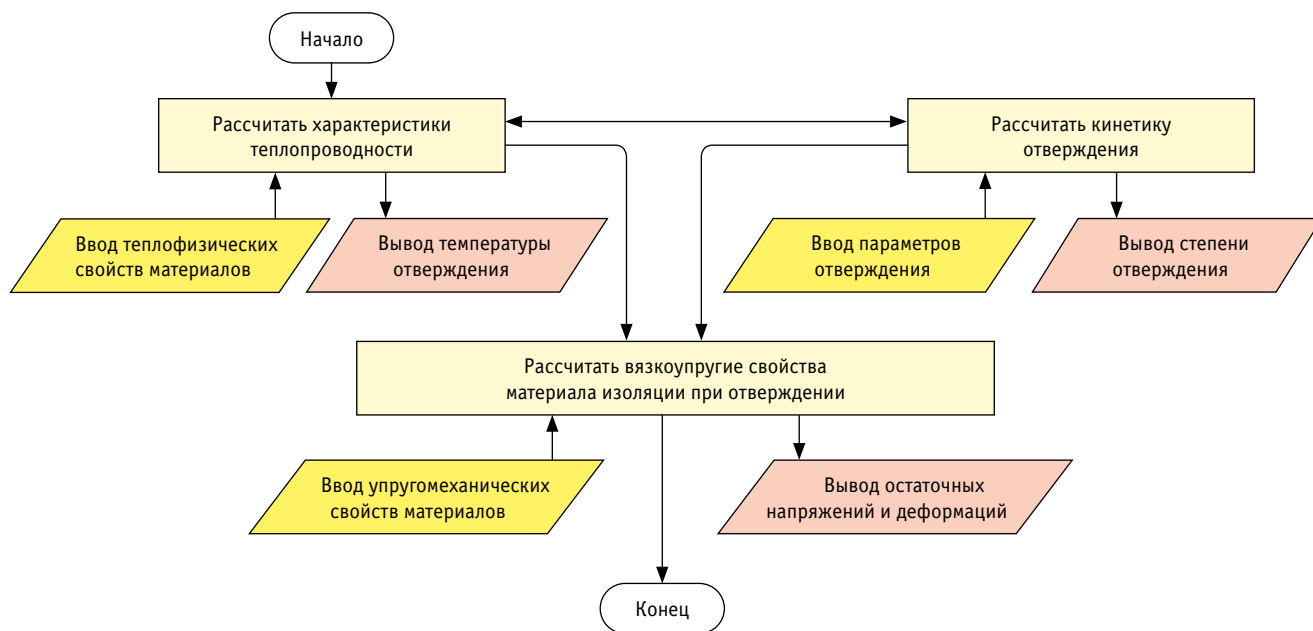


Рис. 2. Алгоритм моделирования остаточных напряжений и деформаций при отверждении пропиточного состава

висят от разработки и внедрения неразрушающих методов контроля качества. Например, авторами работы [5] сделана попытка создать точные и содержательные методы контроля качества пропитки.

Остаточные напряжения оказывают сильное воздействие на прочность материала изоляции, поэтому при эксплуатации ТЭД их прогнозирование в пропиточном составе и межфазной зоне имеет большое значение. Кроме того, сложное распределение остаточных напряжений в пропиточном составе может по-разному влиять на механические свойства обмоток ТЭД, что необходимо изучать в дальнейших исследованиях.

**ВЫВОДЫ**

Для оценки остаточных напряжений в процессе отверждения материала изоляции в первом приближении построена модель на основе данных о температуре, степени отверждения и механических деформациях.

Остаточные напряжения в стекловолкне и пропиточном составе исследованы с учетом вязкоупругого поведения про-

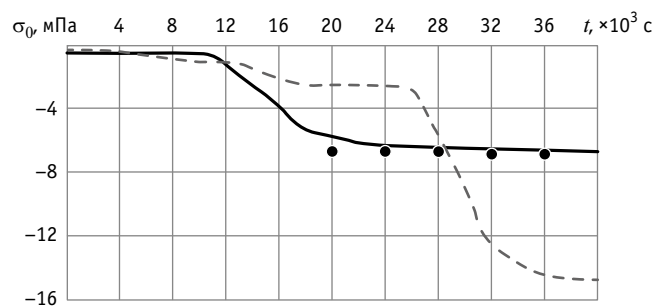


Рис. 3. Изменение остаточных напряжений в процессе отверждения: — для пропиточного компаунда Элпласт-180 ИД; - - - для пропиточного лака КО-916К; ● — экспериментальные данные согласно [12]

питочного состава. Предложенная модель проверена сравнением с экспериментальными результатами из литературных источников. Максимальная погрешность экспериментальных и аналитических расчетов составила не более 5,6 %.

**Сведения об авторе:**

**Марина Александровна Шрайбер**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Локомотивы и локомотивное хозяйство» Петербургского государственного университета путей сообщения Александра I

**Author's information:**

**Marina A. Shrayber**, PhD in Engineering, Associate Professor of Locomotive Facilities Department, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University

**Литература**

1. Albert C. Spring-in and warpage of angled composite laminates // *Composites Science and Technology*. 2002. 62 (14). Pp. 1895–1912. doi:10.1016/s0266-3538(02)00105-7.
2. Дудкин А. Н., Ким В. С., Мар'ин С. С. Исследование внутренних механических напряжений в пропиточных и заливочных лаках

**References**

1. Albert C. Spring-in and warpage of angled composite laminates. *Composites Science and Technology*. 2002. 62 (14). Pp. 1895–1912. doi:10.1016/s0266-3538(02)00105-7.
2. Dudkin A. N., Kim V. S., Mar'in S. S. Investigation of internal mechanical stresses in impregnating and filling varnishes [Issledovanie vnutren-

- // Известия Томского политехнического университета. 2005. Т. 308. № 7. С. 171–174. ISSN 2413-1830.
3. Кулезнев В. Н., Шершнева В. А. Химия и физика полимеров. Москва : Колос, 2007. 367 с.
  4. A thermo-viscoelastic model of process-induced residual stresses in composite structures with considering thermal dependence / A. Ding, S. Li, J. Sun, J. Wang, L. Zu // *Composite Structures*. 2016. 136. Pp. 34–43. doi:10.1016/j.compstruct.2015.09.014.
  5. Дульский Е. Ю., Степанов А. Р., Сердюкова Н. А. Технология упрочнения изоляции якорей тяговых двигателей тепловым излучением // *Транспорт: наука, образование, производство*. Воронеж, 2019. С. 25–29.
  6. Development of spring-in angle during cure of a thermosetting composite. *Composites Part A* / N. Ersoy, K. Potter, M. R. Wisnom, M. J. Clegg // *Applied Science and Manufacturing*. 2005. 36 (12). Pp. 1700–1706. doi.org/10.1016/j.compositesa.2005.02.013.
  7. Zhao L. G., Warrior N. A., Long A. C. A micromechanical study of residual stress and its effect on transverse failure in polymer-matrix composites // *International Journal of Solids and Structures*. 2006. 43 (18–19). Pp. 5449–5467. doi:10.1016/j.ijsolstr.2005.08.012.
  8. Takagaki K., Minakuchi S., Takeda N. Process-induced strain and distortion in curved composites. Part I: Development of fiber-optic strain monitoring technique and analytical methods. *Composites. Part A* // *Applied Science and Manufacturing*. 2017. 103. Pp. 236–251. doi:10.1016/j.compositesa.2017.09.020.
  9. Биргер И. А. Остаточные напряжения. Москва : Либроком, 2015. 234 с.
  10. Мищенко М. В., Портной А. Ю. Процессы старения электрической изоляции обмоток тяговых электродвигателей // *Молодая наука Сибири*. 2021. № 2 (12). С. 326–332. ISSN 2658-610X.
  11. Шрайбер М. А. Моделирование теплового состояния тяговых электродвигателей постоянного тока // *Бюллетень результатов научных исследований*. 2014. № 4 (13). С. 36–38. ISSN e2223-9987.
  12. Three-dimensional Cure Simulation of Stiffened Thermosetting Composite Panels / G. Yue, B. Zhang, F. Dai, S. Du // *Journal of Materials Science & Technology*. 2010. 26 (5). Pp. 467–471. doi.org/10.1016/S1005-0302(10)60074-6.
  13. Шрайбер М. А. Моделирование термомеханических напряжений в изоляции тягового электродвигателя переменного тока // *IV Бетанкуровский международный инженерный форум*. Санкт-Петербург : ПГУПС, 2022. С. 410–412.
  14. Gigliotti M., Wisnom M., Potter K. Development of curvature during the cure of AS4/8552 [0/90] unsymmetric composite plates // *Composites Science and Technology*. 2003. 63 (2). Pp. 187–197. doi:10.1016/s0266-3538(02)00195-1.
  15. Rai N., Pitchumani R. Optimal cure cycles for the fabrication of thermosetting-matrix composites // *Polymer Composites*. 1997. 18 (4). Pp. 566–581. doi.org/10.1002/pc.10309.
  - nikh mekhanicheskikh napryazheniy v propitochnykh i zalivochnykh lakakh]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*. 2005. Vol. 308. No. 7. Pp. 171–174. ISSN 2413–1830.
  3. Kuleznev V. N., Shershnev V. A. Chemistry and physics of polymers [Khimiya i fizika polimerov]. Moscow : The Ear, 2007. 367 p.
  4. Ding A., Li S., Sun J., Wang J., Zu L. A thermo-viscoelastic model of process-induced residual stresses in composite structures with considering thermal dependence. *Composite Structures*. 2016. 136. Pp. 34–43. doi:10.1016/j.compstruct.2015.09.014.
  5. Dulskiy E. Y., Stepanov A. R., Serdyukova N. A. Technology for strengthening the insulation of traction motor anchors by thermal radiation [Tehnologiya uprochneniya izolyatsii yakorey tyagovykh dvigateley teplovym izlucheniem]. *Transport: science, education, production*. Voronezh, 2019. Pp. 25–29.
  6. Ersoy N., Potter K., Wisnom M. R., Clegg M. J. Development of spring-in angle during cure of a thermosetting composite. *Composites Part A. Applied Science and Manufacturing*. 2005. 36 (12). Pp. 1700–1706. doi.org/10.1016/j.compositesa.2005.02.013.
  7. Zhao L. G., Warrior N. A., Long A. C. A micromechanical study of residual stress and its effect on transverse failure in polymer-matrix composites. *International Journal of Solids and Structures*. 2006. 43 (18–19). Pp. 5449–5467. doi:10.1016/j.ijsolstr.2005.08.012.
  8. Takagaki K., Minakuchi S., Takeda N. Process-induced strain and distortion in curved composites. Part I: Development of fiber-optic strain monitoring technique and analytical methods. *Composites. Part A. Applied Science and Manufacturing*. 2017. 103. Pp. 236–251. doi:10.1016/j.compositesa.2017.09.020.
  9. Birger I. A. Residual stresses [Ostatochnye napryazheniya]. Moscow : Librokom, 2015. 234 p.
  10. Mishhenkov M. V., Portnoy A. Yu. Aging processes of electrical insulation of traction electric motor windings [Protessy stareniya elektricheskoy izolyatsii obmotok tyagovykh elektrodvigateley]. *Young Science of Siberia*. 2021. No. 2 (12). Pp. 326–332. ISSN 2658–610X.
  11. Shrayber M. A. Thermal state modeling for traction DC motors [Modelirovanie teplovogo sostoyaniya tyagovykh elektrodvigateley postoyannogo toka]. *Bulletin of scientific research results*. 2014. No. 4 (13). Pp. 36–38. ISSN e2223–9987.
  12. Yue G., Zhang B., Dai F., Du S. Three-dimensional cure simulation of stiffened thermosetting composite panels. *Journal of Materials Science & Technology*. 2010. 26 (5). Pp. 467–471. doi.org/10.1016/S1005-0302(10)60074-6.
  13. Shrayber M. A. Simulation of thermomechanical stresses in the insulation of an AC traction motor [Modelirovanie termomekhanicheskikh napryazheniy v izolyatsii tyagovogo elektrodvigateleya peremennogo toka]. *IV Betancourt International Engineering Forum*. St. Petersburg : PSTU, 2022. Pp. 410–412.
  14. Gigliotti M., Wisnom M., Potter K. Development of curvature during the cure of AS 4/8552 [0/90] unsymmetric composite plates. *Composites Science and Technology*. 2003. 63 (2). Pp. 187–197. doi:10.1016/s0266-3538(02)00195-1.
  15. Rai N., Pitchumani R. Optimal cure cycles for the fabrication of thermosetting-matrix composites. *Polymer Composites*. 1997. 18 (4). Pp. 566–581. doi.org/10.1002/pc.10309.

Объем статьи 0,73 авторских листа



Научная статья  
УДК 656.132

## Методика разработки суточных планов интервалов движения пассажирских автотранспортных средств по городским регулярным маршрутам

Наталья Владимировна Якунина<sup>1</sup>, Николай Николаевич Якунин<sup>1</sup>,  
Кристина Алексеевна Паршакова<sup>1</sup>, Михаил Романович Янучков<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Оренбургский государственный университет, Оренбург, Россия

## Methodology for the development of daily interval plans for passenger vehicles on urban regular routes

Natalya V. Yakunina<sup>1</sup>, Nikolay N. Yakunin<sup>1</sup>, Kristina A. Parshakova<sup>1</sup>, Mikhail R. Yanuchkov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Orenburg State University, Orenburg, Russia

### Аннотация

В настоящее время эффективность влияния интервалов движения транспортных средств на транспортную работу должным образом не исследована. Кроме того, требуют дальнейшего изучения правила формирования периодов выполнения транспортной работы. В связи с этим актуальной становится разработка суточных планов интервалов движения пассажирских автотранспортных средств по городским регулярным маршрутам.

В статье предложена система критериев для объединения показателей процесса перевозок пассажиров в периоды суток. Эта система направлена на: минимизацию значения суммы разностей между скорректированным для разработки расписания и расчетным количеством автобусов с учетом работы на протяжении всех периодов суток; обеспечение значений коэффициентов использования вместимости, меньших либо равных единице. На основе системы критериев получен алгоритм разработки суточных планов интервалов движения автотранспортных средств по городским регулярным маршрутам. Установлены зависимости значений суммы разностей между скорректированным и расчетным количеством автобусов на протяжении всех периодов суток по маршруту от величины интервала корректировки. Зависимости имеют минимальный экстремум, свидетельствующий о наличии оптимального межпикового интервала.

**Ключевые слова:** автомобильный транспорт, пассажирские перевозки, интервалы движения, организация и технология перевозок

### Abstract

Currently, the effectiveness of the influence of vehicle movement intervals on transport work has not been properly investigated. In addition, the rules for the formation of periods for the performance of transport work require further study. In this regard, the development of daily interval plans for passenger vehicles on urban regular routes becomes relevant.

The article proposes a system of criteria for combining indicators of the passenger transportation process during periods of the day. This system is aimed at minimizing the value of the sum of the differences between the adjusted timetable and the estimated number of buses, taking into account work throughout all periods of the day, as well as ensuring the values of capacity utilization coefficients less than or equal to one. Based on the criteria system, an algorithm for developing daily interval plans for motor vehicles on urban regular routes has been obtained. The dependences have been established which demonstrate the sum values of the differences between the adjusted and calculated number of buses during all periods of the day along the route on the value of the adjustment interval. The dependencies have a minimum extremum, indicating the presence of an optimal peak interval.

**Keywords:** road transport, passenger transportation, traffic intervals, organization and technology of transportation

DOI: 10.20291/1815-9400-2024-1-41-47

### ВВЕДЕНИЕ

В Транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года поставлена задача по увеличению доли удовлетворения потребности населения в перемещениях с использованием автомобильного транспорта общего пользования. Такая задача повышает значимость автобусных перевозок и ответственность за их эффективность, например, при определении размера выпадающих доходов перевозчиков [1] при работе с использованием регулируемых тарифов в условиях брутто-модели. Спрос на регулярные перевозки с учетом распределения по часам суток является базисным параметром для последующих расчетов. Методики такого расчета традиционны и используются специалистами автомобильного транспорта. В результате рассчитывают количество транспортных средств на маршруте, их номинальную вместимость, интервалы движения, число рейсов, расписание движения и другие показатели. На рис. 1 показано распределение пассажиропотока по часам суток. Очевидно, что организовать процесс перевозок с переменным количеством автобусов по каждому часу затруднительно. Кроме того, разработать расписание движения транспортных средств в соответствии с приведенным распределением часового пассажиропотока из условия обеспечения требований к труду и отдыху водительского состава не представляется возможным. По этим основаниям рассчитанные значения количества автобусов объединяют в периоды суток.

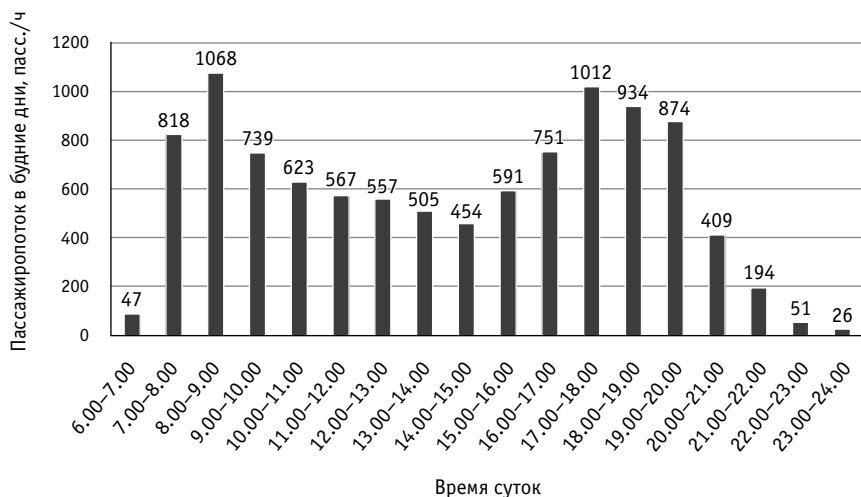


Рис. 1. Пример распределения пассажиропотока на маршруте по часам суток

Существует несколько возможных вариантов объединения показателя числа рассчитанных автобусов в периоды суток с пиковой нагрузкой от 3 до 11 ч/сут (изменение в 3,67 раза). При этом количество периодов суток различное, например, при интервале 6 мин оно равно 7, а при интервале 10 мин — 6. Возможно другое количество периодов суток (например, в субботах или воскресных днях либо в городах с активной курортной или туристической деятельностью). Эти данные позволяют сделать предположение о различных значениях транспортной работы для удовлетворения неизменного спроса на перевозку.

Из результатов выполненного анализа можно заключить, что в настоящее время эффективность влияния интервалов движения транспортных средств на транспортную работу должным образом не исследована. Кроме того, требуют дальнейшего изучения правила формирования периодов выполнения транспортной работы. В связи с этим актуальной становится методика разработки суточных планов интервалов движения пассажирских автотранспортных средств по городским регулярным маршрутам.

Цель работы состоит в удовлетворении спроса населения на перевозки посредством выполнения минимально необходимой транспортной работы автобусами по городским регулярным маршрутам с использованием суточных планов интервалов движения.

### ОБЗОР ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ

В данной области знаний проведено достаточное количество научных исследований, направленных на изучение основных показателей процесса перевозок, в том числе интервалов движения автобусов, которые для дальнейшего использования объединяют в периоды суток [2, 3].

В работе [2] проанализированы существующие методики расчета необходимого количества автобусов для городских маршрутов, определена актуальность задачи выбора автобусов разной номинальной вместимости при одновременном их использовании на регулярных городских маршрутах. Автор выделяет необходимость скорректированной методики, позволяющей рассчитать количество автобусов разных классов для одного городского маршрута. Даны рекомендации распределения подвижного состава по маршрутам.

В работе [4] представлен метод графоаналитического анализа при определении фактического количества автобусов на городском маршруте и распределении их по сменности. Автором учитывается распределение количества автобусов по периодам суток, минимальное число автобусов, которое необходимо иметь на маршруте исходя из максимально допустимого интервала движения в часы спада пассажиропотока с учетом коэффициента дефицита автобусов.

В статьях [5, 6] рассмотрена методика определения оптимального интервала движения маршрутных транспортных средств, базирующаяся на минимизации суммы затрат перевозчика и стоимости потерь времени пассажиров. В работе [6] авторами предложена модель определения оптимального интервала движения автотранспортных средств по маршрутам регулярных перевозок исходя из минимизации суммарных общественных затрат, приходящихся на одного пассажира. Схожие вопросы рассмотрены в работе [7], автором дана многокритериальная математическая модель проектирования перевозок, на основании которой поставленные задачи решаются путем распределения транспортных ресурсов между допустимыми маршрутами транспортной сети в соответствии с множеством критериев эффективности. Интервалы движения для каждого маршрута устанавливаются дифференцированно по периодам времени.

Известен и зарубежный опыт изучения данной проблемы. Например, в работах [8–11] рассматриваются модели, объединяющие этапы планирования и установки интервалов движения в сети транспорта общего пользования, в которых может быть задан минимальный и (или) максимальный интервал движения транспортных средств на городских маршрутах. По мнению авторов, эти этапы в значительной степени определяют обслуживание пассажиров и эксплуатационные расходы.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В нашем исследовании использованы общенаучные методы (анализ, синтез, математическая статистика, функциональный анализ), положения теории транспортных процессов и общедоступные программные продукты.

Технологические показатели городских пассажирских перевозок (интервал движения  $I$ , расчетное количество  $A_{расч}$  подвижного состава) определяются по формулам:

$$I = \frac{t_{об} \cdot 60}{A_{расч}}; A_{расч} = \frac{Q_{расч} \cdot t_{об}}{q}, \quad (1)$$

где  $t_{об}$  — время оборота на маршруте, ч;  $A_{расч}$  — расчетное количество автобусов, авт/ч;  $Q_{расч}$  — пассажиропоток по рассчитываемому часу, пасс./ч;  $q$  — номинальная вместимость транспортного средства, пасс.

С учетом требований нормативов качества обслуживания рассчитанный интервал движения  $I$  может быть изменен организатором перевозок, в результате значения интервалов корректируют и в соответствии с ними пересчитывают показатели перевозок. В этом случае максимальное  $A_{max}$  и минимальное  $A_{min}$  количество автобусов на маршруте определяют по зависимостям:

$$A_{max} = \frac{t_{об}}{I_{min}}; A_{min} = \frac{t_{об}}{I_{max}}, \quad (2)$$

где  $I_{max}$  и  $I_{min}$  — максимальное и минимальное значение интервалов движения в различные периоды суток, мин.

Объединение количества автобусов по периодам суток вызывает увеличение числа используемых автобусов  $A_{корр}$  в каждом часе, значение которого состоит из двух слагаемых: количества автобусов  $A_{расч}$  определенного из результатов расчета в соответствии с определенным пассажиропотоком, и количества автобусов  $A_{доп}$  дополняющего  $A_{расч}$  для обеспечения постоянного значения показателя  $A_{корр}$  в пределах периода суток. Необходимо отметить, что количество автобусов в каждом часе может корректироваться в соответствии со значением интервала движения (обычно уменьшаемым) в каждом периоде суток, определяемым на основании стандартов качества перевозок пассажиров.

В каждом часе расчетные значения количества автобусов  $A_{расч}$  как правило, разные, поэтому для обеспечения постоянства показателя  $A_{корр}$  количество дополняющих автобусов  $A_{доп}$  в час также отличается:

$$A_{доп} = A_{корр} - A_{расч} = \Delta A. \quad (3)$$

Суммирование значений  $A_{доп}$  на протяжении суток позволит определить условную величину количества привлеченных дополнительных автобусов  $A_{доп}$  за сутки.

Процесс перевозок организован эффективно при условии

$$\sum \Delta A \rightarrow \min. \quad (4)$$

На целевую функцию (4) необходимо наложить ограничения по условию удовлетворения транспортного спроса, оно может быть сформулировано в виде коэффициента использования вместимости транспортного средства в каждом часе суток  $\gamma_i$ , значение которого не должно превышать нормативное значение  $\gamma_{норм}$ , установленное стандартом качества перевозок пассажиров ( $\gamma_{норм} = 1$ ). С учетом ограничений выражение (4) преобразуется в критерий для объединения технологических показателей процесса перевозок пассажиров в периоды суток

$$\begin{cases} \sum \Delta A_i = \min \\ \gamma_i \leq 1 \end{cases}. \quad (5)$$

Объединение технологических показателей процесса перевозок пассажиров в периоды суток в соответствии с требованиями системы (5) позволяет решить задачу, состоящую в обеспечении наибольшей эффективности перевозок, что важно для перевозчиков и организаторов транспортного обслуживания населения, при одновременном удовлетворении транспортного спроса.

В работе использованы формулировки, требующие пояснений.

1. Суточный план интервалов движения пассажирских автотранспортных средств по городским регулярным маршрутам — это совокупность скорректированных интервалов движения автотранспортных средств по часам суток.

2. Скорректированный интервал движения — это интервал движения автотранспортных средств по маршруту, значение которого находится в пределах от максимального до минимального значений в различные периоды суток и изменяется в соответствии с определенным алгоритмом.

С учетом критерия (5) разработаны правила корректировки интервалов движения по периодам суток с использованием метода перебора. Правила состоят в расчете параметров процесса перевозок, отвечающих скорректированным интервалам движения, а также в сравнении полученных значений  $\sum \Delta A$  за сутки и выборе из полученных значений такого варианта, при котором будет выполнено условие (5). Соответствующее этому варианту распределение интервалов движения образует суточный план интервалов движения пассажирских автотранспортных средств по городским регулярным маршрутам.

На рис. 2 представлен алгоритм разработки суточных планов интервалов движения.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Расчеты выполнены на примере одного из существующих регулярных маршрутов. Номинальная вместимость автобуса — 89 пасс. Результаты расчета приведены в табл. 1.

Результаты получены при скорректированном оптимальном межпиковом интервале движения  $I = 9$  мин,  $I_{корр min} = 5$  мин,  $I_{корр max} = 30$  мин. Скорректированные интервалы движения  $I_{корр}$ , приведенные в табл. 1, представляют собой суточный план интервалов движения пассажирских автотранспортных средств по городскому регулярному маршруту.

Результат разработки суточного плана интервалов движения при оптимальном межпиковом интервале, равном 9 мин, представлен на рис. 3.

Аналогичные расчеты выполнены для десяти вариантов скорректированных интервалов (5–14 мин). На рис. 4 показана зависимость показателя  $\sum \Delta A$  от величины скорректированного интервала движения.

Функциональный анализ установленной зависимости позволил определить минимальное значение скорректированного интервала на рассматриваемом маршруте, равное 9,3 мин.

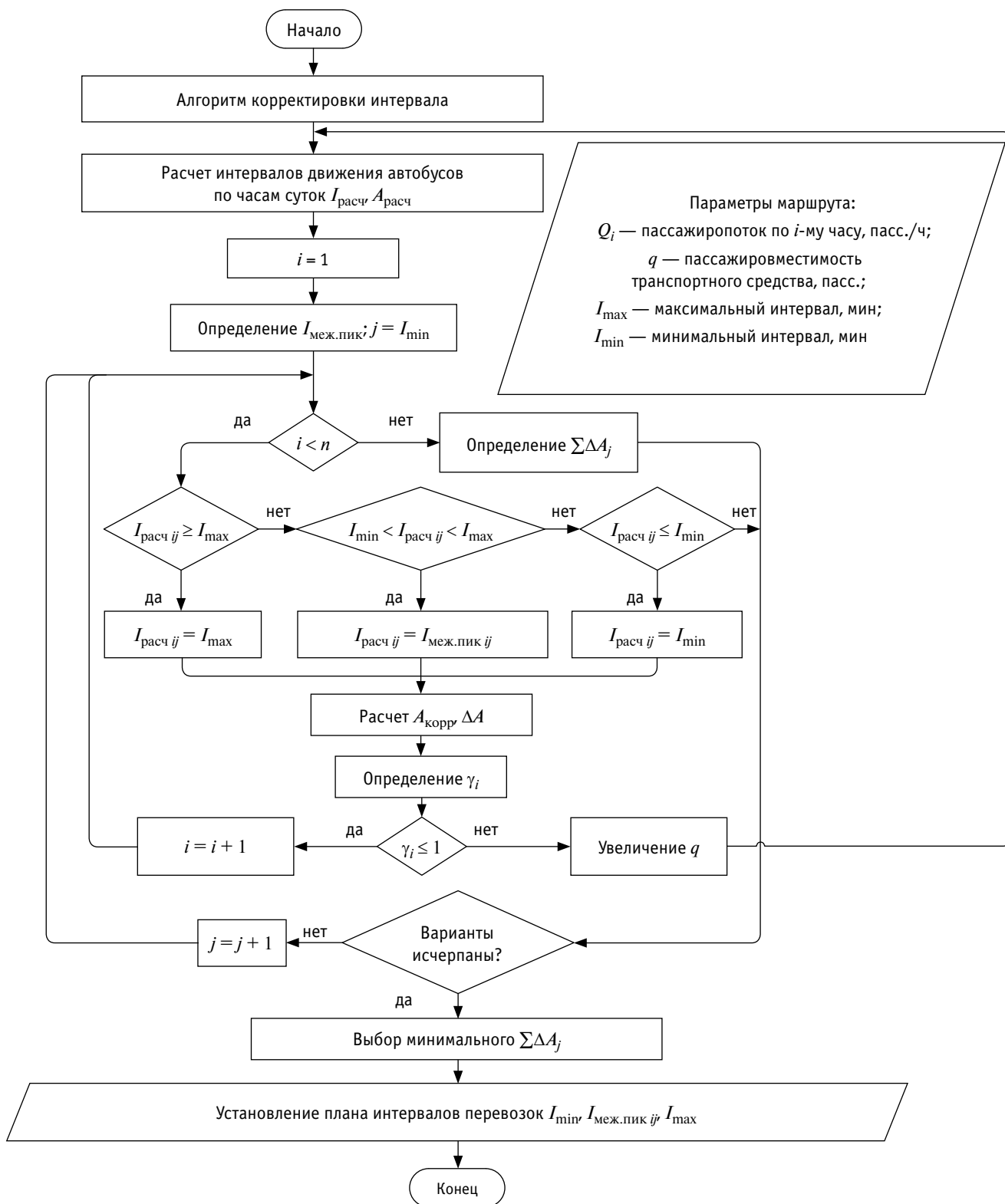


Рис. 2. Алгоритм разработки суточных планов интервалов движения

Таблица 1

Результаты расчета показателей транспортного процесса

Часы суток	$Q_{расч}$ , пасс./ч	$A_{расч}$ авт./ч	$I_{расч}$ мин	$I_{корр}$ мин	$A_{корр}$ авт./ч	$\Delta A = A_{корр} - A_{расч}$ авт./ч	$\gamma_{р}$ ед.
6.00–7.00	47	1	90	30	3	2	0,34
7.00–8.00	818	14	6	5	18	4	0,78
8.00–9.00	1068	18	5	5	18	0	1,00
9.00–10.00	739	13	7	5	18	5	0,73
10.00–11.00	623	11	8	5	18	7	0,62
11.00–12.00	567	10	9	9	10	0	1,00
12.00–13.00	557	10	9	9	10	0	1,00
13.00–14.00	505	9	10	9	10	1	0,90
14.00–15.00	454	8	11	9	10	2	0,80
15.00–16.00	591	10	9	9	10	0	1,00
16.00–17.00	751	13	7	5	18	5	0,73
17.00–18.00	1012	18	5	5	18	0	1,00
18.00–19.00	934	16	6	5	18	2	0,89
19.00–20.00	874	15	6	5	18	3	0,84
20.00–21.00	409	7	13	9	10	3	0,70
21.00–22.00	194	4	23	9	10	6	0,40
22.00–23.00	51	1	90	30	3	2	0,34
23.00–24.00	26	1	90	30	3	2	0,34
Итого	10220				223	44	
Среднее значение							0,75

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В результате выполненных исследований получена методика разработки суточных планов интервалов движения пассажирских автотранспортных средств по городским регулярным маршрутам. Создан инструментарий организации перевозок пассажиров, которая позволяет удовлетворять спрос населения при выполнении минимально необходимой транспортной работы. Основным фактором для такой организации перевозок служит суточный план интервалов движения. Полученные результаты вносят определенный вклад в развитие технологии транспортных процессов, который выражается в оценке влияния интервалов движения транспортных средств на транспортную работу.

Составление и выполнение на практике полученного по приведенному примеру плана позволило при числе перевезенных за сутки пассажиров, равном 10220, сократить количество рейсов с 279 (при скорректированном интервале движения 5 мин) до 223 (при скорректированном интервале 9 мин). Снижение транспортной работы составило 20 %.

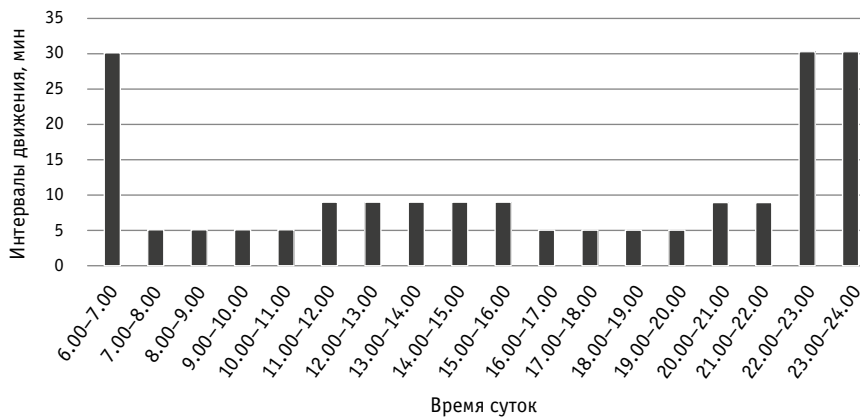


Рис. 3. Результат разработки суточного плана интервалов движения

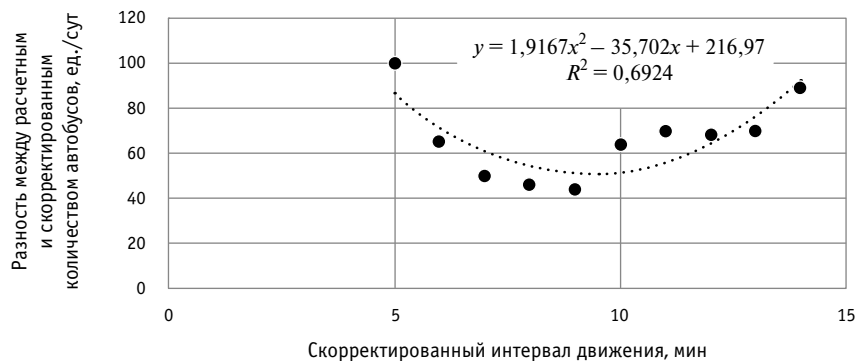


Рис. 4. Зависимость показателя  $\Sigma \Delta A$  от величины скорректированного интервала движения



В результате выполненного исследования получен критерий для объединения показателей процесса перевозок пассажиров в периоды суток, направленный на минимизацию суммы разностей между скорректированным для разработки расписания и расчетным количеством автобусов с учетом работы на протяжении всех периодов суток, а также на достижение значений коэффициентов использования вместимости, меньших либо равных единице. На основе этого критерия создан алгоритм разработки суточных планов интервалов движения автотранспортных средств по городским регулярным маршрутам. Установлена зависимость суммы разностей между скорректированным и расчетным количеством автобусов на про-

тяжении всех периодов суток по маршруту от величины интервала корректировки. Зависимость имеет минимальный экстремум, что свидетельствует о наличии оптимального межпикового интервала.

Практическая значимость исследования заключается в возможности разрабатывать суточные планы интервалов движения автотранспортных средств по городским регулярным маршрутам. Использование представленной методики позволяет снизить транспортную работу на 20 %. Дальнейшие исследования авторов будут направлены на развитие методики, в том числе за счет введения в ее структуру новых показателей процесса перевозок.

#### Сведения об авторах:

**Наталья Владимировна Якунина**, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры автомобильного транспорта Оренбургского государственного университета

**Николай Николаевич Якунин**, член-эксперт Общественного совета при Минтрансе России, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой автомобильного транспорта Оренбургского государственного университета

**Кристина Алексеевна Паршакова**, ассистент кафедры автомобильного транспорта Оренбургского государственного университета

**Михаил Романович Янучков**, кандидат технических наук, доцент кафедры автомобильного транспорта Оренбургского государственного университета

#### Authors information:

**Natalya V. Yakunina**, DSc in Engineering, Associate Professor, Professor of Road Transport Department, Orenburg State University

**Nikolay N. Yakunin**, Expert Member of the Public Council of the Ministry of Transport of the Russian Federation, DSc in Engineering, Professor, Head of Road Transport Department, Orenburg State University

**Kristina A. Parshakova**, Assistant Lecturer of Road Transport Department, Orenburg State University

**Mikhail R. Yanuchkov**, PhD in Engineering, Associate Professor of Road Transport Department, Orenburg State University

## Литература

1. Любимов И. И., Якунин Н. Н., Якунина Н. В. Анализ моделей взаимодействия субъектов пассажирских автомобильных перевозок // Вестник СибАДИ. 2022. Т. 19. № 6 (88). С. 878–889. DOI: 10.26518/2071-7296-2022-19-6-878-889.
2. Яценко С. А. Анализ методик расчета потребности автобусов для городских маршрутов // Вестник ИрГТУ. 2016. № 5 (112). С. 193–202. DOI: 10.21285/1814-3520-2016-5-193-202.
3. Якунина Н. В. Методология повышения качества перевозок пассажиров автомобильным транспортом по регулярным маршрутам. Оренбург : Университет, 2015. 262 с.
4. Рябов И. М., Кашманов Р. Я. Совершенствование организации обслуживания пассажиров на маршруте путем использования автобусов разной вместимости // Вестник СибАДИ. 2019. Т. 16. № 3 (67). С. 264–275. ISSN 2071-7296.
5. Аземша С. А., Старовойтов А. Н., Скирковский С. В. Оптимизация интервалов движения транспортных средств при городских перевозках пассажиров в регулярном сообщении // Вестник Белорусского государственного университета транспорта: наука и транспорт. 2013. № 2 (27). С. 52–57. ISSN 2227-1120.
6. Якунин Н. Н., Паршакова К. А., Якунина Н. В. Моделирование оптимального интервала движения пассажирских автотранспортных средств // Интеллект. Инновации. Инвестиции. 2018. № 3. С. 84–89. ISSN 2077-7175.
7. Фадеев А. И., Ильянков А. М., Укадеров В. В. Распределение корреспонденций по сети в задачах проектирования перевозок городским пассажирским транспортом общего пользо-

## References

1. Lyubimov I. I., Yakunin N. N., Yakunina N. V. Analysis for models of interaction between road passenger transport operators [Analiz modeley vzaimodeystviya sub'ektov passazhirskikh avtomobil'nykh perevozok]. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2022. Vol. 19. No. 6 (88). Pp. 878–889. DOI: 10.26518/2071-7296-2022-19-6-878-889.
2. Yatsenko S. A. Analysis of methods to calculate bus demand for urban routes [Analiz metodik rascheta potrebnosti avtobusov dlya gorodskikh marshrutov]. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2016. No. 5 (112). Pp. 193–202. DOI: 10.21285/1814-3520-2016-5-193-202.
3. Yakunina N. V. The methodology for improving the quality of transportation of passengers by public motor transport on regular routes [Metodologiya povysheniya kachestva perevozok passazhirov avtomobil'nyim transportom po regulyarnym marshrutam]. Orenburg : University, 2015. 262 p.
4. Ryabov I. M., Kashmanov R. Ya. Improving the organization of passenger service on the route by using buses of different capacity [Sovershenstvovanie organizatsii obluzhivaniya passazhirov na marshrute putem ispol'zovaniya avtobusov raznoy vmestimosti]. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2019. Vol. 16. No. 3 (67). Pp. 264–275. ISSN 2071-7296.
5. Azemsha S. A., Starovoytov A. N., Skirkovskiy S. V. Optimization of vehicles movements intervals at passengers city transportations in the regular message [Optimizatsiya intervalov dvizheniya transportnykh sredstv pri gorodskikh perevozkakh passazhirov v regulyarnom soobshhenii]. *Bulletin of BSUT: science and transport*. 2013. No. 2 (27). Pp. 52–57. ISSN 2227-1120.
6. Yakunin N. N., Parshakova K. A., Yakunina N. V. Modeling of optimal interval movement of passenger vehicles [Modelirovanie optimal'nogo intervala dvizheniya passazhirskikh avtotransportnykh sredstv]. *Intellect. Innovations. Investments*. 2018. No. 3. Pp. 84–89. ISSN 2077-7175.
7. Fadeev A. I., Iliankov A. M., Ukaderov V. V. Correspondence distribution over a network in designing public urban passenger transportation tasks

вания // Вестник СибАДИ. 2023. Т. 20. № 3 (91). С. 362–386. DOI: 10.26518/2071-7296-2023-20-3-362-386.

8. López-Ramos F. Integrating network design and frequency setting in public transportation networks: a survey // SORT. 2014. Vol. 38. Issue 2. Pp. 181–214.
9. Van Nes R., Hamerslag R., Immers B. H. Design of Public Transport Networks // Transportation Research Record 1202. 1988. Pp. 74–83.
10. Noor M. A., Shaymaa F. B. Study the characteristics of public bus routes in Al Kut City // Journal of Engineering and Sustainable Development 25 (Special). 2021. Pp. 186–194.
11. Desaulniers G., Hickman M. Public transit // Hand-books in Operation Research and Management Science: Transportation. 2007. Vol. 14. Pp. 69–120.

[Распределение корреспондентсий по сети в задачах проектирования перевозок городским пассажирским транспортом обшheго пользования]. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2023. Vol. 20. No. 3 (91). Pp. 362–386. DOI: 10.26518/2071-7296-2023-20-3-362-386.

8. López-Ramos F. Integrating network design and frequency setting in public transportation networks: a survey. *SORT*. 2014. Vol. 38. Issue 2. Pp. 181–214.
9. Van Nes R., Hamerslag R., Immers B. H. Design of Public Transport Networks. *Transportation Research Record 1202*. 1988. Pp. 74–83.
10. Noor M. A., Shaymaa F. B. Study the characteristics of public bus routes in Al Kut City. *Journal of Engineering and Sustainable Development 25 (Special)*. 2021. Pp. 186–194.
11. Desaulniers G., Hickman M. Public transit. *Hand-books in Operation Research and Management Science: Transportation*. 2007. Vol. 14. Pp. 69–120.

Объем статьи 0,69 авторских листа

Научная статья  
УДК 621.43.013

## Теоретические исследования изменения коэффициента избытка воздуха и свободного кислорода в отработавших газах автомобиля

Александр Владимирович Гриценко<sup>1, 2</sup>, Константин Вячеславович Глемба<sup>1, 2</sup>, Александр Владимирович Старунов<sup>2</sup>, Александр Сергеевич Меньшенин<sup>2</sup>, Степан Андреевич Чокой<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), Челябинск, Россия

<sup>2</sup>Южно-Уральский государственный аграрный университет, Челябинск, Россия

## Theoretical studies into the changes in the coefficient of excess air and free oxygen in the exhaust gases of the car

Alexander V. Gritsenko<sup>1, 2</sup>, Konstantin V. Glemba<sup>1, 2</sup>, Alexander V. Starunov<sup>2</sup>, Alexander S. Menshenin<sup>2</sup>, Stepan A. Chokoy<sup>2</sup>

<sup>1</sup>South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

<sup>2</sup>South Ural State Agrarian University, Chelyabinsk, Russia

### Аннотация

Теоретический анализ позволил определить эффективность работы каталитического нейтрализатора в районе стехиометрического состава смесей. При этом работа систем двигателя внутреннего сгорания обеспечивала наибольшую эффективность степени очистки отработавших газов, длительный срок службы каталитического нейтрализатора, свечей зажигания, топливных форсунок. Выявлены диагностические параметры, чувствительные к изменению уровня токсичности в процессе контроля экологических показателей, обоснованы диапазоны максимального изменения таких параметров, определены возможные их корреляции, проанализированы зоны их взаимовлияния и установлены границы их изменения.

**Ключевые слова:** двигатель, диагностирование, каталитический нейтрализатор, частота вращения, свеча зажигания, пропускная способность выпускного тракта

### Abstract

The theoretical analysis made it possible to determine the efficiency of the catalytic converter in the field of the stoichiometric composition of the mixtures. At the same time, the operation of the internal combustion engine systems ensures the highest efficiency of the exhaust gas purification degree, a long lifespan of the catalytic converter, spark plugs, and fuel injectors. The article identifies some diagnostic parameters that are sensitive to changes in the level of toxicity in the process of monitoring environmental indicators. The ranges of maximum variation for such parameters are validated, their possible correlations are determined, the zones of their mutual influence are analyzed and the boundaries of their change are established.

**Keywords:** engine, diagnostics, catalytic converter, rotation speed, spark plug, exhaust duct capacity

DOI: 10.20291/1815-9400-2024-1-48-54

### ВВЕДЕНИЕ

Современный автотранспорт развивается по принципу минимизации причинения ущерба экологии [1, 2]. Для этого с 1993 г. разрабатываются экологические стандарты [3–5]. Так, в 1993, 1997, 2001, 2006, 2011 и 2015 гг. были введены стандарты [6–8], которые ограничили нормы выбросов отработавших газов (ОГ) по некоторым компонентам в 5–10 раз [9–11], что сформировало требования к современным системам и узлам автомобилей [12–14]. В настоящее время готовится очередной стандарт — Евро-7, который планируют принять в 2025 г. [15, 16]. Главным образом он ограничит выбросы CO<sub>2</sub> (по предварительным данным, до 30–100 г/км в зависимости от категории автомобиля) [17–19]. Предполагается, что стандартом Евро-7 будут установлены требования к внедрению еще более эффективных и передовых технологий очистки, таких как улучшенные системы селективной каталитической очистки и восстановления твердых частиц, а также другие инновационные решения [20, 21]. Кроме того, Евро-7 потребует развития электрических и гибридных технологий, как более экологически чистых и имеющих низкие либо нулевые выбросы (без учета вырабатываемой электроэнергии для зарядки аккумуляторов, территориально расположенной на значительном удалении) [22–24].

Перечислим основные направления развития экологических стандартов.

1. Уменьшение норм токсичности и экологический контроль транспорта. Под постоянным контролем будут находиться важнейшие показатели токсичности ОГ, такие как CO, CO<sub>2</sub>, CH, O<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, а также твердые частицы PM. Ужесточенные нормы будут устанавливаться постепенно, и автопроизводители будут вынуждены разрабатывать и внедрять новые технологии, чтобы соответствовать этим требованиям.

2. Повышение эффективности топлива, в том числе улучшение энергоэффективности автомобилей и снижение потребле-

ния топлива. Экономичность может быть достигнута на основе разработки более эффективных двигателей, оптимизации аэродинамики автомобилей, совершенствования систем управления двигателем и внедрения гибридных и электрических технологий.

3. Стимулирование использования низкоэмиссионных автомобильных систем. Для снижения воздействия автотранспорта на окружающую среду поощряется применение низкоэмиссионных и альтернативных видов транспорта — электро- и водородных автомобилей. Внедрение соответствующей инфраструктуры, предоставление льгот и субсидий для покупки и использования таких автомобилей будет служить стимулом для развития экологически более чистых технологий.

4. Инновации в области автомобильных технологий. Развитие стандартов экологичности способствует инновациям и разработке новых технологий в автомобильной индустрии. Инновационные технологии включают в себя: улучшение систем очистки выхлопов, внедрение более эффективных систем рециркуляции отработавших газов и селективной каталитической очистки, развитие батарей и систем хранения энергии для электрических автомобилей, а также автономные и связанные сети дорог, которые могут оптимизировать поток движения и уменьшить автомобильные пробки, что также способствует снижению выхлопов.

В целом развитие стандартов экологичности направлено на создание более чистого, эффективного и устойчивого автотранспорта для снижения вредного воздействия на окружающую среду и улучшения качества воздуха в городах [18, 19]. В России с января 2016 г. действует стандарт Евро-5 (рис. 1), введение которого было оправдано в тот момент, когда значительными темпами шло обновление модельного ряда и утилизировался морально изношенный автопарк. Что касается стандарта Евро-6, его внедрение предполагалось осуществить в 2021–2023 гг., однако в связи с объективной ситуацией в нашей стране это оказалось преждевременным [17]. В перспективе на ближайшие 5 лет при техническом прорыве в области автомобилестроения возможен переход на стандарт Евро-6, одна-

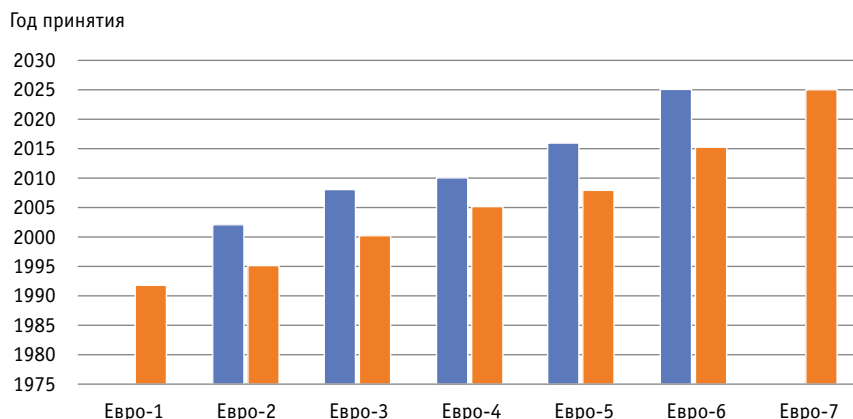


Рис. 1. Введение экологических стандартов Евро в странах Евросоюза и в Российской Федерации: ■ — Россия; ■ — Европа

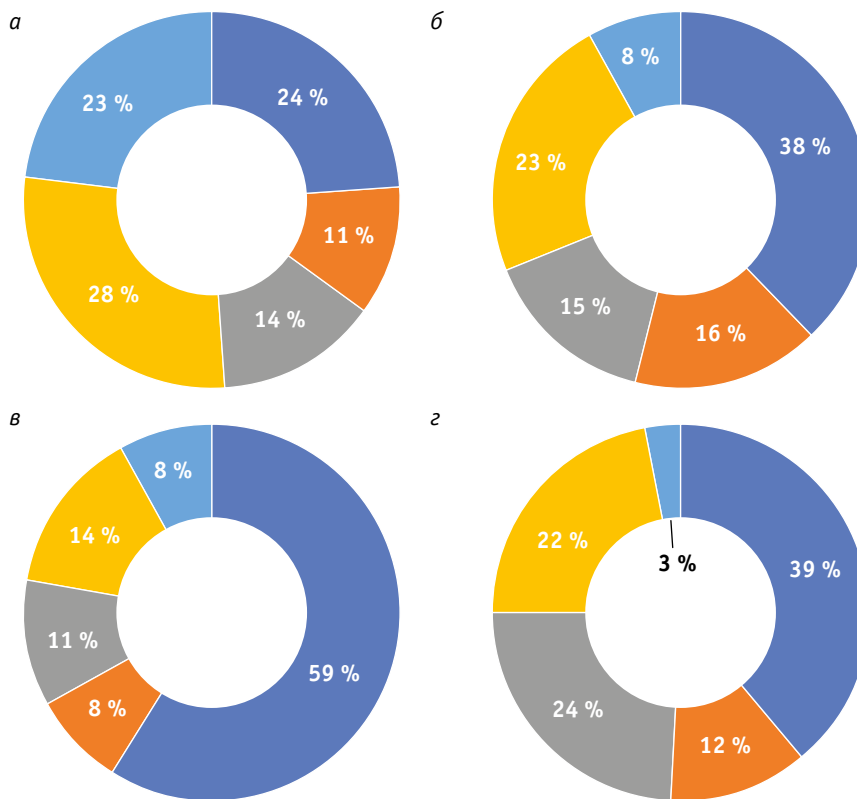


Рис. 2. Структура автомобильного парка России в соответствии с нормами токсичности (данные аналитического агентства «АВТОСТАТ»): а — легковые автомобили; б — легкие коммерческие; в — грузовые; г — автобусы; ■ — ниже Евро-2; ■ — Евро-2; ■ — Евро-3; ■ — Евро-4; ■ — Евро-5 и выше

ко исходя из анализа ряда исследований этот переход может затянуться на 10 лет и более [10, 11], а реализация стандарта Евро-7 откладывается на неопределенный срок [7, 8].

Отметим, что переход на стандарт Евро-6 в России осложняется несколь-

кими факторами. Во-первых, в стране длительное время был разрешен выпуск автомобилей с устаревшими технологиями, это привело к тому, что значительная доля автопарка не соответствует требованиям Евро-6 (рис. 2). Во-вторых, переход на более строгие стандарты требует

больших инвестиций как со стороны автопроизводителей, так и со стороны потребителей. Например, по данным аналитического агентства «АВТОСТАТ», на начало 2021 г. значительную часть парка автомобилей, эксплуатируемых в России, составляли транспортные средства, соответствующие стандарту ниже Евро-2. Среди всех категорий только в сегменте легковых автомобилей количество машин, отвечающих стандарту Евро-5, выше и составляет около 22,6 %, в остальных категориях этот показатель не более 8 %.

Чтобы стимулировать переход на стандарт Евро-6, в России разработаны различные меры и инструменты. Например, с 1 января 2021 г. введена так называемая экологическая скидка на приобретение новых автомобилей, соответствующих Евро-6 [17, 19], что позволяет получить скидку при сдаче в утиль автомобиля, не отвечающего нормам Евро-5 и стандартов более низкого уровня [18]. Однако переход на Евро-6 требует времени, обновления автопарка, развития инфраструктуры и поддержки со стороны государства. В настоящее время Россия планирует перейти на стандарт Евро-6 поэтапно, и с 1 января 2023 г. новые автомобили, поставляемые на отечественный рынок, должны соответствовать Евро-6. При этом существующий автопарк будет постепенно обновляться и модернизироваться. Длительный переход на стандарт Евро-6 объясняется не только техническими и экономическими факторами, но также потребностью сбалансированного подхода, чтобы минимизировать негативное влияние на автомобильную промышленность и общественность в целом. Это требует тщательного планирования, регулирования и поэтапного внедрения новых норм для обеспечения устойчивого развития автомобильного сектора.

В Европе и Америке уже принято решение о введении до 2025 г. стандарта Евро-7, который предполагает значительное использование гибридной техники и электропривода. Тем не менее в ближайшие годы ожидается острый дефицит на основные компоненты электротранспорта, удорожание себестоимости их разработки и производства. Все это свидетельствует о невозможности быстрого внедрения электротранспорта, и пока в большинстве стран мира он об-

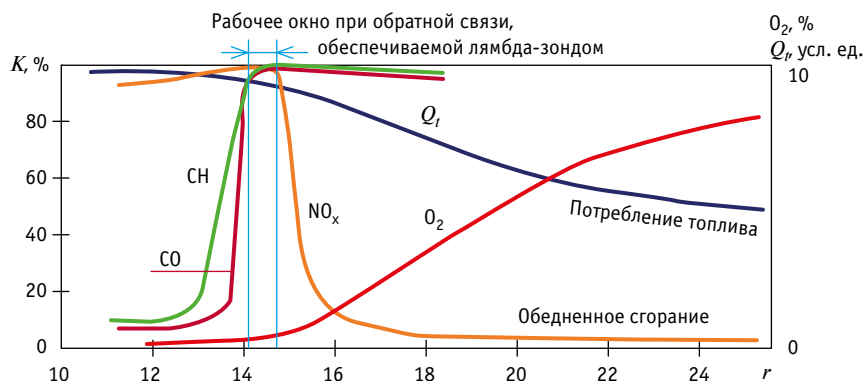


Рис. 3. Зависимость степени эффективности  $K$  преобразования современными каталитическими нейтрализаторами параметров токсичности  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}$ ,  $\text{NO}_x$ , уровня свободного кислорода  $\text{O}_2$  и расхода топлива  $Q_i$  от соотношения «воздух — топливо»  $r$

новляется стихийно, часто без привязки к какой-либо объективной стратегии развития. Перевод всего автотранспорта на электрический привод смещен на 2040 г., хотя еще 5 лет назад активно продвигалась идея его обновления до 2030 г. [19].

### ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Главными задачами теоретических исследований, представленных в статье, являются установление четких границ пределов работоспособности автомобильных двигателей внутреннего сгорания (ДВС); определение допустимых пределов изменения параметров токсичности при изменении коэффициента избытка воздуха; изучение границ возможных режимов работы ДВС; определение зон максимального изменения параметров токсичности и ожидаемого влияния на них неисправностей системы зажигания и системы топливоподдачи. Эти задачи требуют всестороннего рассмотрения теории процесса выпуска ОГ. На начальном этапе проанализируем зависимость степени эффективности преобразования параметров токсичности ОГ бензиновых ДВС от соотношения «воздух — топливо» (рис. 3).

Анализ рис. 3 показывает, что особенно высокая эффективность степени преобразования основных токсичных компонентов бензинового ДВС, таких как  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}$ ,  $\text{NO}_x$ , достигается в зоне значений показателя  $r = 14,8$ , т.е. преобладающая часть современных каталитических нейтрализаторов работает с наибольшей эффективностью в зоне стехиометрического состава смеси. Однако современные ДВС работают в зоне как богатых, так и бедных (сверхбедных)

смесей. Из рис. 3 видно, что при смещении в зону богатых смесей (влево) концентрация свободного кислорода достигает минимума, степень преобразования параметров токсичности  $\text{CO}$  и  $\text{CH}$  также достигает минимума (ниже 10 %), а у  $\text{NO}_x$ , наоборот, эффективность преобразования высокая (на уровне 93 %). Кроме того, в зоне богатых смесей наблюдается чрезмерно повышенный расход топлива. Смещение вправо от рабочего окна (в зоне стехиометрической смеси) сопровождается приемлемой эффективностью степени преобразования  $\text{CO}$  и  $\text{CH}$  на фоне заметного падения эффективности преобразования компонента  $\text{NO}_x$ , который в рабочем диапазоне  $r = 16-26$  находится на уровне 2–3 %. При этом в зоне  $r = 16-26$  наблюдается заметное увеличение концентрации свободного кислорода в выхлопных газах и снижение расхода топлива на уровне 50 % от расхода топлива в зоне богатых топливно-воздушных смесей (ТВС). Именно существенное снижение расхода топлива стимулирует развитие ДВС, работающих на бедных и сверхбедных ТВС.

На рис. 4 представлена зависимость, которая показывает взаимосвязь изменения токсичных компонентов ОГ и уровня коэффициента избытка воздуха при работе ДВС на составах ТВС как в области послыонного смесеобразования, так и на бедной гомогенной смеси. Из рис. 4 видно, что максимальное содержание  $\text{NO}_x$  находится в диапазоне  $\alpha = 1,2-1,4$ . Максимум содержания  $\text{CO}$  и  $\text{CH}$  приходится на богатые смеси в начале характеристики при  $\alpha = 0,5-0,6$ . При смещении в диапазон бедных и сверхбедных смесей в зави-



симости от варианта применяемого смесиобразования концентрация  $NO_x$  может существенно изменяться и на протяжении участка обеднения (при  $\alpha = 1,3-3,0$ ) плавно уменьшаться до предела возможного воспламенения ТВС.

Послойное смесиобразование характеризуется более высоким содержанием  $NO_x$ , а присутствие бедных гомогенных смесей и однородных гомогенных смесей приводит к минимизации выбросов  $NO_x$ . Правильный подбор и вариация режимов работы позволяют снизить выбросы  $NO_x$  до минимума и повысить эффективность ДВС.

От того, какая цель преследуется разработчиками автотранспортных ДВС, можно выбрать участок, соответствующий характеристике, представленной на рис. 5.

Как видно из рис. 5, в зоне богатых смесей мощность и экономичность находятся на низком уровне. Однако при смещении в зону обогащенной смеси мощность достигает максимума, а экономичность постепенно увеличивается, доходя до максимума в промежутке между нормальной и обедненной ТВС. В зоне нормальной ТВС наблюдаются плавное уменьшение мощности, но приемлемая экономичность. Поэтому с точки зрения реализации максимальной мощности и максимальной экономичности нужно стремиться к диапазону обогащенной и нормальной смеси. В зоне бедной и сверхбедной смеси мощность и экономичность ДВС резко снижаются.

Рассмотрим особенности изменения мощности и экономичности бензиновых ДВС. Из рис. 6 видно, что максимум мощности приходится на диапазон  $\alpha = 0,8-1,0$ , а смещение в диапазон бедных смесей сопровождается ее динамичным снижением. В то же время минимальное значение  $G_e$  наблюдается при  $\alpha = 1,05$ . Отметим, что руководства по эксплуатации рекомендуют использовать автотранспортные ДВС в диапазоне  $\alpha = 1-1,1$ , где обеспечивается наименьший удельный расход топлива.

Особый интерес представляет взаимовлияние различных компонентов токсичности ОГ (рис. 7).

На рис. 7 выделены три участка: зона богатой смеси при  $\alpha < 1$ , сбалансированный стехиометрический состав смеси при  $\alpha = 1$ , зона бедной смеси при  $\alpha > 1$ . Значения

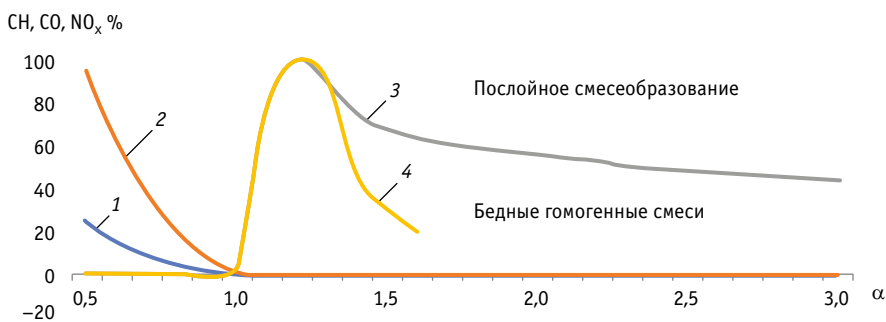


Рис. 4. Взаимосвязь процентного содержания токсичных компонентов ОГ и коэффициента избытка воздуха  $\alpha$ : 1 — CH; 2 — CO; 3 —  $NO_x$  (послойное смесиобразование); 4 —  $NO_x$  (бедная гомогенная смесь)

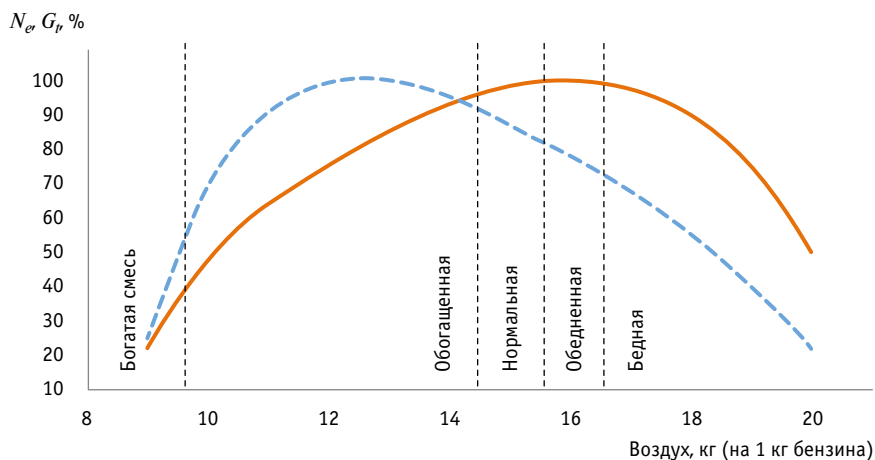


Рис. 5. Зависимость мощности  $N_e$  и экономичности  $G_e$  бензинового двигателя от соотношения ТВС:

— — — мощность; — — — экономичность

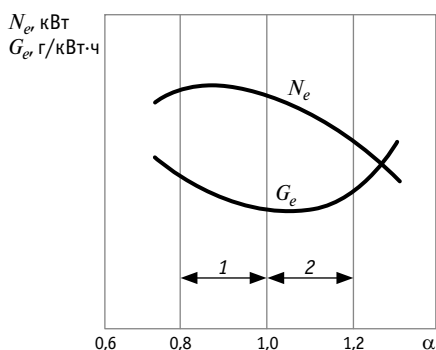


Рис. 6. Взаимосвязь мощности  $N_e$  развиваемой двигателем, и удельного расхода топлива  $G_e$  с коэффициентом избытка воздуха  $\alpha$ : 1 и 2 — зоны работы на богатой и бедной ТВС соответственно

мощности, максимальные в зоне богатых смесей, по мере смещения в сторону бедных смесей (вправо) постепенно снижаются, что объясняется ростом концен-

трации свободного кислорода при относительно малом количестве подаваемого топлива. В условиях бедной смеси реакции процесса сгорания замедляются, возникают зоны и небольшие периферийные участки камеры сгорания, в которых процесс сгорания может существенно нарушаться, а дальнейшее переобеднение за диапазон  $\alpha = 1-1,3$  приводит к границе воспламенения ТВС, где процесс сгорания невозможен.

Проанализируем отдельные составляющие токсичности, представленные на рис. 7. Показатель CO достигает максимальных значений в зоне богатых смесей при  $\alpha < 1$  и резко снижается по мере приближения к точке  $\alpha = 1$ , после чего наблюдается его незаметное, почти линейное снижение во всем диапазоне до границ предела воспламеняемости ТВС. При современном уровне развития антитоксичных систем определенную сложность

для качественного преобразования токсичных компонентов ОГ представляет начальная характеристика работы ДВС (запуск и прогрев), когда возможно отсутствие обратной связи или условий для качественного процесса сгорания. Однако дальнейший диапазон изменения  $\alpha$  от 0,9 до 1,3 сопровождается максимальной эффективностью преобразования CO (выше 90 %), поэтому в последнее время при разработке новых экологических стандартов рассматриваются другие параметры токсичности, такие как CO<sub>2</sub> и NO<sub>x</sub>.

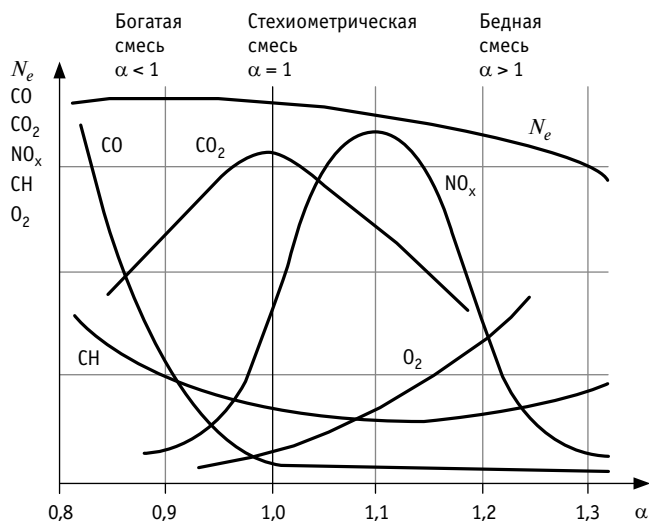


Рис. 7. Взаимовлияние компонентов токсичности ОГ и мощности ДВС в зависимости от коэффициента избытка воздуха  $\alpha$

Как видно из рис. 7, показатель CO<sub>2</sub>, имея минимальное значение в зоне богатых смесей, динамично возрастает к точке, соответствующей  $\alpha = 1$ . Здесь он достигает максимального уровня, и соответственно преимущественная работа двигателя при  $\alpha = 1$  сопровождается повышенной концентрацией выбросов CO<sub>2</sub> и высокой нагрузкой, в частности, каталитического нейтрализатора, который работает на пределе возможностей преобразования этого компонента. В циклах испытания CO<sub>2</sub> определяется как удельный показатель, измеряемый в граммах на километр пройденного пути. Уровень современных нормативов по концентрации CO<sub>2</sub> смещается к отметке 30 г/км. После прохождения точки  $\alpha = 1$  наблюдается тренд быстрого снижения CO<sub>2</sub> до границ предела воспламенения ТВС.

Вторым наиболее важным и контролируемым на сегодня показателем является содержание NO<sub>x</sub>. В последние 10 лет этот параметр вышел на первое место среди всех основных показателей токсичности ОГ. Внимание к выбросам NO<sub>x</sub> возникло в 1990–2000 гг., когда формировался тренд создания и разработки ДВС, работающих в зоне бедных и сверхбедных смесей на высокооктановых бензинах при более высоких степенях сжатия. На дизелях, например, для дезактивации NO<sub>x</sub> сегодня в обязательном порядке используется система AdBlue. На бензиновых ДВС для этой цели применяется многокомпонентный состав каталитического нейтрализатора, однако, как

и в случае с CO<sub>2</sub>, катализатор работает на пределе возможностей при преобразовании NO<sub>x</sub> в зоне бедных — сверхбедных смесей (см. рис. 7).

Повышенная температура процесса сгорания, высокое давление внутри камеры сгорания, связанное с нагарообразованием, увеличение степени сжатия содействуют росту NO<sub>x</sub>. Поэтому в эксплуатации важно контролировать правильность процесса смесеобразования и сгорания за весь жизненный цикл автотранспортного средства. В последнее время на новейших автотранспортных средствах установлены датчики контроля концентрации NO<sub>x</sub>, позволяющие наблюдать за динамикой изменения этого показателя в режиме реального времени. Однако и сам датчик требует контроля и эталонирования, иначе при неверных измерениях будет неправильно скорректирована работа систем ДВС. Тенденции последнего времени указывают на оснащение ДВС раздельными коллекторами и индивидуальными датчиками контроля NO<sub>x</sub> и O<sub>2</sub>. Кроме того, возможно оснащение ДВС встроенной системой многокомпонентного газоанализа в режиме реального времени. Но стоимость многокомпонентного газоанализатора, составляющая 100–130 тыс. руб., и необходимость дооборудования системы выпуска и эталонирования пока затрудняют применение данного вида контроля на автотранспортных средствах. При этом датчики NO<sub>x</sub> и O<sub>2</sub> в последнее время подешевели, стоят в пределах 500–3500 руб. в зависимости от исполнения, поэтому индивидуальный контроль NO<sub>x</sub> и O<sub>2</sub> находит применение как экономичный метод коррекции смесеобразования и воздействия на процесс сгорания. В перспективе рассматривается использование портативных многокомпонентных газоанализаторов с возможностью управления мощностью автотранспортных средств.

## ВЫВОДЫ

Анализ технического состояния систем ДВС позволил установить, что основными факторами, влияющими на параметры токсичности ОГ, являются нарушение искрообразования и топливopодачи, а также высокое сопротивление выпускного тракта. Увеличение числа автотранспортных средств и ужесточение экологических стандартов Евро требуют поиска методов и средств контроля токсичности отработавших газов и расхода топлива. Существующие методы и средства, контролирующая усредненные значения токсичности на выходе из выхлопной трубы, не позволяют осуществлять селективный контроль отдельных элементов и систем по цилиндрам ДВС. В перспективе предлагается использовать метод встроенного газоанализа, способный в режиме реального времени измерять параметры токсичности, оценивать качество процесса сгорания, корректировать состав топливно-воздушной смеси, адаптировать работу ДВС к текущим условиям функционирования.

Теоретические исследования показали, что разработка методов и средств контроля в области экологичности и экономичности автотранспортных средств сформировала такое направление, как встроенный контроль параметров токсичности (например, за счет внедрения портативных газоанализаторов в бортовые системы). Основу контроля составляют избирательный отбор пробы ОГ с выпускного коллектора каждого цилиндра

дра двигателя и дальнейшая корректировка режима их работы для обеспечения максимальной экологичности и минимального расхода топлива. При этом индивидуальный газоанализ предполагает забор ОГ на участках выпускной системы двигателя перед каталитическим нейтрализатором.

#### Сведения об авторах:

**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

**Константин Вячеславович Глемба**, кандидат технических наук, доцент 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

**Александр Владимирович Старунов**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Технический сервис машин, оборудования и безопасности жизнедеятельности» Южно-Уральского государственного аграрного университета

**Александр Сергеевич Меньшенин**, аспирант кафедры «Технический сервис машин, оборудования и безопасности жизнедеятельности» Южно-Уральского государственного аграрного университета

**Степан Андреевич Чоккой**, аспирант кафедры «Технический сервис машин, оборудования и безопасности жизнедеятельности» Южно-Уральского государственного аграрного университета

По результатам выполненных теоретических исследований обоснованы диапазоны максимального изменения таких параметров работы двигателя, как свободный кислород и коэффициент избытка воздуха, что обусловлено их наибольшей чувствительностью к изменению уровня токсичных компонентов в ОГ.

#### Authors information:

**Alexander V. Gritsenko**, DSc in Engineering, Professor of Automobile Transport Department, South Ural State University, Professor of Technical Service of Machinery, Equipment and Life Safety Department, South Ural State Agrarian University

**Konstantin V. Glemba**, PhD in Engineering, Associate Professor of Automobile Transport Department, South Ural State University, Associate Professor of Operation of Machine and Tractor Fleet, and Technology and Mechanization of Animal Husbandry Department, South Ural State Agrarian University

**Alexander V. Starunov**, PhD in Engineering, Associate Professor of Technical Service of Machinery, Equipment and Life Safety Department, South Ural State Agrarian University

**Alexander S. Menshenin**, postgraduate student of Operation of the Machine and Tractor Fleet, and Technology and Mechanization of Animal Husbandry Department, South Ural State Agrarian University

**Stepan A. Chokoy**, postgraduate student of Operation of the Machine and Tractor Fleet, and Technology and Mechanization of Animal Husbandry Department, South Ural State Agrarian University

## Литература

1. 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.
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. NO<sub>x</sub> Storage and Reduction for Diesel Engine Exhaust Aftertreatment / B. Pereda-Ayo, J. R. González-Velasco // Diesel Engine — Combustion, Emissions and Condition Monitoring. 2013. Pp. 161–196. <http://dx.doi.org/10.5772/55729>.
5. 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.
6. 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.
7. 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.

## References

1. Kozlov A. V., Terenchenko A. S., Vasilyev A. V. Analysis of the Euro-6 environmental requirements to vehicle engines [Analiz ekologicheskikh trebovaniy «Euro-6» k avtomobil'nyim dvigatelyam]. *Journal of Automotive Engineers*. 2017. No. 3 (104). Pp. 40–46. ISSN 2073-9133.
2. Davletova N. Kh. Motor transport as a global source of atmospheric air pollution [Avtotransport kak global'nyy istochnik zagryazneniya atmosfernogo vozdukh]. *Up-to-date high-tech 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. Pereda-Ayo B., González-Velasco J. R. NO<sub>x</sub> Storage and Reduction for Diesel Engine Exhaust Aftertreatment. *Diesel Engine — Combustion, Emissions and Condition Monitoring*. 2013. Pp. 161–196. <http://dx.doi.org/10.5772/55729>.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. 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 stan-

8. 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.
9. 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.
10. Коротких Ю. С. Экологический стандарт Евро-6 в Европе и России // Управление рисками в АПК. 2016. № 1 (5). С. 34–40. ISSN 2413-6573.
11. Балабаева И. Предложения по Евро-6 // Автомобильный транспорт. 2006. № 10. С. 57–58. ISSN 0005-2345.
12. 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.
13. Исаенко П. В., Исаенко В. Д. К расчету гидравлического сопротивления очистителя-нейтрализатора для систем выпуска отработавших газов машин автотранспортного комплекса // Вестник ТГАСУ. 2006. № 1 (12). С. 95–106. ISSN 1607-1859.
14. 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.
15. 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.
16. 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.
17. 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.
18. Фасхийев Х. А. Экономическая эффективность легкого коммерческого электромобиля // Автомобильная промышленность. 2023. № 3. С. 1–6. ISSN 0005-2337.
19. Фасхийев Х. А. Рынок электромобилей — рост стабилен // Маркетинг в России и за рубежом. 2023. № 2. С. 92–102. ISSN 1028-5849.
20. Халиуллин Ф. Х., Амиров А. М. Методика оценки экологических показателей ДВС мобильных машин при неустановившихся режимах работы // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2011. Т. 6. № 4 (22). С. 102–104. ISSN 2073-0462.
21. Самуэль Б. С. Метод определения скорости химических реакций в процессах нейтрализации отработавших газов // Известия МГТУ «МАМИ». 2012. Т. 6. № 2-2. С. 266–270. ISSN 2074-0530.
22. Жданок С. А., Васильев Г. М., Мигун А. Н. Теплофизические и кинетические процессы в системах снижения токсичности отработавших газов энергетических установок. Минск : Беларуская наука, 2014. 371 с.
23. Goncharov A. A., Bondarenko E. V., Krasnoshtanov S. Yu. Theoretical aspects of diagnostics of car as mechatronic system // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : Processing Equipment, Mechanical Engineering Processes and Metals Treatment. Tomsk : Institute of Physics Publishing. 2018. Vol. 327. Issue 4.
24. Бондаренко Е. В., Гончаров А. А., Горлатов С. Е. Методологический подход к созданию многоуровневой адаптивной технологии диагностирования электронных систем автомобилей // Вестник Оренбургского государственного университета. 2011. № 10 (129). С. 163–168. ISSN 1814-6465.
25. darta Euro-6 dlya Rossiyskoy Federatsii]. *Journal of Economy and entrepreneurship*. 2017. No. 11 (88). Pp. 121–127. ISSN 1999-2300.
9. 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.
10. 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.
11. Balabaeva I. Euro-6 offers [Predlozheniya po Evro-6]. *AT*. 2006. No. 10. Pp. 57–58. ISSN 0005-2345.
12. 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.
13. 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.
14. 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.
15. Tret'yak 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.
16. 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.
17. Gayduk S. V., Miroshnichenko E. V., Petula A. S. Global trends in the development of electric transport [Mirovye tendentsii razvitiya elektrotransporta]. *Power plants and Technologies*. 2023. Vol. 9. No. 1. Pp. 108–114. ISSN 2413-5526.
18. Fashkhiyev 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.
19. Fashkhiyev 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.
20. Khaliullin F. H., Amirov A. M. Evaluation methods of environmental ice performance of mobile machines at transient operation [Metodika otsenki ekologicheskikh pokazateley DVS mobil'nykh mashin pri neustanovivshikhshixsya rezhimakh raboty]. *Vestnik of the Kazan State Agrarian University*. 2011. Vol. 6. No. 4 (22). Pp. 102–104. ISSN 2073-0462.
21. Samuel B. S. Method of chemical reactions rate detection in the processes of neutralization of exhaust gases [Metod opredeleniya skorosti khimicheskikh reaktsiy v protsessakh neytralizatsii otrabotavshikh gazov]. *Izvestiya MGTU MAMI*. 2012. Vol. 6. No. 2-2. Pp. 266–270. ISSN 2074-0530.
22. Zhdanok S. A., Vasilyev G. M., Migun A. N. Thermophysical and kinetic processes in systems for reducing the toxicity of exhaust gases of power plants [Teplofizicheskie i kineticheskie protsessy v sistemakh snizheniya toksichnosti otrabotavshikh gazov energeticheskikh ustanovok]. *Minsk : Belarusian science*, 2014. 371 p.
23. Goncharov A. A., Bondarenko E. V., Krasnoshtanov S. Yu. Theoretical aspects of diagnostics of car as mechatronic system. *IOP Conference Series. Materials Science and Engineering. Processing Equipment, Mechanical Engineering Processes and Metals Treatment*. Tomsk : Institute of Physics Publishing. 2018. Vol. 327. Issue 4.
24. Bondarenko E. V., Goncharov A. A., Gorlatov S. E. The methodological approach to creation of multilevel adaptive technology of diagnosing of electronic systems of cars [Metodologicheskii podkhod k sozdaniyu mnogourovnevoy adaptivnoy tekhnologii diagnostirovaniya elektronnykh sistem avtomobilye]. *Vestnik of the Orenburg State University*. 2011. No. 10 (129). Pp. 163–168. ISSN 1814-6465.

Научная статья  
УДК 656.11.05

## Исследование эффективности координированного управления светофорными объектами при различных условиях движения

Сергей Владимирович Витолин<sup>1</sup>, Сергей Александрович Кашлев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

## Investigation into the effectiveness of coordinated control of traffic light objects under various traffic conditions

Sergey V. Vitolin<sup>1</sup>, Sergey A. Kashlev<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia

### Аннотация

В статье рассмотрены вопросы координированного управления светофорными объектами в различных условиях, а также влияние координации на параметры дорожного движения. Показано, что координированное управление движением транспортными средствами на регулируемых перекрестках позволяет минимизировать время проезда участка сети, сократить число остановок и снизить потребление топлива. Выбор оптимального количества планов координации во многом зависит от изменений интенсивности дорожного движения на участке координации. При этом интенсивность движения может меняться в течение как суточных, так и недельных колебаний. Для расчета оптимальных длительностей тактов и циклов светофорного регулирования при координированном управлении необходимо использовать меньшие значения потоков насыщения.

**Ключевые слова:** организация дорожного движения, координированное управление, интенсивность движения, светофорное регулирование

### Abstract

This article reviews the issues related to coordinated control of traffic lights in various conditions and the influence of coordination on traffic parameters. The coordinated traffic control of vehicles at regulated intersections is considered to minimize the travel time of a network section, because it reduces the number of stops and fuel consumption. The choice of the optimal number for coordination plans depends on the change in traffic intensity in the coordination area. At the same time, the intensity of movement can vary during both daily and weekly fluctuations. Calculating the optimal clock cycles and cycles of traffic light regulation with coordinated control requires the use of lower values of saturation fluxes.

**Keywords:** traffic management, coordinated management, traffic intensity, traffic light regulation

DOI: 10.20291/1815-9400-2024-1-55-60

### ВВЕДЕНИЕ

Установка светофорного регулирования не только повышает безопасность дорожного движения и пропускную способность объекта, но и снижает общую задержку транспорта. Светофорные объекты (СО), расположенные на удалении более 600 м, не оказывают влияния друг на друга и считаются локальными. Однако плотное расположение светофоров на улично-дорожной сети города может оказывать существенное влияние на скорость движения транспортных средств и на общий объем их задержки.

Необходимость в координированном управлении светофорными объектами при плотном их расположении зарубежные специалисты оценили еще в 1930-е гг. При этом, как показали натурные исследования, чем лучше организовано координированное управление светофорными объектами, тем меньше задержки транспорта. Из рис. 1 видно, что координированное управление позволяет снизить среднюю задержку транспорта в 2–4 раза даже в условиях минимальной загрузки перекрестка транспортными средствами. Однако координированное управление эффективно только при ненасыщенных условиях движения, т. е. когда интенсивность движения составляет 85 % от пропускной способности улично-дорожной сети.

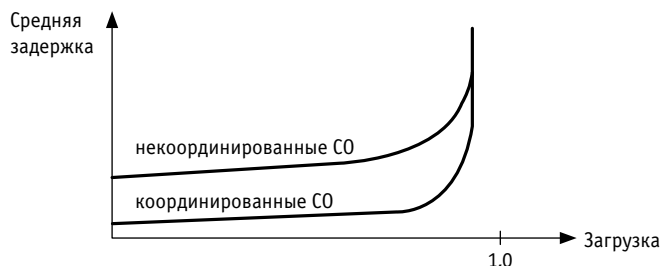


Рис. 1. Влияние координации на среднюю задержку движения транспорта [1]

В России проблеме координации режимов работы светофорных объектов уделяется достаточно большое внимание [2–8], особенно технологии «зеленая волна». Зарубежные исследования рассматривают данный вопрос гораздо глубже, в том числе эффективность адаптивных систем управления дорожным движением [9–18].

Условия организации «зеленой волны»:

расстояние между светофорными объектами до 800 м (наиболее подходящее расстояние 500 м);

степень загрузки координированных направлений движения до 0,85;

равномерное распределение светофорных объектов на участке координации;

более одной полосы для транзитного движения;

выделенные полосы для поворотов налево;

запрет остановки на крайней правой полосе (например, с 6.00 до 20.00); одинаковая длительность цикла на светофорных объектах.

Координация светофорных объектов может быть как с жестким (рис. 2а), так и с адаптивным регулированием (рис. 2б).

Как показывает практика организации дорожного движения, запроектировать координацию светофорных объектов в одну сторону, обеспечив сдвигку включения разрешающего сигнала, не представляет сложности. Однако двусторонняя координация с пропуском поворачивающих налево автомобилей может быть затруднена, особенно при перегрузках улично-дорожной сети.

Исследования, проведенные в Германии [9], показали, что координированное управление не только повышает скорость сообщения транспорта, но и снижает общий объем потребления топлива. Рассмотрим результаты этих исследований подробнее.

Для оценки эффективности координированного управления было выбрано два участка улично-дорожной сети, соизмеримых по протяженности, нагрузке и количеству светофорных объектов. При этом на одном участке составлен эффективный график координации светофорных объектов, а на втором светофоры работали по локальным режимам без координации.

На выбранных участках сети были проведены натурные поездки автомобилей для учета параметров движения. Всего выполнено 9 поездок на том и другом участках. Результаты исследований представлены на рис. 3 и 4, а также в табл. 1.

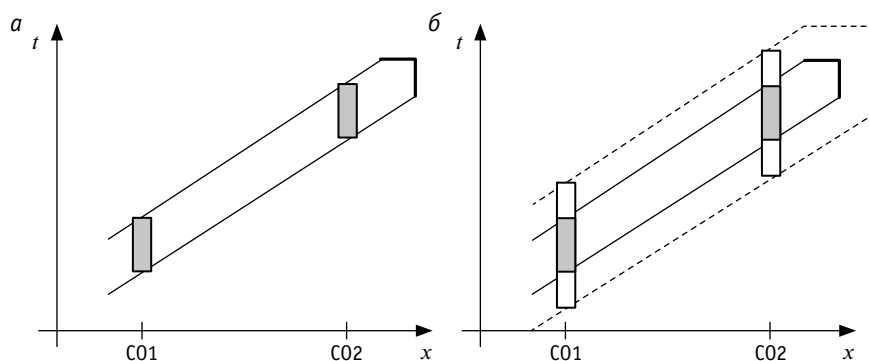


Рис. 2. Координация двух соседних регулируемых перекрестков с жестким (а) и адаптивным (б) регулированием

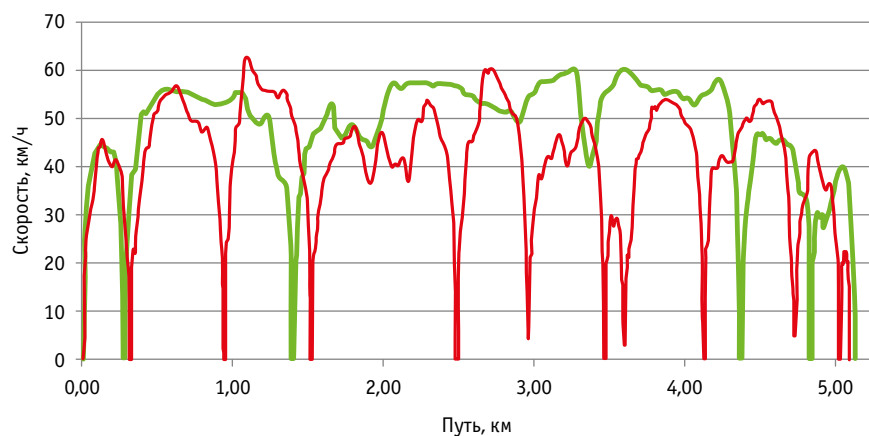


Рис. 3. Изменение скорости автомобиля по протяженности в зависимости от качества координации светофорных объектов: — координация C0; — плохая координация

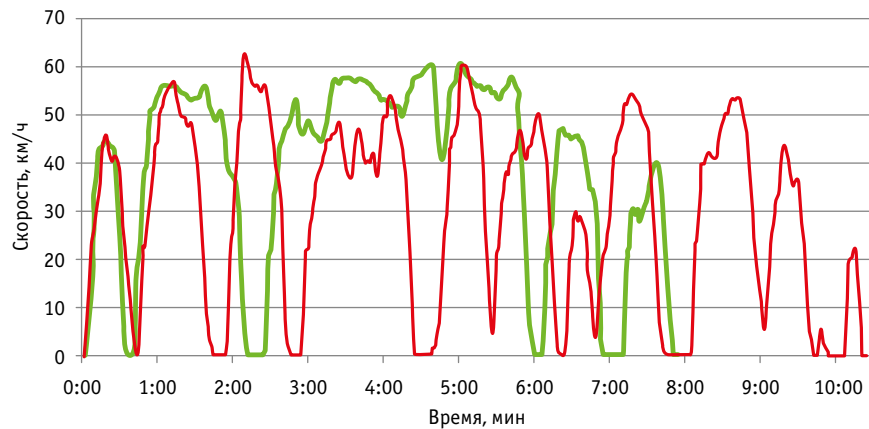


Рис. 4. Изменение скорости автомобиля по времени в зависимости от качества координации светофорных объектов: — координация C0; — плохая координация

Как видно из рис. 3, на участке с координированным управлением автомобили останавливались всего 4 раза, при этом на участке без координации движение было 9 остановок.

Еще одним отрицательным фактором можно считать «тяжелый режим движения» транспорта на участке без координации. Иными словами, автомобили на данном участке стартовали со стоп-



линии одного перекрестка, разогнались до скорости 50–60 км/ч и резко тормозили перед следующим перекрестком. На участке с координированным движением автомобили двигались более плавно, минимально используя режим торможения.

Как видно из табл. 1, при плохой координации автомобили более чем на 2 мин дольше проезжали исследуемый участок, расходуя при этом на 35 % больше топлива.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Необходимо отметить, что интенсивность движения транспорта меняется в течение суток в значительных пределах. При этом такты и циклы светофорного регулирования рассчитываются в зависимости от интенсивности движения и выбранной схемы пофазного разъезда.

Исследования, проведенные авторами в Волжском, показали, что для координированного управления движением необходимо как минимум три программы регулирования (рис. 5). Сюда следует отнести график координации пиковых периодов, межпиковый график и график координации для периода суток с минимальной загрузкой движения транспорта. Одновременно с этим интенсивность движения транспорта меняется и в течение недели. Если в рабочие дни пиковая интенсивность движения наблюдается в утренние и вечерние часы с 7.00 до 9.00 и с 17.00 до 19.00, то в выходные дни пиковым периодом можно считать обеденное время с 13.00 до 15.00.

К вышеуказанным закономерностям стоит добавить маятниковую миграцию населения из пригородов в города, а также из периферийных районов в центр. Это означает, что интенсивность движения на одном и том же перекрестке в утренние часы пик по направлению к центру может превышать интенсивность движения из центра в 2–3 раза. При этом в вечерние часы ситуация меняется на прямо противоположную. Соответственно данный фактор требует отдельного плана координации для утреннего и вечернего часов пик.

На основе проведенных исследований авторы предложили для рабочих дней четыре плана координации, рассчитанные на пики периодов с 6.00 до 11.00, с 11.00 до 16.00, с 16.00 до 19.00 и с 19.00 до

Таблица 1

Параметры оценки двух участков координации

Параметр	Участок с координированием светофорных объектов	Участок без координации
Протяженность, км	5,12	5,09
Длительность поездки, мин	7,52	10,23
Средняя скорость, км/ч	39,3	29,6
Число перекрестков	13	16
Количество остановок	4	9
Качество координации, %	75	47
Потребление топлива, л/100 км	6,51	8,79

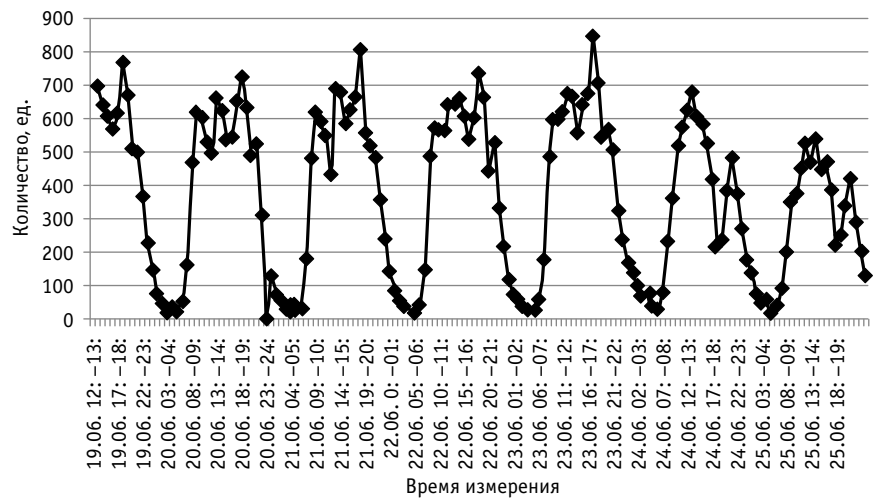


Рис. 5. Изменение интенсивности дорожного движения в Волжском, ед./ч

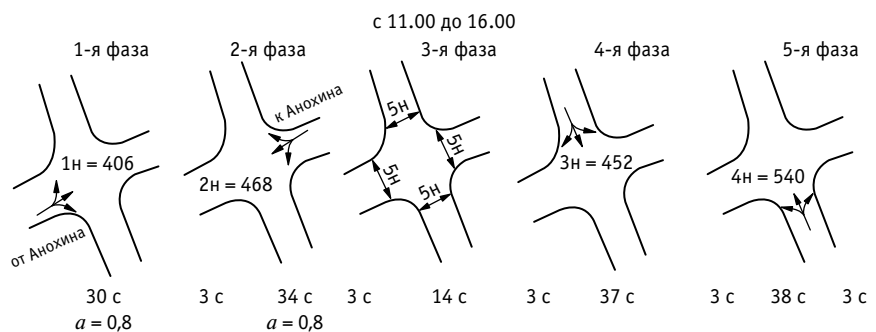


Рис. 6. Схема пофазного разъезда на светофорных объектах

6.00. Для выходных дней рекомендовано два плана координации: рассчитанный на пик субботы (с 13.00 до 14.00), действующий с 9.00 до 22.00, и рассчитанный на низкую интенсивность субботы (с 8.00 до 9.00), действующий с 22.00 до 9.00.

Отдельно стоит остановиться на длительности циклов светофорного регулирования. В Российской Федерации

и в развитых странах максимальная длительность цикла регулирования  $T_{ц}$  рекомендуется в размере 120 с и менее. Однако бывает, что  $T_{ц}$  превышает рекомендуемые пределы. Подобные случаи возникают при выделении пешеходных фаз, увеличении пропускной способности узла и при большом количестве конфликтных направлений (рис. 6).

Ситуация со светофорными циклами большей протяженности сложилась в Петрозаводске при организации координированного управления. По данным расчетов, в соответствии с интенсивностью движения и принятой схемой пофазного разъезда длительность цикла должна составлять 168 с. При этом для эффективной координации длительность циклов на других узлах также должна составлять 168 с.

Опыт организации дорожного движения показывает, что при светофорных циклах подобной длительности средняя задержка значительно повышается. Однако если на отдельной улице с такими циклами организовать координированное управление, то общую задержку транспорта можно значительно снизить.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Учитывая опыт немецких коллег, авторы статьи провели аналогичные исследования для Волгограда и других городов, где было реализовано координированное управление светофорными объектами. Для этого был организован проезд транспорта по улицам с координированным и локальным управлением движения. В ходе проезда фиксировались скорость сообщения, а также уровень расхода топлива (рис. 7).

Как видно из рис. 7, качество координации светофорных объектов в значительной мере влияет на число остановок, задержки, потребление топлива на координируемых направлениях движения. Так, при эффективной координации скорость сообщения транспорта составляет от 30 до 50 км/ч, а потребление топлива колеблется от 5 до 10 л на 100 км пробега. При отсутствии координации скорость сообщения транспорта снижается с 30 до 12 км/ч с одновременным ростом потребления топлива до 15 л на 100 км. Отдельно стоит отметить работу транспорта в ус-

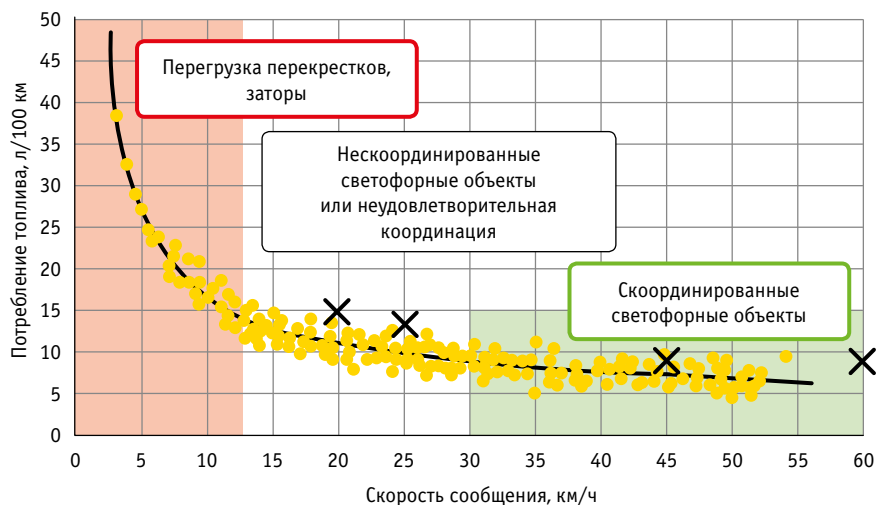


Рис. 7. Зависимость потребления топлива автомобилем от скорости сообщения

X — замеры в Волгограде; ● — замеры в Дрездене

ловиях перегруженной улично-дорожной сети. В режиме заторовых ситуаций при скорости движения от 2,5 до 12 км/ч уровень топлива может достигать 50 л на 100 км и более. Примечательно, что данные немецких специалистов совпали с результатами исследований авторов статьи.

Одновременно с этим наш опыт показал, что для обеспечения эффективной координации движения необходим несколько иной подход к расчету тактов и циклов регулирования. Для того чтобы основное количество автомобилей проезжало без остановки большую часть перекрестков, при расчете необходимо принимать интервалы следования между автомобилями в размере 2,5 с, в то время как в действующих руководствах приняты интервалы 2 с.

Иными словами, в нормативных документах при интервале движения транспорта, равном 2 с, поток насыщения  $M_n = 1800$  ед./ч. Такие значения  $M_n$  удобны для расчета отдельных, локальных, перекрестков, на которых транспортные потоки не связаны друг с другом. Для снижения количества остановок при

движении по координированному участку необходимо, чтобы плотность потока немного снизилась, а интервалы движения между автомобилями увеличились. То есть расчетный поток насыщения должен составлять 1440 ед./ч.

## ВЫВОДЫ

1. Для эффективного координированного управления светофорными объектами следует учитывать закономерности изменения интенсивности движения в течение временных промежутков, в частности, для рабочих и выходных дней необходимо применять различные планы координации и периоды их действия.
2. Координированное управление позволяет снизить потребление топлива на 35 %, а также повысить скорость транспортных сообщений.
3. При загрузке улично-дорожной сети более 85 % координированное управление движением неэффективно. При такой загрузке необходимо использовать режимы работы светофоров, направленные на борьбу с транспортными заторами.

#### Сведения об авторах:

**Сергей Владимирович Виталин**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительство и эксплуатация транспортных сооружений» Волгоградского государственного технического университета

**Сергей Александрович Кашлев**, магистрант кафедры «Строительство и эксплуатация транспортных сооружений» Волгоградского государственного технического университета

#### Authors information:

**Sergey V. Vitolin**, PhD in Engineering, Associate Professor of Construction and Exploitation of Transport Buildings Department, Volgograd State Technical University

**Sergey A. Kashlev**, graduate student of Construction and Exploitation of Transport Buildings Department, Volgograd State Technical University

## Литература

1. Bosserhoff D., Novotny T. Handbuch für Verkehrssicherheit und Verkehrstechnik der Hessischen Straßen- und Verkehrsverwaltung. 2008. Heft 53-2, Teil 5. 39 p.
2. Кременец Ю. А., Печерский М. П., Афанасьев М. Б. Технические средства организации дорожного движения. Москва : Академкнига, 2005. 279 с.
3. Повышение скорости автотранспорта на основе регулирования движения по «зеленой волне» / С. В. Алексиков, Г. И. Беликов, В. А. Пшеничкина, С. В. Волченко // Интернет-вестник ВолГАСУ. Серия: Политематическая. 2013. Вып. 2 (27). С. 27. eISSN 1994-0351.
4. Оценка возможности введения координированного светофорного регулирования на улично-дорожной сети города Брянска / С. П. Шец, И. Л. Шуликов, Е. В. Справцева, В. Г. Кешенкова // Вестник БГТУ. 2019. № 2 (75). С. 56–64. DOI: 10.30987/article\_5c652636168de7.20823706.
5. Волченко С. В. Повышение пропускной способности городских дорог на основе оценки скоростного режима транспортных потоков // Вестник ВолГАСУ. Серия: Строительство и архитектура. 2013. № 32 (51). С. 153–159. ISSN 1815-4360.
6. Виталин С. В. Основы светофорного регулирования транспортных потоков в городе. Волгоград : Изд-во ВолГТУ. 2019. 77 с.
7. Виталин С. В. Основы методологии управления транспортными потоками на улично-дорожной сети крупного города при светофорном регулировании // Мир транспорта. 2020. Т. 18. № 4. С. 148–155. DOI: 10.30932/1992-3252-2020-18-148-155.
8. Виталин С. В., Лукьянсков А. М. Решение дорожно-транспортных проблем городов России на примере города Волгограда // Вестник СГУПС. 2022. № 1 (60). С. 29–37. DOI: 10.52170/1815-9265\_2022\_60\_29.
9. ADAC-Test Partikelemissionen: Vergleich Partikelfilter, Grüne Welle. Verkehrspolitik und Verbraucherschutz. München. 2005. 7 p.
10. Traffic signal coordination control along oversaturated two-way arterials / H. Xu, Z. Zhuo, J. Chen, X. Fang // PeerJ Comput. Sci. 2020. 6. doi: 10.7717/peerj-cs.319.
11. Haque M. B., Zahid M. A., Siddiki M. N. A. Coordinated Traffic Signal Design for Major Intersections in Sylhet City // JoCEF. 2022. Vol. 3. No. 02. Pp. 51–60. DOI: <https://doi.org/10.38094/jocf30249>.
12. Alkaissi Z. A. Effect of Signal Coordination on the Traffic Operation of Urban Corridor // Tikrit Journal of Engineering Sciences. 2023. 30 (1). Pp. 12–24. <http://doi.org/10.25130/tjes.30.1.2>.
13. A Back-Pressure-Based Model with Fixed Phase Sequences for Traffic Signal Optimization under Oversaturated Networks / D. Ma, J. Xiao, X. Song [et al.] // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 2021. Vol. 22. No. 9. Pp. 5577–5588.

## References

1. Bosserhoff D., Novotny T. Handbuch für Verkehrssicherheit und Verkehrstechnik der Hessischen Straßen- und Verkehrsverwaltung. 2008. Heft 53-2. Teil 5. 39 p.
2. Kremenets Yu. A., Pecherskiy M. P., Afanas'ev M. B. Технические средства организации дорожного движения [Tekhnicheskie sredstva organizatsii dorozhnogo dvizheniya]. Moscow, 2005. 279 p.
3. Aleksikov S. V., Belikov G. I., Pshenichkina V. A., Volchenko S. V. Increase of the road capacity based on the «green wave» traffic regulation [Povyshenie skorosti avtotransporta na osnove regulirovaniya dvizheniya po «zelenoy volne»]. *Internet-Vestnik VolGASU. Series: Polythematic*. 2013. No. 2 (27). 27 p. eISSN 1994-0351.
4. Shets S. P., Shupikov I. L., Spravtseva E. V., Keshenkova V. G. Assessment of possibility for introduction of coordinated traffic lights control in Bryansk street-road network [Otsenka vozmozhnosti vvedeniya koordinirovannogo svetofornogo regulirovaniya na ulichno-dorozhnoy seti goroda Bryanska]. *Bulletin of Bryansk State Technical University*. 2019. No. 2 (75). Pp. 56–64. DOI: 10.30987/article\_5c652636168de7.20823706.
5. Volchenko S. V. Increase of capacity of city roads on the basis of the assessment of the high-speed rate of transport flows [Povyshenie proppusknoy sposobnosti gorodskikh dorog na osnove otsenki skorostnogo rezhima transportnykh potokov]. *Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and Architecture*. 2013. No. 32 (51). Pp. 153–159. ISSN 1815-4360.
6. Vitolin S. V. The basics of traffic light regulation of traffic flows in the city [Osnovy svetofornogo regulirovaniya transportnykh potokov v gorode]. Volgograd : Publishing House of VSTU. 2019. 77 p.
7. Vitolin S. V. Basic methodology of traffic management for the street and road network of a large city with traffic lights regulation [Osnovy metodologii upravleniya transportnymi potokami na ulichno-dorozhnoy seti krupnogo goroda pri svetofornom regulirovanii]. *World of Transport and Transportation*. 2020. Vol. 18. No. 4. Pp. 148–155. DOI: 10.30932/1992-3252-2020-18-148-155.
8. Vitolin S. V., Lukiyanov A. M. Solution to traffic problems of russian cities using the example of Volgograd [Reshenie dorozhno-transportnykh problem gorodov Rossii na primere goroda Volgograda]. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2022. No. 1 (60). Pp. 29–37. DOI: 10.52170/1815-9265\_2022\_60\_29.
9. ADAC-Test Partikelemissionen: Vergleich Partikelfilter, Grüne Welle. Verkehrspolitik und Verbraucherschutz. München. 2005. 7 p.
10. Xu H., Zhuo Z., Chen J., Fang X. Traffic signal coordination control along oversaturated two-way arterials. *PeerJ Comput. Sci.* 2020. 6. doi: 10.7717/peerj-cs.319.
11. Haque M. B., Zahid M. A., Siddiki M. N. A. Coordinated Traffic Signal Design for Major Intersections in Sylhet City. *JoCEF*. 2022. Vol. 3. No. 02. Pp. 51–60. <https://doi.org/10.38094/jocf30249>.
12. Alkaissi Z. A. Effect of Signal Coordination on the Traffic Operation of Urban Corridor. *Tikrit Journal of Engineering Sciences*. 2023. 30 (1). Pp. 12–24. <http://doi.org/10.25130/tjes.30.1.2>.

14. Traffic Signal Retiming to Improve Corridor Performance / Rui Yue, Guangchuan Yang, Dongmei Lin [et al.] // *Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems*. 2021. Vol. 147. Issue 1. DOI:10.1061/JTEPBS.0000482.
15. Effects of traffic signal coordination on the safety performance of urban arterials / Rui Yue, Guangchuan Yang, Yichen Zheng [et al.] // *Computational Urban Science*. 2022. doi.org/10.1007/s43762-021-00029-4.
16. Xianyue Peng, Hao Wang. Coordinated control model for arterials with asymmetric traffic // *Journal of Intelligent Transportation Systems*. 2022. <https://doi.org/10.1080/15472450.2022.2078204>.
17. Accurate detection of vehicle, pedestrian, cyclist and wheelchair from roadside light detection and ranging sensors / Junxuan Zhao, Hao Xu, Zhihui Chen, Hongchao Liu // *Journal of Intelligent Transportation Systems*. 2023. <https://doi.org/10.1080/15472450.2023.2243816>.
18. Adaptive green split optimization for traffic control with low penetration rate trajectory data / Zihao Wang, Roger Lloret-Batlle, Jianfeng Zheng, Henry X. Liu // *Journal of Intelligent Transportation Systems*. 2023. <https://doi.org/10.1080/15472450.2023.2227959>.
13. Ma D., Xiao J., Song X., Ma X., Jin S. A Back-Pressure-Based Model with Fixed Phase Sequences for Traffic Signal Optimization under Oversaturated Networks. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2021. Vol. 22. No. 9. Pp. 5577–5588.
14. Rui Yue, Guangchuan Yang, Dongmei Lin [et al.]. Traffic Signal Retiming to Improve Corridor Performance. *Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems*. 2021. Vol. 147. Issue 1. DOI:10.1061/JTEPBS.0000482.
15. Rui Yue, Guangchuan Yang, Yichen Zheng, Yuxin Tian, Zong Tian. Effects of traffic signal coordination on the safety performance of urban arterials. *Computational Urban Science*. 2022. doi.org/10.1007/s43762-021-00029-4.
16. Xianyue Peng, Hao Wang. Coordinated control model for arterials with asymmetric traffic. *Journal of Intelligent Transportation Systems*. 2022. <https://doi.org/10.1080/15472450.2022.2078204>.
17. Junxuan Zhao, Hao Xu, Zhihui Chen, Hongchao Liu. Accurate detection of vehicle, pedestrian, cyclist and wheelchair from roadside light detection and ranging sensors. *Journal of Intelligent Transportation Systems*. 2023. <https://doi.org/10.1080/15472450.2023.2243816>.
18. Zihao Wang, Roger Lloret-Batlle, Jianfeng Zheng, Henry X. Liu. Adaptive green split optimization for traffic control with low penetration rate trajectory data. *Journal of Intelligent Transportation Systems*. 2023. <https://doi.org/10.1080/15472450.2023.2227959>.

Объем статьи 0,66 авторских листа

Научная статья  
УДК 656.222.6

## Мероприятия по снижению последствий отставления поездов от движения

Дарья Сергеевна Серова<sup>1</sup>, Елена Николаевна Тимухина<sup>2</sup>, Татьяна Николаевна Каликина<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск, Россия

<sup>2</sup>Уральский государственный университет путей сообщения, Екатеринбург, Россия

## Measures to reduce the consequences of train delays

Darya S. Serova<sup>1</sup>, Elena N. Timukhina<sup>2</sup>, Tatyana N. Kalikina<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, Russia

<sup>2</sup>Ural State University of Railway Transport, Ekaterinburg, Russia

### Аннотация

В статье рассмотрена проблема, затрудняющая эксплуатационную работу припортовых железных дорог: несоответствие пропускных способностей перегонов и перерабатывающих способностей припортовых станций, приводящее к отставлению поездов от движения. Авторами проанализированы причины отставления поездов, а также предложены мероприятия, позволяющие снизить последствия отставления, — сокращение суммарных затрат на отставление поезда от движения и на его дальнейший подъем за счет выбора станции отставления. Сформулированы основные условия, которым должна отвечать станция отставления поездов для организации безопасного перевозочного процесса и минимизации суммарных затрат.

**Ключевые слова:** поезда, отставленные от движения, припортовая железная дорога, эксплуатационные затраты, станция отставления поездов, эффективность перевозочного процесса

### Abstract

The article considers the problem that complicates the operational work of port railways: the discrepancy between the capacity of the crossings and the processing capabilities of port stations, leading to the lagging of trains from traffic. The authors have analyzed the reasons for the train delay, and also proposed some measures to reduce the consequences of the delay, such as reducing the total cost of detaching the train from traffic and its further rise by choosing a departure station. The authors have formulated basic conditions that a train departure station must meet in order to organize a safe transportation process and minimize total costs.

**Keywords:** trains suspended from traffic, port railway, operating costs, train departure station, efficiency of the transportation process

DOI: 10.20291/1815-9400-2024-1-61-66

**Р**азветвленная сеть ОАО «РЖД» включает в себя 16 железных дорог, три из которых являются припортовыми (Дальневосточная, Октябрьская, Северо-Кавказская). Технология работы любой припортовой железной дороги направлена: на ускорение продвижения массовых грузов к припортовым станциям;

ускорение вывоза грузов и порожних вагонов с морских портов, станций пограничных переходов и передача их на соседние дороги;

обеспечение слаженного и ритмичного («точно в срок») подвода поездов к морским портам;

минимизацию эксплуатационных потерь при взаимодействии железнодорожного и морского транспорта [1, 2].

Вместе с тем существует проблема, значительно затрудняющая эксплуатационную работу припортовых дорог, — это несоответствие пропускных способностей перегонов и перерабатывающих способностей припортовых станций. Кроме того, в 2022 г. произошло революционное изменение перевозочного процесса, связанное с переориентацией грузопотока с западного направления на восточное, что также вызвало сложности в координации работы припортовых дорог и всей сети в целом.

Качество эксплуатационной работы на стыке видов транспорта влияет на работу не только припортовой дороги, но и всего транспортного направления от мест погрузки до портов. Мерами регулирования эксплуатационной обстановки в пунктах взаимодействия различных видов транспорта являются конвенционные запреты на погрузку грузов и отставление поездов от движения. При этом в качестве полигона для отставления используются и участки перед пунктами взаимодействия различных видов транспорта, и все транспортное направление.

Отметим, что наличие поездов, отставленных от движения, ведет:

к увеличению рабочего парка вагонов, оборота вагона, нагрузки на инфраструктуру, затрат по уплате пени за нарушение сроков доставки грузов, затрат, связанных с бросанием и поднятием поездов;

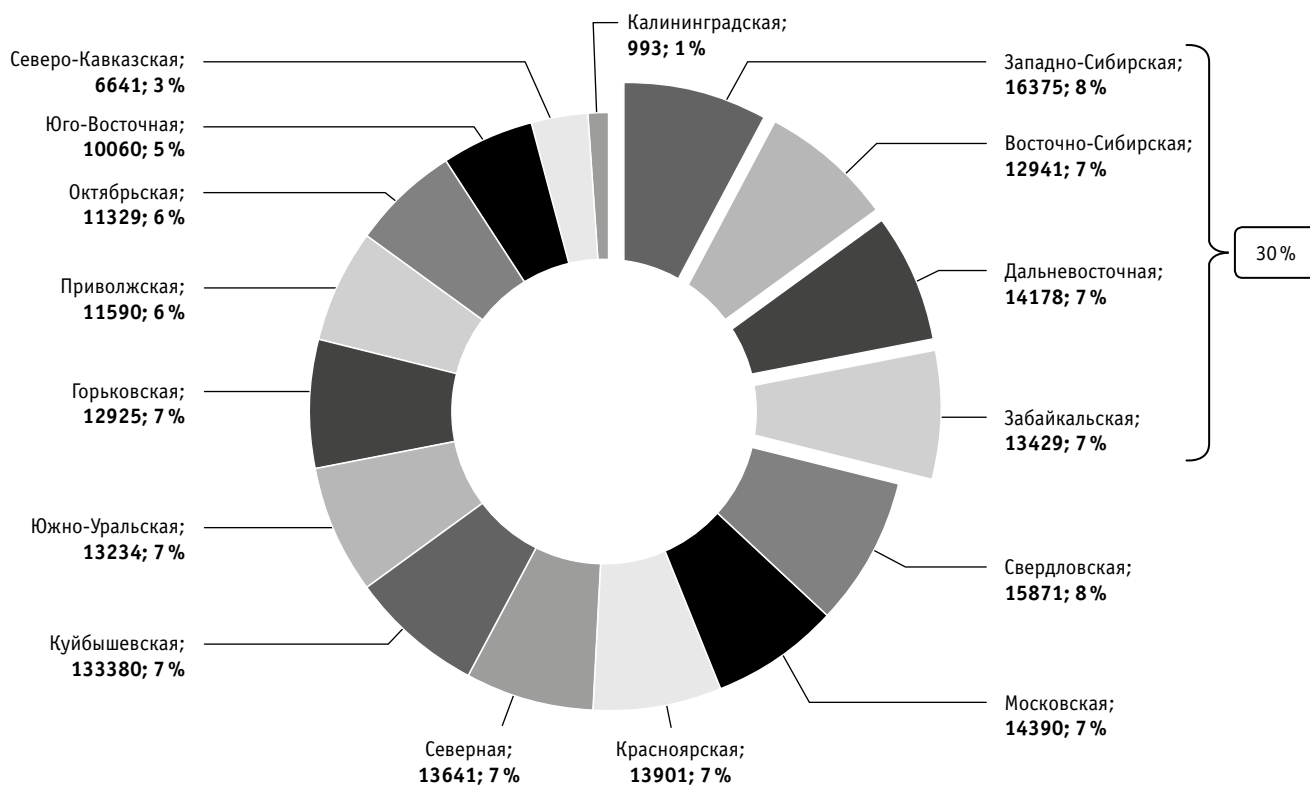


Рис. 1. Распределение поездов, отставленных от движения, по дорогам отставления в 2022 г. [8]

снижению участковой скорости, коэффициента маневренности полигона, пропускной способности железнодорожных участков, пропускной и перерабатывающей способности станций, производительности локомотивов и локомотивных бригад;

нарушению сроков доставки грузов [3, 4].

Сегодня Дальневосточная, Забайкальская, Восточно-Сибирская и Западно-Сибирская железные дороги составляют единый транспортный коридор по перевозкам массовых грузов из Кузбасса и Восточной Сибири в дальневосточные порты с последующей их транспортировкой в страны Азиатско-Тихоокеанского региона [5–7].

Несмотря на то что при отставлении поездов от движения эксплуатационная обстановка регулируется на всех дорогах сети ОАО «РЖД», в 2022 г. на Западно-Сибирскую, Восточно-Сибирскую, Забайкальскую и Дальневосточную железные дороги пришлось около 30 % всех поездов, отставленных от движения (рис. 1).

В 2022 г. больше всего поездов, отставленных от движения (26907, или

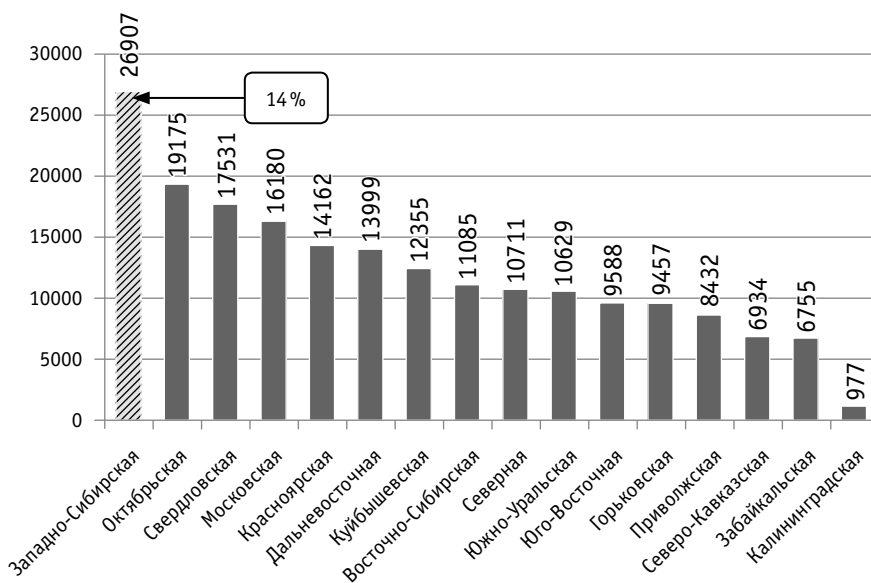


Рис. 2. Распределение поездов, отставленных от движения, по дорогам отправления на всей сети ОАО «РЖД» в 2022 г. [8]

14 %), отправлялось с Западно-Сибирской железной дороги (рис. 2), что обусловлено размещением на территории Сибирского федерального округа и Западно-Сибирского экономического рай-

она самых крупных угольных месторождений и угледобывающих шахт.

Среди отставленных от движения 40 % — это поезда назначением на припортовые железные дороги, из них 17 %



(33435 поездов) от общего числа — поезда назначением на Дальневосточную железную дорогу (рис. 3) [8].

В 2022 г. на Дальневосточной железной дороге среди поездов, отставленных от движения, 35 % составили поезда с углем, 26 % — со смешанными грузами, 24 % — порожние, 10 % — контейнерные, 5 % — поезда с прочими грузами.

Как показали выполненные исследования, причины отставления поездов можно разделить на четыре группы.

1. Причины со стороны перевозчика (ОАО «РЖД»): неудовлетворительная организация эксплуатационного процесса, отказы технических средств.

2. Причины со стороны грузоотправителя и грузополучателя: неприем поезда железнодорожной станцией назначения на территории России по причинам, зависящим от грузополучателей, владельцев или пользователей путей необщего пользования; оказание в пути следования услуг по временному размещению собственного (арендованного) подвижного состава на железнодорожных путях общего пользования.

3. Причины со стороны третьих лиц: неприем поезда пограничным переходом с «третьими» странами, государствами СНГ или инфраструктурой общего пользования другого владельца; превышение нормативного времени на таможенный, санитарный досмотр; отставка от движения поездов с грузами, перевозимыми в прямом смешанном сообщении при ответственности перевозчика другого вида транспорта.

4. Причины со стороны внешних факторов: стихийные бедствия, при которых администрацией данной территории объявляется чрезвычайное положение; техногенные катастрофы; угроза террористических актов; незаконное вмешательство в деятельность железнодорожного транспорта; отсутствие (ожидание) локомотива, не принадлежащего перевозчику; неприем порожних собственных полувагонов, посылаемых на Западно-Сибирскую железную дорогу.

На основании отчетных данных Дорожного логистического центра Дальневосточной железной дороги проведен анализ и построена диаграмма распределения числа поездов, отставленных от

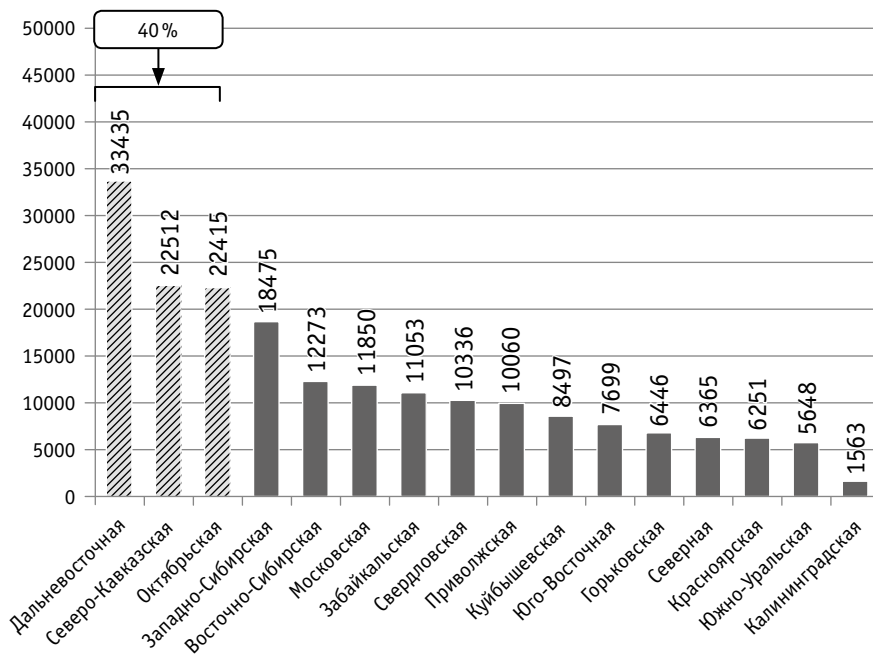


Рис. 3. Распределение отставленных от движения поездов по дорогам назначения на всей сети ОАО «РЖД» в 2022 г. [8]

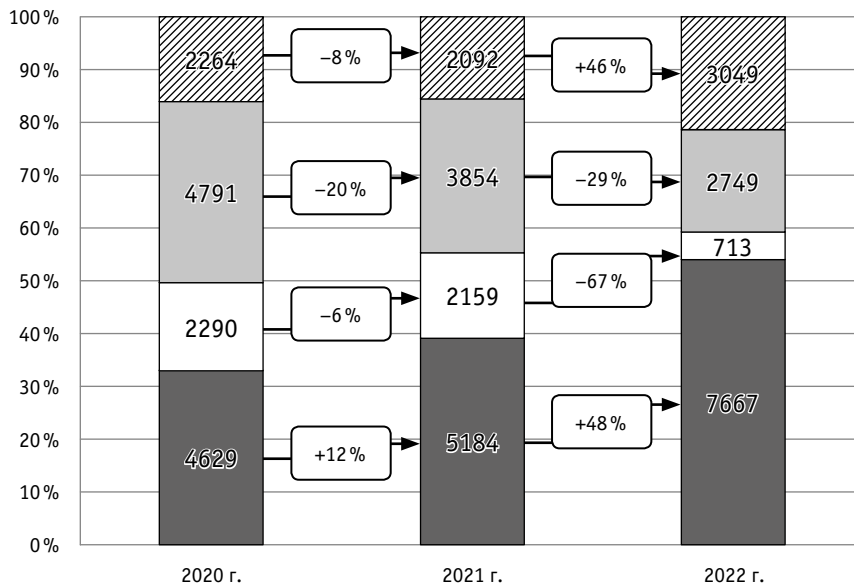


Рис. 4. Распределение количества поездов, отставленных от движения на Дальневосточной железной дороге, по причинам ответственных сторон за 2020–2022 гг. [8–10]:

- ▨ — причины со стороны третьих лиц;
- — причины со стороны грузоотправителя и грузополучателя;
- — причины со стороны внешних факторов;
- — причины со стороны перевозчика

движения по вине ответственных сторон в 2020–2022 г. (рис. 4). За три отчетных года произошла перегруппировка причин отставления поездов от движения. Доля причин со стороны перевозчика вы-

росла с 33 % в 2020 г. до 54 % в 2022-м. При этом значительно снизилась доля причин отставления поездов со стороны грузоотправителя и грузополучателя — с 34 % в 2020 г. до 19 % в 2022-м [8–10].

Увеличение доли поездов, отставленных от движения, по причинам со стороны перевозчика свидетельствует о неудовлетворительной организации перевозочного процесса в условиях непрерывного роста объема перевозок и дефицита пропускных способностей. Полностью уйти от отставления поездов от движения как меры регулирования оперативной ситуации нельзя. В данном случае можно только снизить последствия от наличия таких поездов на полигоне, а именно уменьшить суммарные затраты по отставлению поезда от движения и по его дальнейшему подъему.

Суммарные затраты на отставление и поднятие поездов  $\sum C_{оп}$  включают в себя затраты на отставление поезда от движения  $C_{зб}$ , на простой поезда  $C_{зпр}$ , на подъем поезда  $C_{зп}$ , на отвлечение (вызов) работника службы вагонного хозяйства  $C_{зв}$ , на вызов работника дежурно-диспетчерского аппарата на станциях, оборудованных диспетчерской централизацией и на автодействии  $C_{зд}$ , на работу сотрудников инфраструктуры по содержанию пути после длительной стоянки поезда  $C_{зи}$ , на очистку от снега (при необходимости) пути отставления поезда от движения  $C_{зо}$ , на пени за невыполнение срока доставки  $C_{п}$ .

Задача — минимизировать суммарные затраты на отставление и поднятие поездов, руб.:

$$\sum C_{оп} = (C_{зб} + C_{зпр} + C_{зп} + C_{зв} + C_{зд} + C_{зи} + C_{зо} + C_{п}) \rightarrow \min.$$

Рассмотрим и определим, от чего зависит каждая составляющая суммарных затрат.

Суммарные затраты на отставление поезда от движения включают в себя, руб.:

$$C_{зб} = C_{лок-км}^б + C_{лок-ч}^б + C_{бр-ч}^б;$$

$$C_{лок-км}^б = f(L_{ст}^{ЛД}); C_{лок-ч}^б = f(t_{доп}^б; L_{ст}^{ЛД});$$

$$C_{бр-ч}^б = f(t_{доп}^б; L_{ст}^{ЛД}; t_{нр}^{лб}),$$

где  $C_{лок-км}^б$ ,  $C_{лок-ч}^б$ ,  $C_{бр-ч}^б$  — соответственно затраты на локомотиво-километры, локомотиво-часы, бригадо-часы при отставлении поезда от движения;  $L_{ст}^{ЛД}$  — расстояние от станции отставления до локомотивного депо, км;  $t_{доп}^б$  — продолжительность дополнительных операций при отставлении поезда от движения, ч;  $t_{нр}^{лб}$  — нормативное время непрерывной работы локомотивных бригад, ч.

Затраты на простой поезда зависят от длительности нахождения на железнодорожной станции поезда, отставленного от движения ( $t_{пр}$ , ч):

$$C_{зпр} = f(t_{пр}).$$

Затраты на подъем поезда включают в себя, руб.:

$$C_{зп} = C_{лок-км}^п + C_{лок-ч}^п + C_{бр-ч}^п;$$

$$C_{лок-км}^п = f(L_{ст}^{ЛД}); C_{лок-ч}^п = f(t_{доп}^п; L_{ст}^{ЛД});$$

$$C_{бр-ч}^п = f(t_{доп}^п; L_{ст}^{ЛД}; t_{нр}^{лб}),$$

где  $C_{лок-км}^п$ ,  $C_{лок-ч}^п$  и  $C_{бр-ч}^п$  — затраты на локомотиво-километры, локомотиво-часы и на бригадо-часы при подъеме поезда;  $t_{доп}^п$  — продолжительность дополнительных операций при подъеме поезда, ч.

Затраты на отвлечение (вызов) работника службы вагонного хозяйства зависят от расстояния от станции отставления до пункта ПТО или вагонного депо ( $L_{ст}^{ПТО,ВД}$ , км) и времени нахождения вызванных работников на станции, в том числе продолжительности операций, выполняемых работником службы вагонного хозяйства при подъеме поезда ( $t_{осм}^{ст}$ , ч), руб.:

$$C_{зв} = f(L_{ст}^{ПТО,ВД}; t_{осм}^{ст}).$$

Затраты на вызов работника дежурно-диспетчерского аппарата на станциях, оборудованных диспетчерской централизацией и на автодействии, зависят от расстояния от станции отставления до места жительства/нахождения работников дежурно-диспетчерского аппарата ( $L_{ст}^{МЖ}$ , км) и времени нахождения вызванных работников дежурно-диспетчерского аппарата на станции, в том числе с учетом продолжительности выполнения операций с поездом ( $t_{ст}^{нах}$ , ч), руб.:

$$C_{зд} = f(L_{ст}^{МЖ}; t_{ст}^{нах}).$$

Затраты на работу сотрудников инфраструктуры по содержанию пути после длительной стоянки поезда зависят от расстояния от станции отставления до дистанции пути ( $L_{ст}^{ПЧ}$ , км) и продолжительности нахождения на железнодорожной станции поезда, отставленного от движения ( $t_{о}$ , ч), руб.:

$$C_{зи} = f(L_{ст}^{ПЧ}; t_{о}),$$

если  $t_{о} < 24$  ч, то  $C_{зи} = 0$ .

Затраты на очистку от снега (при необходимости) пути отставления поезда включают в себя, руб.:

$$C_{зо} = C_{ст} + C_{лок-км}^о + C_{лок-ч}^о + C_{бр-ч}^о;$$

$$C_{ст} = f(L_{ст}^{СН}; t_{ст}); C_{лок-км}^о = f(L_{ст}^{СН}; t_{ст});$$

$$C_{лок-ч}^о = f(L_{ст}^{СН}; t_{ст}); C_{бр-ч}^о = f(L_{ст}^{СН}; t_{ст}),$$

где  $C_{ст}$  — затраты на работу снегоуборочной техники;  $C_{лок-км}^о$ ,  $C_{лок-ч}^о$ ,  $C_{бр-ч}^о$  — затраты на локомотиво-километры, локомотиво-часы и бригадо-часы при очистке от снега пути отставления поезда соответственно;  $L_{ст}^{СН}$  — расстояние от станции отставления до места дислокации снегоуборочной техники, км;  $t_{ст}$  — продолжительность работы снегоуборочной техники на пути отставления поезда, ч.

Пени за невыполнение срока доставки груза зависят от времени нарушения срока доставки ( $t_{нар}^{сд}$ , ч) [11], руб.:

$$C_{п} = f(t_{нар}^{сд}).$$

Таким образом, величина большей части затрат на отставление и поднятие поездов зависит от выбора станции отстав-

ления и ее местоположения относительно основных инфраструктурных объектов. По результатам исследований были сформулированы условия, которым должна отвечать станция отставления с точки зрения организации безопасного перевозочного процесса и минимизации суммарных затрат на отставление и поднятие поездов.

1. Уклон пути  $i_{\text{п}}$ , на котором происходит отставление поездов от движения, должен соответствовать нормам безопасности [12]:

$$i_{\text{п}} \leq 0,0025.$$

2. Длина поезда ( $l_{\text{п}}$ , м) не должна превышать полезную длину хотя бы одного приемо-отправочного пути на станции отставления ( $L_{\text{ПОП}}$ , м):

$$l_{\text{п}} \leq L_{\text{ПОП}}.$$

3. Количество свободных путей на станции отставления ( $M_{\text{св}}^{\text{п}}$ ) должно соответствовать нормам безопасности:

$$M_{\text{св}}^{\text{п}} \geq M_{\text{гл}} + 2,$$

где  $M_{\text{гл}}$  — количество главных путей на станции.

4. Продолжительность операций при поднятии поезда от приемки локомотива локомотивной бригадой до смены локомотивной бригады не должна превышать продолжительности непрерывной работы локомотивных бригад, ч:

$$t_{\text{пр}}^{\text{лок}} + t_{\text{п}}^{\text{сб}} + t_{\text{б}}^{\text{доп}} + t_{\text{ож}}^{\text{отпр}} + t_{\text{п}}^{\text{слб}} + t_{\text{сд}}^{\text{лок}} \leq t_{\text{пр}}^{\text{лб}},$$

где  $t_{\text{пр}}^{\text{лок}}$ ,  $t_{\text{сд}}^{\text{лок}}$  — соответственно продолжительность операций по приемке и сдаче локомотива локомотивной бригадой в локомотивное депо;  $t_{\text{п}}^{\text{сб}}$  — продолжительность следования поезда от локомотивного депо до станции отставления;  $t_{\text{ож}}^{\text{отпр}}$  — время ожидания отправления поднятого поезда;  $t_{\text{п}}^{\text{слб}}$  — время следования поднятого поезда до станции смены бригад, ч.

#### Сведения об авторах:

**Дарья Сергеевна Серова**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Организация перевозок и безопасность на транспорте» Дальневосточного государственного университета путей сообщения

**Елена Николаевна Тимухина**, доктор технических наук, профессор кафедры «Управление эксплуатационной работой» Уральского государственного университета путей сообщения

**Татьяна Николаевна Каликина**, кандидат технических наук, доцент, заведующая кафедрой «Организация перевозок и безопасность на транспорте» Дальневосточного государственного университета путей сообщения

5. Число бригад ПТО на станциях дислокации должно приниматься в зависимости от их загрузки на близлежащих станциях по подъему поездов (с учетом времени следования и нахождения на станции отставления):

$$Б \geq \frac{\sum t_{\text{ПТО}}^{\text{сд}} + \sum t_{\text{осм}}^{\text{ст}} + \sum t_{\text{осм}}^{\text{сл}}}{24},$$

где Б — число бригад ПТО на станции их дислокации;  $\sum t_{\text{ПТО}}^{\text{сд}}$  — среднесуточная суммарная продолжительность операций бригадами ПТО с поездами всех категорий, ч;  $\sum t_{\text{осм}}^{\text{ст}}$  — среднесуточная суммарная продолжительность нахождения бригад ПТО на станциях отставления поездов, ч;  $\sum t_{\text{осм}}^{\text{сл}}$  — среднесуточная суммарная продолжительность нахождения бригад ПТО в пути на станции и со станций отставления поездов, ч.

6. На станции должны находиться работники дежурно-диспетчерского аппарата ( $N_{\text{раб}}^{\text{д}}$ ):

$$(N_{\text{раб}}^{\text{д}} > 0) \rightarrow \text{opt}.$$

Анализ показал, что в 67 % случаев на Дальневосточной железной дороге отставляют поезда от движения на станциях, которые не удовлетворяют требованиям документа [13]. Причины этого:

- невозможность следовать поезду дальше (32 %);
- занятость путей на станциях, удовлетворяющих требованиям (23 %);
- неудовлетворительная работа дежурно-диспетчерского аппарата (19 %) [8–10].

Таким образом, при выборе станции отставления учет дежурно-диспетчерским аппаратом рассмотренных условий позволит минимизировать суммарные затраты на отставление и поднятие у 19 % поездов, отставленных от движения. Дальнейшее сокращение затрат по отставлению и поднятию поездов лежит либо в области снижения числа поездов, отставленных от движения, либо в минимизации последствий от таких поездов за счет других факторов.

#### Authors information:

**Darya S. Serova**, PhD in Engineering, Associate Professor of Transportation Organization and Transport Safety Department, Far Eastern State Transport University

**Elena N. Timukhina**, DSc in Engineering, Professor of Railway Cars Department, Ural State University of Railway Transport

**Tatyana N. Kalikina**, PhD in Engineering, Associate Professor, Head of Transportation Organization and Transport Safety Department, Far Eastern State Transport University

## Литература

1. Долгосрочная программа развития открытого акционерного общества «Российские железные дороги» до 2025 года. URL: <http://static.government.ru/media/files/zcAMxApAgy07PnJ42aXtXAgA2RXSVoKu.pdf> (дата обращения: 01.11.2023).
2. Повышение и использование перевозочной мощности полигонов сети: эффективные стратегия и тактика / А. Ф. Бородин, В. В. Панин, Е. А. Лаханкин [и др.] // Железнодорожный транспорт. 2022. № 7. С. 8–16. ISSN 0044-4448.
3. Новиков П. О. Разработка технологии временного отставления от движения и подъема грузовых поездов : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва, 2014. 133 с.
4. Сайбатов Р. Ф. Методы устранения затруднений в работе полигонов железнодорожной сети : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Екатеринбург, 2020. 231 с.
5. Об утверждении формы статистической отчетности ДО-5ВЦ «Отчет о наличии задержанных в продвижении (временно отставленных от движения) составов грузовых поездов и вагонов в них». URL: <https://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=EXP&n=826195&ysclid=lt2ix9f94v47831645#LwuwM5UakKhydbB11> (дата обращения: 01.11.2023).
6. Инструктивные указания об организации учета задержанных в продвижении (временно отставленных от движения) составов грузовых поездов и порядке автоматизированного формирования внутренней статистической отчетности ДО-5ВЦ «Отчет о наличии задержанных в продвижении составов грузовых поездов и вагонов в них». URL: <https://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=EXP&n=826195&ysclid=lt2ix9f94v47831645#LwuwM5UakKhydbB11> (дата обращения: 01.11.2023).
7. Регламент взаимодействия между региональными подразделениями функциональных филиалов ОАО «РЖД» при организации вынужденного временного отставления от движения грузовых поездов, следующих на припортовые железнодорожные станции и пограничные переходы полигона Дальневосточной железной дороги, 2019.
8. РЖД. Раскрытие информации. Инфраструктура. Форма 9г-8. 2022 год. URL: [https://company.rzd.ru/ru/9388/page/15689?text\\_search=&form\\_id=25&year=2022](https://company.rzd.ru/ru/9388/page/15689?text_search=&form_id=25&year=2022) (дата обращения: 01.11.2023 г.)
9. РЖД. Раскрытие информации. Инфраструктура. Форма 9г-8. 2020 год. URL: [https://company.rzd.ru/ru/9388/page/15689?text\\_search=&form\\_id=25&year=2020](https://company.rzd.ru/ru/9388/page/15689?text_search=&form_id=25&year=2020) (дата обращения: 01.11.2023 г.)
10. РЖД. Раскрытие информации. Инфраструктура. Форма 9г-8. 2021 год. URL: [https://company.rzd.ru/ru/9388/page/15689?text\\_search=&form\\_id=25&year=2021](https://company.rzd.ru/ru/9388/page/15689?text_search=&form_id=25&year=2021) (дата обращения: 01.11.2023 г.)
11. Об утверждении правил исчисления сроков доставки грузов, порожних грузовых вагонов железнодорожным транспортом. URL: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=310401> (дата обращения: 01.11.2023).
12. Об утверждении Правил технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации. URL: <https://base.garant.ru/405042985/?ysclid=lpfaqoah2950810717> (дата обращения: 01.11.2023).
13. Перечень путей и станций, на которых разрешается отставление от движения поездов в адрес припортовых станций : приложение № 1 к распоряжению ОАО «РЖД» от 10.10.2015 г. № 2409р (в ред. распоряжения ОАО «РЖД» от 13.12.2018 г. № 2409р).

## References

1. Long-term development program of the open JSC «Russian Railways» until 2025 [Dolgosrochnaya programma razvitiya otkrytogo aktsionernogo obshchestva «Rossiyskie zheleznyye dorogi» do 2025 goda]. URL: <http://static.government.ru/media/files/zcAMxApAgy07PnJ42aXtXAgA2RXSVoKu.pdf> (access date: 01.11.2023).
2. Borodin A. F., Panin V. V., Lakhankin E. A. [et al.]. Increasing and using the transportation capacity of the landfills in the network: effective strategy and tactics [Povyshenie i ispol'zovanie perevoznoy moshnosti poligonov seti: effektivnyye strategiya i taktika]. *Railway Transport*. 2022. No. 7. Pp. 8–16. ISSN 0044-4448.
3. Novikov P. O. Development of technology for temporary suspension from movement and lifting of freight trains [Razrabotka tekhnologii vremennogo otstavleniya ot dvizheniya i pod'ema gruzovykh poezdov] : PhD in Engineering Thesis. Moscow, 2014. 133 p.
4. Saybatalov R. F. Methods of eliminating difficulties in the polygon operations of the railway network [Metody ustraneniya zatrudneniy v rabote poligonov zheleznodorozhnoy seti] : PhD in Engineering Thesis. Ekaterinburg, 2020. 231 p.
5. On approval of the statistical reporting form DO-5VTs «Report on the presence of freight trains and wagons delayed in progress (temporarily suspended from movement)» [Ob utverzhdenii formy statisticheskoy otchetnosti DO-5VTs «Otchet o nalichii zaderzhannykh v prodvizhenii (vremenno otstavlennykh ot dvizheniya) sostavov gruzovykh poezdov i vagonov v nih»]. URL: <https://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=EXP&n=826195&ysclid=lt2ix9f94v47831645#LwuwM5UakKhydbB11> (access date: 01.11.2023).
6. Instructional instructions on the organization of accounting for freight train trains delayed in the promotion (temporarily suspended from traffic) and the procedure for automated formation of internal statistical reporting DO-5VTs «Report on the presence of freight trains and wagons delayed in the promotion» [Instruktivnye ukazaniya ob organizatsii ucheta zaderzhannykh v prodvizhenii (vremenno otstavlennykh ot dvizheniya) sostavov gruzovykh poezdov i vagonov v nih»]. URL: <https://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=EXP&n=826195&ysclid=lt2ix9f94v47831645#LwuwM5UakKhydbB11> (access date: 01.11.2023).
7. The rules of interaction between the regional divisions of the functional branches of JSC «Russian Railways» in the organization of forced temporary suspension from the movement of freight trains going to the port railway stations and border crossings of the landfill of the Far Eastern Railway [Reglament vzaimodeystviya mezhdur regional'nymi podrazdeleniyami funktsional'nykh filialov ОАО «RZhD» pri organizatsii vyzhuzhennogo vremennogo otstavleniya ot dvizheniya gruzovykh poezdov, sleduyushih na priportovye zheleznodorozhnyye stantsii i pogranichnyye perekhody poligona Dal'nevostochnoy zheleznoy dorogi], 2019.
8. RZD. Information disclosure. Infrastructure. Form 9g-8. 2022 [RZhD. Raskrytie informatsii. Infrastruktura. Forma 9g-8. 2022 god]. URL: [https://company.rzd.ru/ru/9388/page/15689?text\\_search=&form\\_id=25&year=2022](https://company.rzd.ru/ru/9388/page/15689?text_search=&form_id=25&year=2022) (access date: 01.11.2023).
9. RZD. Information disclosure. Infrastructure. Form 9g-8. 2020 [RZhD. Raskrytie informatsii. Infrastruktura. Forma 9g-8. 2020 god]. URL: [https://company.rzd.ru/ru/9388/page/15689?text\\_search=&form\\_id=25&year=2020](https://company.rzd.ru/ru/9388/page/15689?text_search=&form_id=25&year=2020) (access date: 01.11.2023).
10. RZD. Information disclosure. Infrastructure. Form 9g-8. 2021 [RZhD. Raskrytie informatsii. Infrastruktura. Forma 9g-8. 2021 god]. URL: [https://company.rzd.ru/ru/9388/page/15689?text\\_search=&form\\_id=25&year=2021](https://company.rzd.ru/ru/9388/page/15689?text_search=&form_id=25&year=2021) (access date: 01.11.2023).
11. On approval of the rules for calculating the delivery time of goods, empty freight wagons by rail [Ob utverzhdenii pravil ischisleniya srokov dostavki gruzov, porozhnykh gruzovykh vagonov zheleznodorozhnym transportom]. URL: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=310401> (access date: 01.11.2023).
12. The list of tracks and stations at which it is allowed to delay the movement of trains to the address of the port stations [Perechen' putey i stantsiy, na kotorykh razreshaetsya otstavlenie ot dvizheniya poezdov v adres priportovykh stantsiy] : appendix No. 1 to the Order of JSC «RZD» dated 10.10.2015 No. 2409r (in edition of the Order of JSC «RZD» dated 13.12.2018 No. 2409r).

Научная статья  
УДК 624.131.439.5

## Изучение прочностных характеристик оттаивающих грунтов с учетом их снижения при динамическом воздействии

Вэньшао Синь<sup>1</sup>, Алексей Федорович Колос<sup>1</sup>, Андрей Владимирович Петряев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Санкт-Петербург, Россия

## Study of the strength characteristics of thawing soils, taking into account their decrease under dynamic influence

Wenshao Xin<sup>1</sup>, Alexey F. Kolos<sup>1</sup>, Andrey V. Petryaev<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

### Аннотация

В последние годы, несмотря на негативное воздействие глобального потепления климата на вечную мерзлоту, наблюдается рост протяженности железных дорог в Арктической зоне. Несущая способность оттаивающих многолетнемерзлых грунтов основания земляного полотна снижается, особенно под действием повышенной вибродинамической нагрузки, поэтому все более актуальным становится изучение их прочностных характеристик. В статье исследованы сцепление и угол внутреннего трения оттаивающего грунта, приведены результаты трехосных испытаний с использованием метода ортогональных экспериментов. Определены закономерности изменения прочностных характеристик оттаивающего грунта под воздействием таких факторов, как начальная температура образцов грунта  $T_0$ , влажность  $\omega$  и степень нагрузки  $n$ . На основе метода дисперсионного анализа (ANOVA) изучено влияние  $T_0$ ,  $\omega$  и  $n$  на прочностные характеристики грунта. По результатам трехосных испытаний получены уравнения регрессии динамического сцепления  $c_{дн}$  и динамического угла внутреннего трения  $\phi_{дн}$ . Результаты исследований могут быть использованы при расчете несущей способности оттаивающих многолетнемерзлых грунтов основания земляного полотна.

**Ключевые слова:** прочностные характеристики, железная дорога, оттаивающий грунт, ортогональное испытание, трехосное испытание, метод анализа иерархий, вибродинамическое воздействие

### Abstract

In recent years, despite the negative impact of global warming on permafrost, there has been an increase in the length of railways in the Arctic zone. The bearing capacity of thawing permafrost soils at the base of the roadbed is reduced, especially under the influence of increased vibrodynamical load, therefore, the study of their strength characteristics is becoming increasingly relevant. The article examines the adhesion and the angle of internal friction of thawing soil, and presents the results of triaxial tests using the method of orthogonal experiments. The patterns of changes in the strength characteristics of thawing soil under the influence of such factors as the initial temperature of soil samples, humidity and the load stage are determined. Based on the method of dispersion analysis (ANOVA), the influence of initial temperature of soil samples, humidity and the load stage on the strength characteristics of the soil was studied. Based on the results of triaxial tests, the regression equations of the dynamic coupling and the dynamic angle of internal friction were obtained. The results of the research can be used to calculate the bearing capacity of thawing permafrost soils at the base of the roadbed.

**Keywords:** strength characteristics, railway, thawing soil, orthogonal experiment, triaxial test, hierarchy analysis method, vibrodynamical impact

DOI: 10.20291/1815-9400-2024-1-67-72

### ВВЕДЕНИЕ

Согласно данным Межправительственной группы экспертов по изменению климата, в период с 1990 по 2100 г. глобальные приземные температуры повысятся на 1,4–5,8 °С [1]. Однако результаты прогнозов, выполненных в 2007 г., показали, что к концу XXI в. температура земной поверхности может увеличиться на 1,1–6,4 °С [2]. Вечная мерзлота обладает плохой термостабильностью и очень чувствительна к температуре. Когда природная среда или вмешательство человека влияют на температуру мерзлого грунта, лед в мерзлоте превращается из твердого состояния в жидкость, и в результате прочность вечномерзлых грунтов снижается. Это явление влияет на проектные решения при строительстве земляного полотна в районах распространения вечномерзлых грунтов [3, 4].

Прочность грунта — одно из важных механических свойств, необходимых для анализа и расчета устойчивости оснований земляного полотна и геотехнических сооружений. Большинство мерзлых грунтов обладают высокой прочностью и выдерживают большие внешние нагрузки. Когда такие грунты тают, они фактически теряют большую часть своей несущей способности [5]. Прочность грунта обычно определяется предельным напряжением на кривой зависимости напряжения от деформации. Инвариантную связь между напряжением и деформацией можно определить при статических трехосных испытаниях на сжатие [6]. Цель нашего исследования — изучить изменение прочностных характеристик грунта в период оттаивания при вибродинамическом воздействии от проходящих поездов.

### МЕТОД ИСПЫТАНИЯ

В исследованиях использовался стабилометр, разработанный компанией «Геотек», который позволяет выполнять статические трехосные эксперименты в соответствии с ГОСТ Р 59597-2021 [7]. Принципиальная схема прибора показана на рис. 1.

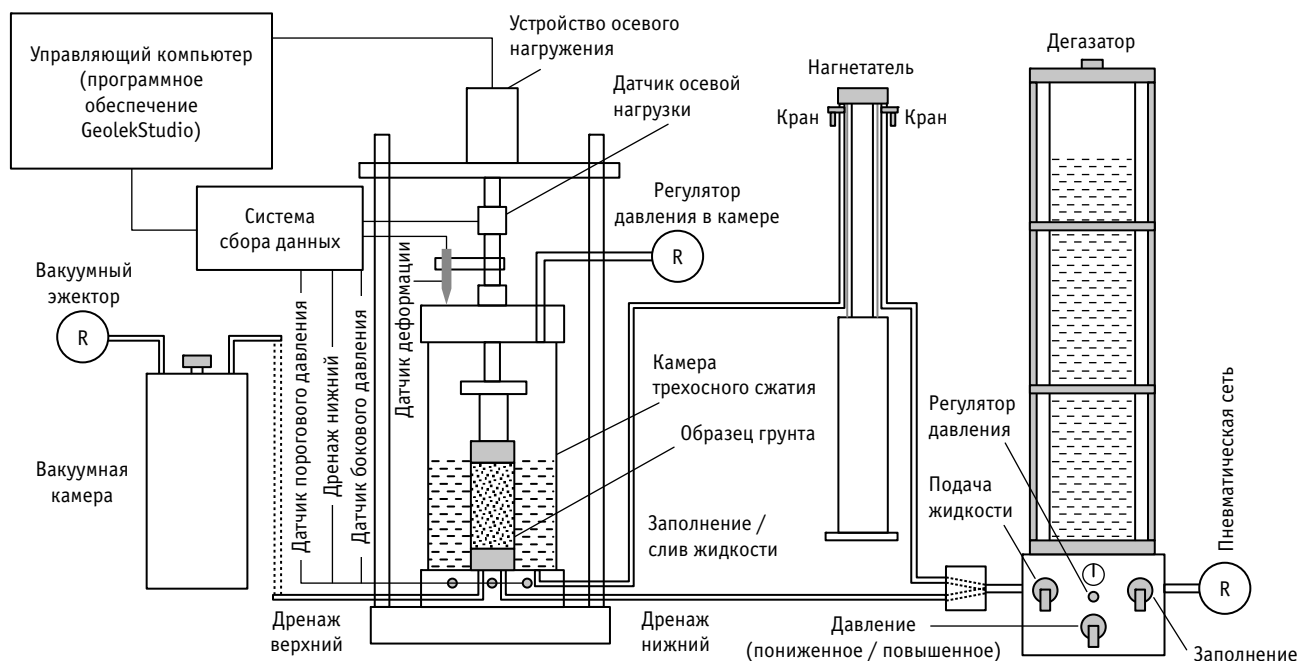


Рис. 1. Принципиальная схема установки для испытания грунтов методом статического трехосного сжатия

Таблица 1

Физические характеристики грунта

Параметр	Оптимальная влажность, %	Максимальная плотность сухого грунта, г/см <sup>3</sup>	Влажность на границе текучести $\omega_L$ , %	Влажность на границе раскатывания $\omega_p$ , %
Значение	9,2	1,928	20,78	14,37
Параметр	Число пластичности $I_p$ , %	Естественная влажность $\omega_{er}$ , %	Показатель текучести $I_L$ , д. ед.	По ГОСТ 25100-2020 [8] супесь песчанистая
Значение	6,41	3,24	< 0	

Основные этапы испытаний: 1) подготовка воды и льда с температурой 0 °С; 2) подготовка образцов грунта; 3) установка образцов; 4) заполнение образцов жидкостью; 5) подключение датчиков; 6) установка параметров в программном обеспечении, начало испытания; 7) окончание испытания при деформации, достигшей 20 %.

Основные физические свойства исследуемого грунта приведены в табл. 1.

Во время испытания в трехосной камере находится смесь льда и воды, чтобы обеспечить поддержание температуры внутри камеры на уровне 0 °С. Цель — убедиться, что образец грунта находится в процессе оттаивания.

К факторам испытаний относятся: начальная температура образца грунта  $T_0$ , влажность  $\omega$  и степень нагрузки  $n$ . В соответствии с ортогональным методом испытаний [9] принят трехфакторный и трехуровневый план испытаний, включающий 9 условий. Проведено три испытания с различными давлениями (50, 100 и 150 кПа) при каждом условии, всего 27 испытаний.

К факторам предъявлялись следующие требования.

Начальная температура  $T_0$  образца грунта должна быть отрицательной, т. е. гарантировать, что образец находится в за-

мороженном состоянии. Поэтому начальные температуры образцов грунтов установлены равными -5, -2 и 0 °С.

Оптимальная влажность  $\omega$  исследуемого грунта 9,2 %, влажность на границах раскатывания  $\omega_p$  14,3 %. Влажность грунта установлена на уровне 9,2, 12,0 и 14,3 %.

Согласно ГОСТу 59597-2021, значение ступени  $n$  составляет 20 % бокового давления. Ступени нагрузки были установлены на 10, 20 и 30 %.

Факторы, влияющие на прочностные параметры, и их значения при статических трехосных испытаниях приведены в табл. 2, план испытаний — в табл. 3.

Таблица 2

Факторы, влияющие на прочностные параметры, и их значения при статических трехосных испытаниях

$T_0$ , °С	$\omega$ , %	$n$ , %
A	B	C
A1 (-5)	B1 (9,2)	C1 (10)
A2 (-2)	B2 (12,0)	C2 (20)
A3 (0)	B3 (14,3)	C3 (30)



Таблица 3

План испытаний (три испытания  
со всесторонним давлением 50, 100, 150 кПа)

№ испытания	A	B	C
C-1	A1	B1	C1
C-2	A1	B2	C3
C-3	A1	B3	C2
C-4	A2	B1	C3
C-5	A2	B2	C2
C-6	A2	B3	C1
C-7	A3	B1	C2
C-8	A3	B2	C1
C-9	A3	B3	C3

Таблица 4

Значения параметров  $c_{ст}$  и  $\varphi_{ст}$  при статической нагрузке

№ испытания	C-1	C-2	C-3	C-4	C-5	C-6	C-7	C-8	C-9
$c_{ст}$ , кПа	57,65	64,39	67,65	49,63	51,87	53,48	41,98	44,32	48,51
$\varphi_{ст}$ , °	25,08	18,28	13,36	23,57	16,14	12,99	21,97	15,11	9,87

Влияние факторов испытания на сцепление  $c_{ст}$  и угол внутреннего трения  $\varphi_{ст}$  определено с помощью дисперсионного анализа [11] (табл. 5).

Таблица 5

Результаты дисперсионного анализа факторов, влияющих на параметры прочности  $c_{ст}$  и  $\varphi_{ст}$

Источник отклонений	$c_{ст}$		$\varphi_{ст}$	
	$F$	$p$	$F$	$p$
Начальная температура $T_0$ , °C	241,814	0,004**	20,772	0,046*
Влажность $\omega$ , %	32,718	0,030*	259,197	0,004**
Степень нагрузки $n$ , %	4,592	0,179	0,735	0,576
$R^2$	0,996		0,996	

\* $p < 0,05$  (обычно) \*\* $p < 0,01$  (существенно)

Примечание. Значения  $F$ ,  $p$  и  $R^2$  определены в соответствии с [12].

**РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ И АНАЛИЗ**

Прочность грунта на сдвиг определяется напряжением, соответствующим 15 % деформации [10]. По результатам прочности на сдвиг, полученной при трех значениях всестороннего давления, построены круги Мора относительно напряжения  $\sigma$ - $\tau$ , как показано на рис. 2.

Через уравнение касательной к кругам Мора получены значения параметров прочности на сдвиг сцепления ( $c_{ст}$ ) и угла внутреннего трения ( $\varphi_{ст}$ ) оттаивающего грунта при статической нагрузке (табл. 4).

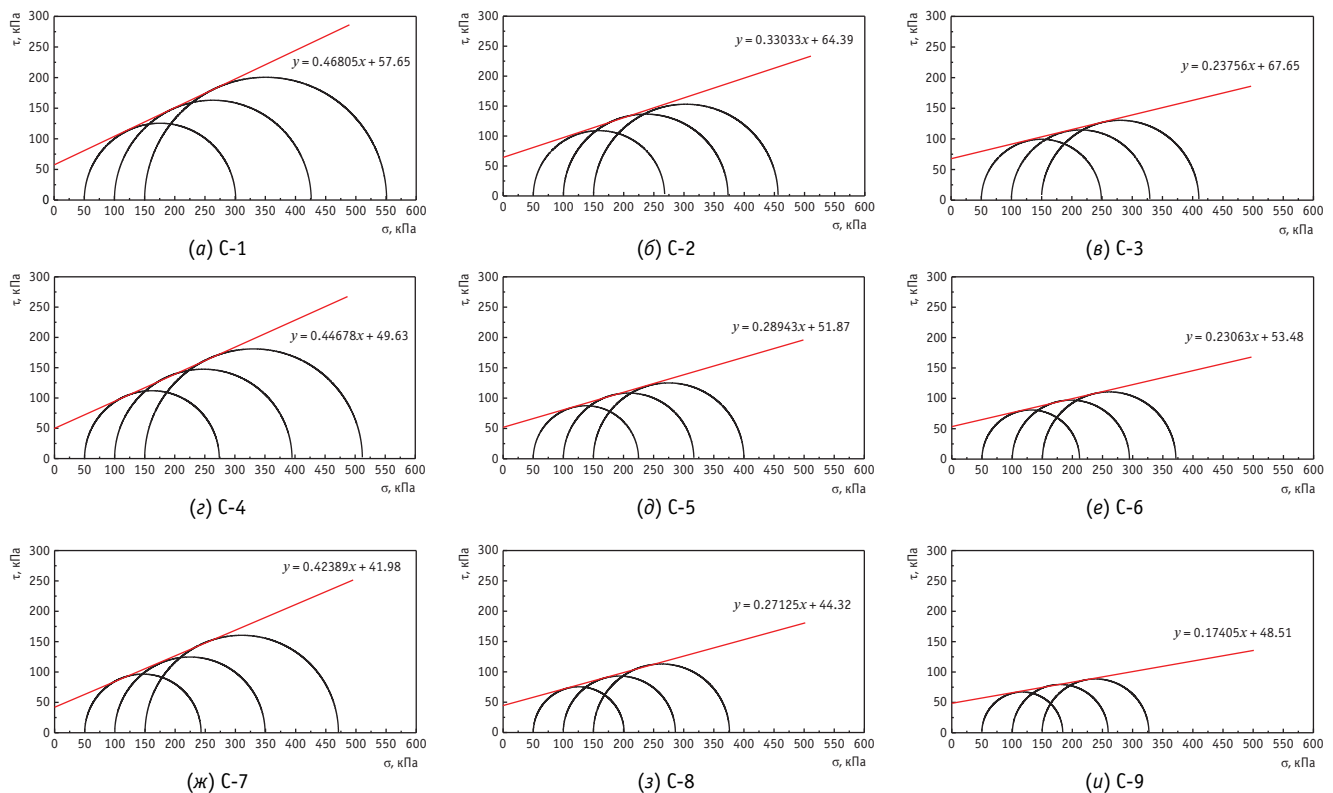


Рис. 2. Круги Мора

По полученным результатам можно сделать вывод, что начальная температура образца грунта  $T_0$  имеет существенную значимость для сцепления  $c_{СТ}$  и обычную значимость для угла внутреннего трения  $\varphi_{СТ}$ . Влажность имеет обычную значимость для сцепления  $c_{СТ}$  и существенную значимость для угла внутреннего трения  $\varphi_{СТ}$ .

Графики зависимости сцепления  $c_{СТ}$  и угла внутреннего трения  $\varphi_{СТ}$  от факторов испытания представлены на рис. 3 и 4.

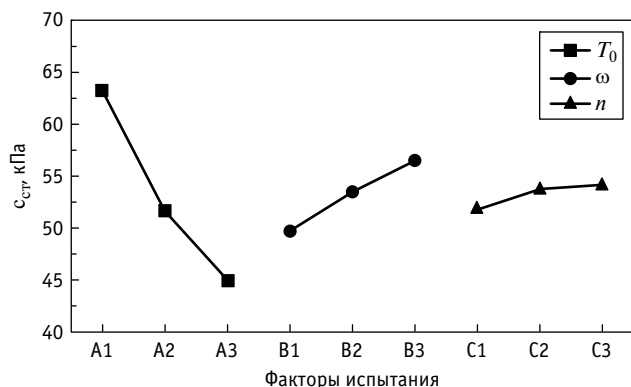


Рис. 3. График зависимости  $c_{СТ}$  от факторов испытания

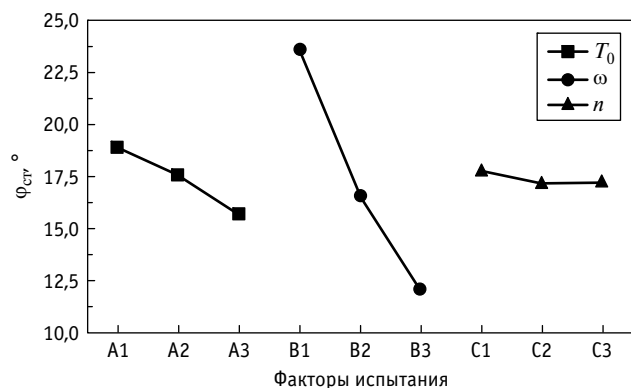
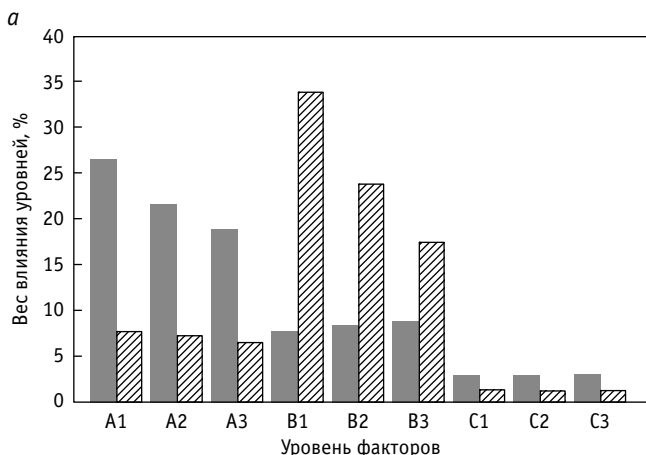


Рис. 4. График зависимости  $\varphi_{СТ}$  от факторов испытания



Из рис. 3 и 4 видно, что влияние начальной температуры на прочностные параметры  $c_{СТ}$  и  $\varphi_{СТ}$  одинаково, а влияние влажности различно. В частности, при повышении температуры замороженный образец находится в процессе оттаивания, а льдистость постепенно уменьшается, что снижает прочность грунта. В результате по мере роста температуры оба параметра  $c_{СТ}$  и  $\varphi_{СТ}$  снижаются.

Образцы грунта с высокой начальной влажностью в мерзлом состоянии имеют высокую льдистость. Присутствие льда усиливает цементацию между частицами грунта, поэтому с ростом влажности сцепление увеличивается.

Лед в процессе оттаивания превращается в жидкую воду. Образцы грунтов с высокой начальной льдистостью имеют внутри себя высокое содержание жидкой воды, и чем больше образовавшийся смазочный слой, тем очевиднее будет ослабление трения. Поэтому по мере увеличения начальной влажности (начальной льдистости) угол внутреннего трения оттаивающего грунта уменьшается.

Таким образом, из анализа влияния влажности на параметры прочности видно, что льдистость определяет значение сцепления  $c_{СТ}$ , а содержание жидкой воды — величину угла внутреннего трения  $\varphi_{СТ}$ .

На основе метода анализа иерархий был определен вес влияния факторов на результаты испытаний [12] (рис. 5).

Из представленных результатов видно, что вес влияния начальной температуры  $T_0$  на сцепление  $c_{СТ}$  и на угол внутреннего трения  $\varphi_{СТ}$  составляет 66,65 и 21,31 % соответственно. Вес влияния влажности — 24,74 и 74,96 %, а вес влияния степени нагрузки — 8,61 и 3,73 %.

### ЭФФЕКТ ДИНАМИЧЕСКОГО СНИЖЕНИЯ

Влияние вибродинамической нагрузки на прочностные характеристики грунтов основания насыпи следует учитывать дополнительно по результатам вибростабилометрических трехосных испытаний, выполненных И. В. Прокудиным [13]. В его исследовании приведена связь между параметрами статической  $c_{СТ}$ ,  $\varphi_{СТ}$  и динамической  $c_{ДН}$ ,  $\varphi_{ДН}$  прочности для оттаивающих глинистых грунтов:

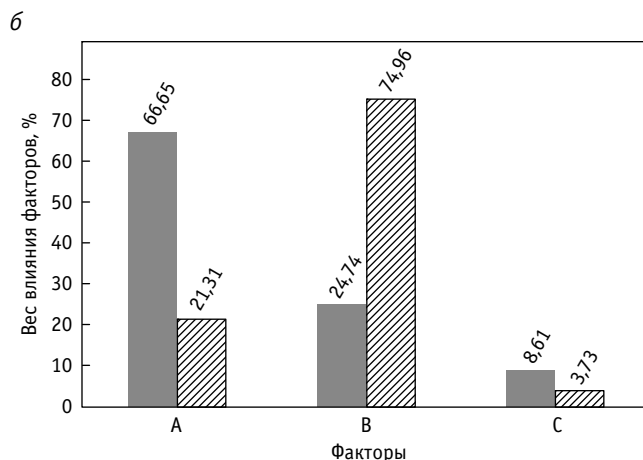


Рис. 5. Влияние уровней факторов (а) и факторов (б) на параметры прочности:

■ —  $c_{СТ}$ ; ▨ —  $\varphi_{СТ}$

$$K_{c,t} = \left(1 - \frac{c_{дн}}{c_{ст}}\right) \cdot 100 \% ; \quad (1)$$

$$K_{\varphi,t} = \left(1 - \frac{\varphi_{дн}}{\varphi_{ст}}\right) \cdot 100 \% , \quad (2)$$

где  $K_{c,t}$  — коэффициент снижения сцепления оттаивающих грунтов при действии вибродинамической нагрузки;  $K_{\varphi,t}$  — коэффициент снижения угла внутреннего трения оттаивающих грунтов при действии вибродинамической нагрузки;  $c_{дн}$  и  $\varphi_{дн}$  — сцепление и трение оттаивающих глинистых грунтов, определяемых при воздействии вибродинамической нагрузки;  $c_{ст}$  и  $\varphi_{ст}$  — сцепление и трение оттаивающих глинистых грунтов, определяемых в статических условиях. Нижний индекс  $t$  обозначает оттаивающее состояние грунта.

По формулам (1) и (2) можно вывести расчетные выражения для  $c_{дн}$  и  $\varphi_{дн}$ :

$$c_{дн} = c_{ст}(1 - K_{c,t}); \quad (3)$$

$$\varphi_{дн} = \varphi_{ст}(1 - K_{\varphi,t}). \quad (4)$$

Влияние температуры на величину коэффициентов снижения сцепления ( $K_{c,t}$ ) и угла внутреннего трения ( $K_{\varphi,t}$ ) показано на рис. 6.

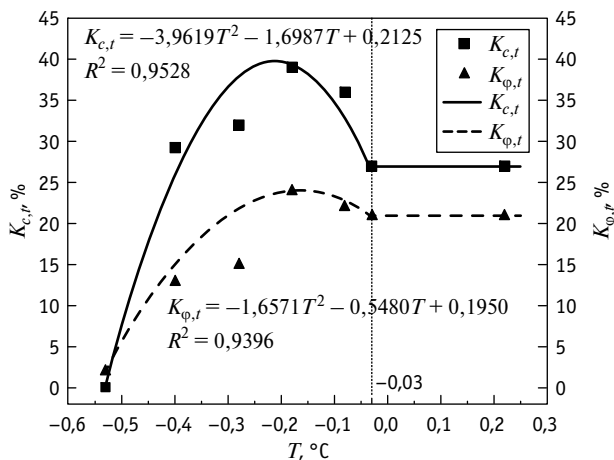


Рис. 6. Значения коэффициентов снижения сцепления ( $K_{c,t}$ ) и угла внутреннего трения ( $K_{\varphi,t}$ ) в зависимости от начальной температуры  $T_0$  [13]

#### Сведения об авторах:

**Вэньшао Синь**, аспирант кафедры «Строительство дорог транспортного комплекса» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I

**Алексей Федорович Колос**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительство дорог транспортного комплекса» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I

**Андрей Владимирович Петряев**, доктор технических наук, старший научный сотрудник кафедры «Строительство дорог транспортного комплекса» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I

Согласно результатам исследований, регрессия коэффициентов снижения как квадратичная функция температуры составляет:

$$K_{c,t} = -3,9619T^2 - 1,6987T + 0,2125; \quad (5)$$

$$K_{\varphi,t} = -1,6571T^2 - 0,5480T + 0,1950. \quad (6)$$

#### УРАВНЕНИЯ РЕГРЕССИИ

На основании данных лабораторных исследований с использованием методологии поверхности отклика (RSM) построены множественные уравнения линейной регрессии:

$$c_{ст} = -3,674T_0 + 1,333\omega + 11,800n + 26,573; \quad (7)$$

$$\varphi_{ст} = -0,635T_0 - 2,258\omega - 2,433n + 43,096. \quad (8)$$

Степень соответствия уравнения (7) составляет  $R^2 = 0,993$ , уравнения (8)  $R^2 = 0,987$ , это показывает, что сцепление  $c_{ст}$  и угол внутреннего трения  $\varphi_{ст}$  имеют хорошую линейную связь с тремя исследованными факторами.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оттаивание вечной мерзлоты приводит к снижению несущей способности основания земляного полотна, в результате происходят его деформации. Важными параметрами для расчета несущей способности основания земляного полотна железных дорог являются сцепление и угол внутреннего трения оттаивающего грунта при динамической нагрузке от поездов.

В результате проведенных ортогональных испытаний получены значения сцепления и угла внутреннего трения под воздействием исследуемых факторов. Значимость трех факторов для параметров прочности проанализирована с помощью программного комплекса ANOVA. Результаты весового анализа доказывают, что факторами, влияющими на сцепление (от большего к меньшему), являются начальная температура образца грунта, влажность и степень нагрузки. Факторами, влияющими на угол внутреннего трения, являются влажность, начальная температура образца грунта и степень нагрузки. Влияние влажности на сцепление и угол внутреннего трения различно. Установлены уравнения прогнозирования динамического сцепления и динамического угла внутреннего трения с учетом влияния вибродинамической нагрузки.

#### Authors information:

**Wenshao Xin**, postgraduate student of Road Construction of Transport Systems Department, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University

**Alexey F. Kolos**, PhD in Engineering, Associate Professor of Road Construction of Transport Systems Department, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University

**Andrey V. Petryaev**, DSc in Engineering, Senior Researcher of Road Construction of Transport Systems Department, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University

## Литература

1. Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group 1 to the Third Assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / J. T. Houghton, Y. Ding, D. J. Griggs [et al.]. Cambridge : Cambridge University Press, 2001. 881 p.
2. Shen Y. Key Results from Summary for Policymakers of IPCC WGI AR4 // *Journal of Glaciology and Geocryology*. 2007. Issue 29 (01). Pp. 156–156.
3. The Impact of Engineering-geologic Conditions on the Development of Railway Subgrade Design Solutions / V. A. Alpysova, N. S. Bushuev, S. V. Shkurnikov, D. O. Shulman // *Procedia Engineering*. 2017. No. 189. Pp. 752–758.
4. Особенности проектирования трассы железной дороги в условиях вечной мерзлоты / Н. С. Бушуев, С. В. Шкурников, В. А. Герасимов [и др.] // *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование*. 2019. № 3 (63). С. 135–142. DOI: 10.26731/1813-9108.2019.3(63).135–142.
5. Калабина М. В. Прочностные и деформационные свойства оттаивающих грунтов при различных видах напряженного состояния // *Геология, геоэкология и ресурсный потенциал Урала и сопредельных территорий*. 2019. № 7. С. 212–216.
6. Методика определения характеристик ползучести, длительной прочности и сжимаемости мерзлых грунтов / С. С. Вялов, С. Э. Городецкий, В. Ф. Ермаков [и др.]. Москва : Наука, 1966. 132 с.
7. ГОСТ Р 59597-2021. Грунты. Метод трехосного сжатия мерзлых грунтов. Москва : Российский институт стандартизации, 2021. 15 с.
8. ГОСТ 25100-2020. Грунты. Классификация. Москва : Стандартинформ, 2020. 41 с.
9. Сидняев Н. И. Теория планирования эксперимента и анализ статистических данных. Москва : Юрайт, 2020. 495 с.
10. GBT 50123-2019. Standart for geotechnical testing method. Beijing : China Planning Press, 2019. 714 p.
11. Wang Y., Sui S., Wang A. *Mathematical Statistics and MATLAB Engineering Data Analysis*. Beijing : Tsinghua University Press, 2006. 328 p.
12. Zhuang C., He C. *Basics of applied mathematical statistics*. Guangzhou : South China University of Technology Press, 2013. 426 p.
13. Прокудин И. В. Исследование изменения прочностных характеристик пластичномерзлых глинистых грунтов железнодорожного земляного полотна при действии вибродинамической нагрузки : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Ленинград, 1970. 240 с.

## References

1. Houghton J. T., Ding Y., Griggs D. J. [et al.]. *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group 1 to the Third Assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge : Cambridge University Press, 2001. 881 p.
2. Shen Y. Key Results from Summary for Policymakers of IPCC WGI AR 4. *Journal of Glaciology and Geocryology*. 2007. Issue 29 (01). Pp. 156–156.
3. Alpysova V. A., Bushuev N. S., Shkurnikov S. V., Shulman D. O. The Impact of Engineering-geologic Conditions on the Development of Railway Subgrade Design Solutions. *Procedia Engineering*. 2017. No. 189. Pp. 752–758.
4. Bushuev N. S., Shkurnikov S. V., Gerasimov V. A. [et al.]. Design aspects of railway lines in permafrost conditions [Osobennosti proektirovaniya trassy zheleznoy dorogi v usloviyakh vechnoy merzloty]. *Modern technologies. System analysis. Modeling*. 2019. No. 3 (63). Pp. 135–142. DOI: 10.26731/1813-9108.2019.3(63).135–142.
5. Kalabina M. V. Strength and deformation properties of thawing soils under various types of stress conditions [Prochnostnye i deformatsionnye svoystva ottaivayushhikh gruntov pri razlichnykh vidakh napryazhennogo sostoyaniya]. *Geology, geoecology and resource potential of the Urals and adjacent territories*. 2019. No. 7. Pp. 212–216.
6. Vyalov S. S., Gorodetskiy S. E., Ermakov V. F. [et al.]. Methodology for determining the characteristics of time yield, long-term strength and compressibility of frozen soils [Metodika opredeleniya kharakteristik polzuchesti, dlitel'noy prochnosti i szhimaemosti merzlykh gruntov]. Moscow : Science, 1966. 132 p.
7. GOST R 59597-2021. Soils. Laboratory method for triaxial test of frozen soils [Grunty. Metod trekhosnogo szhatiya merzlykh gruntov]. Moscow : Russian Standardization Institute, 2021. 15 p.
8. GOST 25100-2020. Soils. Classification [Grunty. Klassifikatsiya]. Moscow : Standardinform, 2020. 41 p.
9. Sidnyaev N. I. Theory of experiment planning and statistical data analysis [Teoriya planirovaniya eksperimenta i analiz statisticheskikh dannykh]. Moscow, 2020. 495 p.
10. GBT 50123-2019. Standart for geotechnical testing method. Beijing : China Planning Press, 2019. 714 p.
11. Wang Y., Sui S., Wang A. *Mathematical Statistics and MATLAB Engineering Data Analysis*. Beijing : Tsinghua University Press, 2006. 328 p.
12. Zhuang C., He C. *Basics of applied mathematical statistics*. Guangzhou : South China University of Technology Press, 2013. 426 p.
13. Prokudin I. V. Investigation of changes in the strength characteristics of plastically frozen clay soils of a railway roadbed under the action of a vibrodynamic load [Issledovanie izmeneniya prochnostnykh kharakteristik plastichnomerzlykh glinistykh gruntov zheleznodorozhnogo zemlyanogo polotna pri deystvii vibrodinamicheskoy nagruzki] : PhD in Engineering Thesis. Leningrad, 1970. 240 p.

Объем статьи 0,67 авторских листа

Научная статья  
УДК 621.391

## Анализ качества функционирования квадратурных приемников с нелинейной обработкой сигналов АЛСН в условиях воздействия флуктуационной помехи

Алексей Сергеевич Хохрин<sup>1</sup>, Руслан Рифович Юсупов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Самарский государственный университет путей сообщения, Самара, Россия

## Quality analysis of operating the quadrature receivers with nonlinear processing of CALS signals under the influence of fluctuation interference

Alexey S. Khokhrin<sup>1</sup>, Ruslan R. Yusupov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Samara State Transport University, Samara, Russia

### Аннотация

Подавление помех в канале автоматической локомотивной сигнализации непрерывного типа (АЛСН) остается актуальной задачей. В статье исследуется функционирование квадратурных приемников с нелинейной обработкой сигналов АЛСН при воздействии флуктуационной помехи. Качество функционирования приемников анализировалось на разработанных ранее имитационных моделях с использованием экспериментально полученных данных. Результаты исследований показали, что квадратурный приемник и варианты его реализации с добавлением блоков нелинейного преобразования сигнала более устойчивы к воздействию флуктуационной помехи, чем приемник с линейным амплитудным детектированием, и более безопасны в эксплуатации.

**Ключевые слова:** автоматическая локомотивная сигнализация непрерывного типа, квадратурный приемник, помехоустойчивость, безопасность, нелинейное преобразование сигнала, флуктуационная помеха

### Abstract

The fight against interference in channels of continuous automatic locomotive signaling (CALS) remains an urgent task. The article examines the functioning of quadrature receivers with nonlinear processing of CALS signals under the influence of fluctuation interference. The performance quality of the receivers was analyzed using previously developed simulation models using experimentally obtained data. The research results showed that the quadrature receiver and its implementation options with the addition of nonlinear signal conversion blocks are more resistant to the effects of fluctuation interference than a receiver with linear amplitude detection and they are safer in operation.

**Keywords:** continuously working automatic cab signalling, quadrature receiver, interference sustainability, safety, nonlinear signal conversion, fluctuation interference

DOI: 10.20291/1815-9400-2024-1-73-78

### ВВЕДЕНИЕ

**Н**а сети железных дорог Российской Федерации для передачи информации о сигнале впередирасположенного напольного светофора в кабину машиниста локомотива используется автоматическая локомотивная сигнализация непрерывного типа (АЛСН). Информация передается по индуктивно-рельсовой линии связи от формирующего сигнал напольного оборудования до входа локомотивного приемника, который является элементом структуры локомотивных микропроцессорных устройств безопасности. От устойчивой работы приемника во многом зависит безопасность движения поездов.

В канале АЛСН действуют различного вида помехи (импульсные, гармонические, флуктуационные), которые приводят к сбоям в работе приемника. Для повышения помехоустойчивости приемника и, как следствие, уменьшения количества сбоев, вызываемых помехами, используются различные решения [1–3].

С целью снижения влияния действующих в канале АЛСН помех ранее был предложен приемник сигналов АЛСН с квадратурными каналами (квадратурный приемник) [4]. Для борьбы с импульсными и гармоническими помехами в двух сечениях приемника добавлены блоки нелинейного преобразования сигнала (БНП): комбинированный подавитель импульсных и флуктуационных помех на входе приемника и блок с зоной нечувствительности на выходе квадратурного коррелятора. Для определения эффективности каждого из предложенных решений были проведены статистические эксперименты методом имитационного моделирования. В результате получены количественные оценки помехоустойчивости при воздействии флуктуационных, импульсных и гармонических помех для приемника с линейным амплитудным детектированием (АД-приемника) и для следующих вариантов реализации квадратурного приемника:

- 1) без БНП (КП);
- 2) с блоком с зоной нечувствительности (КПЗ);
- 3) с комбинированным подавителем помех, в состав которого входят схема ШОУ (широкая полоса — амплитудный ограничитель — узкая полоса) и схема бланкирования (КПП) [5];

4) с комбинированным подавителем помех и блоком с зоной нечувствительности (КППЗ).

Имитационные модели приемников с БНП построены в среде Simulink на основе разработанной ранее модели КП [6].

Данная работа является продолжением цикла исследований, направленных на выявление наиболее помехоустойчивого и безопасного приемника сигналов АЛСН из перечисленных выше.

## ОЦЕНКА ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ ПРИЕМНИКОВ

В статье представлены результаты эксперимента по определению помехоустойчивости и безопасности перечисленных выше четырех вариантов реализации квадратурного приемника при воздействии аддитивной флуктуационной помехи от постоянного тягового тока электроподвижного состава. Суть эксперимента заключалась в подаче на вход всех приемников одной и той же аддитивной смеси сигнала и флуктуационной помехи и в фиксации количества допущенных каждым из приемников ошибок в приеме. В качестве модели флуктуационной помехи использовался нормальный белый шум с нулевым математическим ожиданием и варьируемой дисперсией.

Методика проведения эксперимента во многом повторяет методику, представленную в [7]. В качестве количественного показателя помехоустойчивости приемников используется средняя вероятность ошибки  $P_{\text{ош}}$  при приеме кодового символа. В эксперименте с флуктуационной помехой управляемыми факторами являются амплитуда сигнала  $U_c$  на входе приемников, коэффициент асимметрии приемного тракта  $K_a$ , дисперсия флуктуационной помехи  $\sigma_{\text{ш}}^2$ , а также параметр Initial Seed (IS), задающий начальное условие генерации помехи и отвечающий за формирование той или иной последовательности мгновенных значений напряжения помехи.

В данном эксперименте значения  $U_c$  и  $K_a$  были приняты равными 280 мВ среднеквадратического значения (соответствует номинальному напряжению сигнала на входе локомотивного приемника) и 6 % (допустимое значение продольной асимметрии рельсовой линии) при электротяге постоянного тока.

В качестве тестовых сигналов, подаваемых на входы приемников, использовались сигналы кодовых комбинаций (КК) «З» и «КЖ» с длительностью кодового цикла 1,6 с. Выбор этих кодовых комбинаций обусловлен их структурой и видом применяемой в сигнале АЛСН модуляции. Амплитудная модуляция с «пассивной паузой» характеризуется тем, что в интервале сигнала его энергия равна нулю, в отличие от импульса с ненулевой энергией, а значит, интервал является наименее защищенным от воздействия помех элементом кодового сигнала АЛСН. В сигнале КК «З» суммарная доля длительностей интервалов в кодовом цикле (степень его заполнения интервалами) минимальна, а в КК «КЖ» — максимальна из всех трех возможных кодовых комбинаций. Поэтому их использование в эксперименте позволит получить соответственно максимальную и минимальную оценки помехоустойчивости приемников.

За один прогон моделировался процесс приема 100000 символов кодовых комбинаций. Это позволяло определять

значения  $P_{\text{ош}}$  с точностью до четырех знаков после запятой. Для обеспечения данной точности и достоверности результатов моделирования в каждом опыте (при одном и том же значении  $\sigma_{\text{ш}}^2$ ) выполнялось пять прогонов моделей приемников.

Представляет интерес сравнение теоретических оценок помехоустойчивости некогерентного и когерентного линейных приемников АМ-сигналов и экспериментальных оценок помехоустойчивости исследуемых приемников. Для этого на одном графике необходимо в соответствии с выражениями, приведенными в [8], построить кривые теоретических зависимостей средней вероятности ошибки от отношения «сигнал/помеха», а также кривые полученных для всех исследуемых приемников экспериментальных зависимостей  $P_{\text{ош}}(h^2)$ . При этом на аргумент  $h^2$  накладывается следующее ограничение. Поскольку величина  $P_{\text{ош}}$  фиксируется с четырьмя значащими цифрами после запятой, то и верхнее значение  $h^2$  должно удовлетворять условию  $P_{\text{ош}}(h^2) \geq 0,0001$ , что равносильно  $h^2 \leq 34$ . Поэтому выбраны фиксированные значения  $h^2 = 4, 6, 8, \dots, 34$ . Так как в экспериментах амплитуда сигнала неизменна, то варьирование  $h^2$  можно обеспечить путем изменения дисперсии генерируемой флуктуационной помехи  $\sigma_{\text{ш}}^2$ . Расчет  $\sigma_{\text{ш}}^2$  осуществлялся в соответствии с методикой, представленной в [6].

В данном исследовании оценка помехоустойчивости предлагаемых КП с БНП проводилась путем сравнения их помехоустойчивости с помехоустойчивостью АД-приемника и теоретических зависимостей вероятности ошибки от отношения «сигнал/помеха» для линейных оптимальных некогерентного и когерентного приемников АМ-сигналов.

На рис. 1а, б представлены графики зависимостей  $P_{\text{ош}} = f(h^2)$  для исследуемых приемников при прогонах моделей с использованием сигнала КК «З» и «КЖ» соответственно, а также теоретические кривые для когерентного и некогерентного приемников АМ-сигналов (показаны пунктирными линиями).

Представленные на рис. 1а графики позволяют сделать следующие выводы:

- 1) помехоустойчивость всех исследуемых приемников при приеме сигнала КК «З» в диапазоне значений  $h^2 = 4-26$  выше, чем некогерентного приемника, а в диапазоне значений  $h^2 = 10-34$  ниже, чем когерентного;
- 2) наименее помехоустойчивым из исследованных во всем диапазоне значений  $h^2$  является АД-приемник;
- 3) помехоустойчивость КП и КПЗ в диапазоне значений  $h^2 = 12-32$  значительно выше, чем АД-приемника, КПП и КППЗ, а в диапазоне значений  $h^2 = 4-10$  она сопоставима;
- 4) помехоустойчивость КПП и КППЗ в диапазоне значений  $h^2 = 4-10$  сопоставима с помехоустойчивостью когерентного приемника;
- 5) помехоустойчивость АД-приемника, КПП и КППЗ в диапазоне значений  $h^2 = 28-34$  сопоставима с помехоустойчивостью некогерентного приемника.

Таким образом, добавление в КП блока с зоной нечувствительности незначительно повышает его помехоустойчивость, а добавление комбинированного подавителя помех — незначительно уменьшает. Среди исследованных квадратурных приемников самым помехоустойчивым является КПЗ.



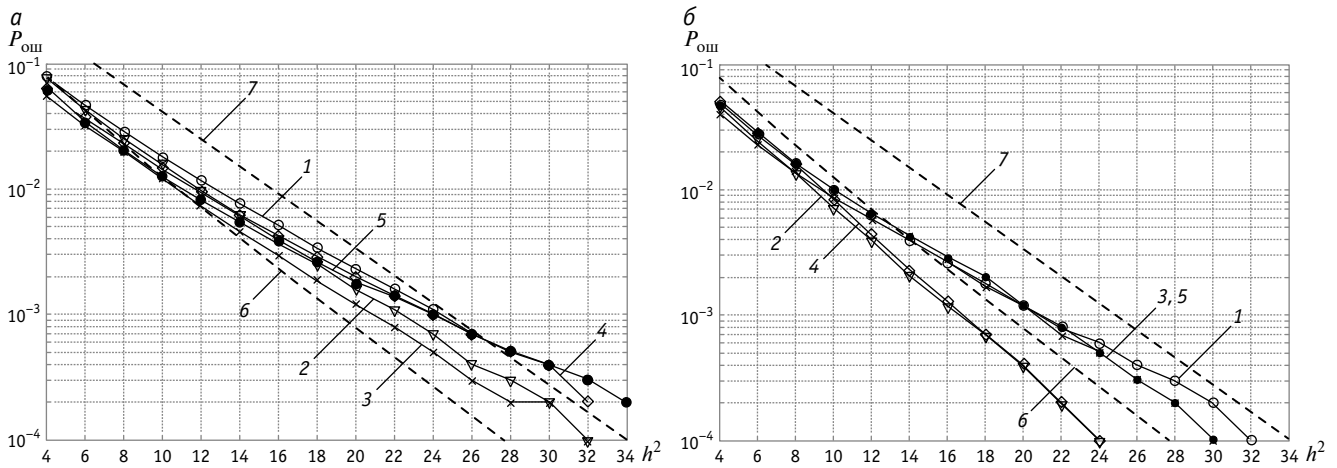


Рис. 1. Графики зависимостей вероятности ошибки от отношения «сигнал/помеха» при приеме сигнала КК «З» (а) и КК «КЖ» (б) для АД-приемника (1), КП (2), КПЗ (3), КПП (4), КППЗ (5), когерентного (6) и некогерентного (7) приемника

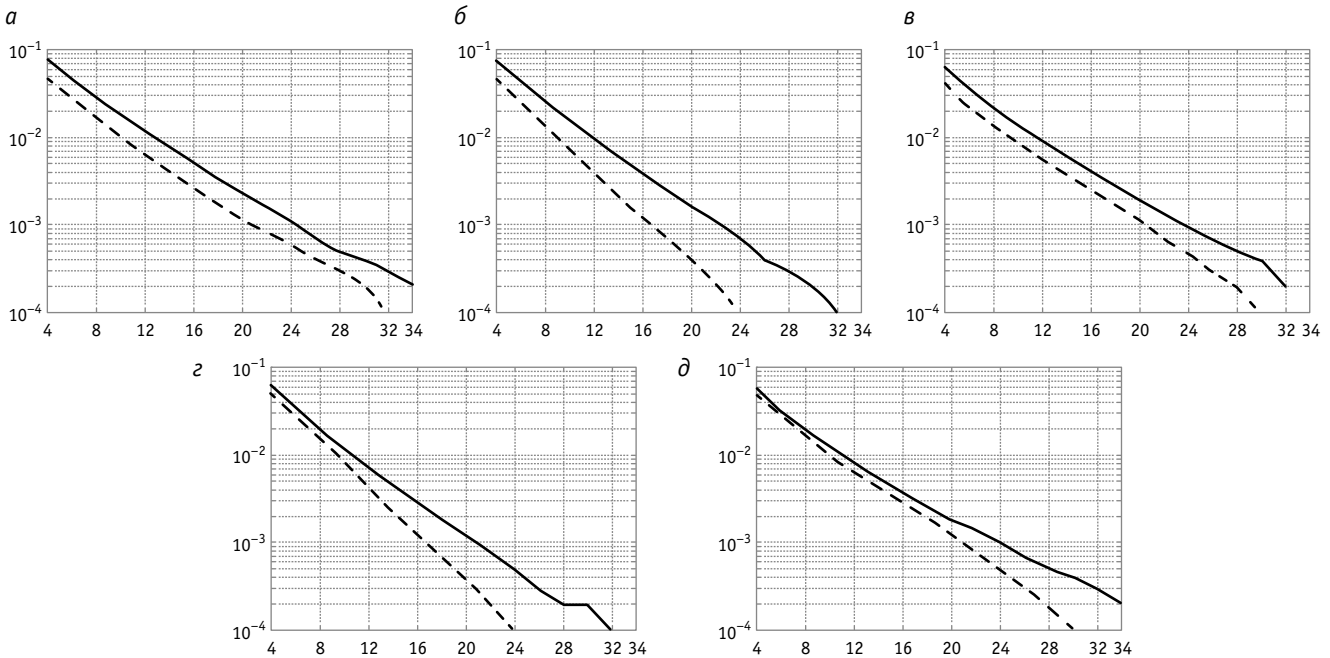


Рис. 2. Нижняя и верхняя границы помехоустойчивости при приеме КК «З» (сплошная линия) и КК «КЖ» (пунктир) для АД-приемника (а), КП (б), КПЗ (в), КПП (г) и КППЗ (д)

Из анализа рис. 1б можно заключить следующее:

- 1) наименее помехоустойчивым из исследованных при приеме сигнала КК «КЖ» является АД-приемник, наиболее помехоустойчивыми — КП и КПП;
- 2) помехоустойчивость всех исследованных приемников в диапазоне значений  $h^2 = 4-12$  значительно выше, чем когерентного;
- 3) помехоустойчивость всех исследованных приемников во всем диапазоне значений  $h^2$  значительно выше, чем некогерентного;
- 4) помехоустойчивость КПЗ и КППЗ в диапазоне значений  $h^2 = 24-30$  выше, чем АД-приемника, а в диапазоне значений  $h^2 = 4-22$  она сопоставима.

Таким образом, добавление в КП блока с зоной нечувствительности незначительно уменьшает его помехоустойчивость, а добавление комбинированного подавителя помех, напротив, незначительно повышает.

В целом из рис. 1а, б можно сделать вывод, что помехоустойчивость квадратурных приемников с БНП значительно выше, чем АД-приемника.

На рис. 2а–д представлены графики, показывающие для каждого из исследуемых приемников нижнюю (при приеме сигнала КК «З») и верхнюю (при приеме сигнала КК «КЖ») границы помехоустойчивости. На всех графиках по осям отложены те же величины, что и на рис. 1а, б. Сплошная линия соответствует средней вероятности ошибки при приеме сиг-

Таблица 1

Выигрыш в помехоустойчивости исследуемых приемников по сравнению с АД-приемником

Кодовая комбинация	Выигрыш в помехоустойчивости			
	КП	КПП	КПЗ	КППЗ
«3»	1,04–3,00	1,27–3,00	1,10–1,50	1,14–1,45
«КЖ»	1,01–6,00	0,90–6,00	0,96–2,00	0,90–2,00

нала КК «3», пунктирная — при приеме сигнала КК «КЖ». Их взаимное расположение указывает на то, что для всех приемников помехозащищенность сигнала КК «КЖ» выше, чем сигнала КК «3». Такой парадоксальный, на первый взгляд, результат объясняется тем, что в структуре сигнала КК «3», в отличие от сигнала КК «КЖ», имеются три расположенных с короткими интервалами импульса. При воздействии флуктуационной помехи резко увеличивается количество ошибок в приеме, обусловленных слиянием либо пропуском импульсов сигнала КК «3» при заполнении коротких межимпульсных интервалов откликами на флуктуационную помеху на выходе узкополосного фильтра. Для АД-приемника и КПЗ ширина зоны между верхней и нижней границами помехоустойчивости почти не зависит от  $h^2$ . Для КП, КПП и КППЗ с увеличением  $h^2$  ширина зоны между верхней и нижней границами помехоустойчивости увеличивается.

В табл. 1 приведены значения выигрыша в помехоустойчивости исследуемых приемников по сравнению с АД-приемником (отношение  $P_{\text{ош}}$  для исследуемого приемника к  $P_{\text{ош}}$  для АД-приемника). Диапазон значений выигрыша (минимальное и максимальное значения) определен для принятого диапазона значений  $h^2$ . По данным табл. 1 можно сделать вывод, что наиболее предпочтительным по критерию максимальной помехоустойчивости при приеме сигнала КК «3» является КПП, а при приеме сигнала КК «КЖ» — КП.

По полученным в результате экспериментов данным выполнен анализ безопасности функционирования исследуемых приемников при воздействии флуктуационных помех. Рассмотрены два вида отказов в работе приемника: защитный и опасный. К защитным относятся ошибки в работе приемника, вызывающие уменьшение количества импульсов в принятой кодовой комбинации и способные привести к появлению менее разрешающего сигнала на локомотивном светофоре системы АЛСН. Такими являются ошибки вида «слияние импульсов» и «пропущенный импульс» на выходе приемника. К опасным отказам относятся ошибки в работе приемника, вызыва-

ющие увеличение количества импульсов в принятой кодовой комбинации и способные привести к появлению более разрешающего сигнала на локомотивном светофоре системы АЛСН. Такими являются ошибки вида «ложный импульс» и «дробление импульса» на выходе приемника.

В качестве критерия безопасности приемников принята вероятность опасного отказа  $P_{\text{оп}}$ , определяемая по выражению

$$P_{\text{оп}} = P_{\text{др}} + P_{\text{лож}}$$

где  $P_{\text{др}}$  и  $P_{\text{лож}}$  — соответственно вероятность ошибки вида «дробление импульса» и вида «ложный импульс».

На рис. 3а, б представлены графики зависимостей  $P_{\text{оп}} = f(h^2)$  для исследуемых приемников при прогонах моделей с использованием сигналов КК «3» и «КЖ» соответственно.

По рис. 3а можно сделать следующие выводы:

- 1) наименее безопасным из исследованных является АД-приемник;
- 2) наиболее безопасным является КПП;
- 3) безопасность остальных приемников является промежуточной между безопасностью КПП и АД-приемника.

Таким образом, добавление в КП блока с зоной нечувствительности незначительно уменьшает его безопасность.

Представленные на рис. 3б графики позволяют сделать следующие выводы:

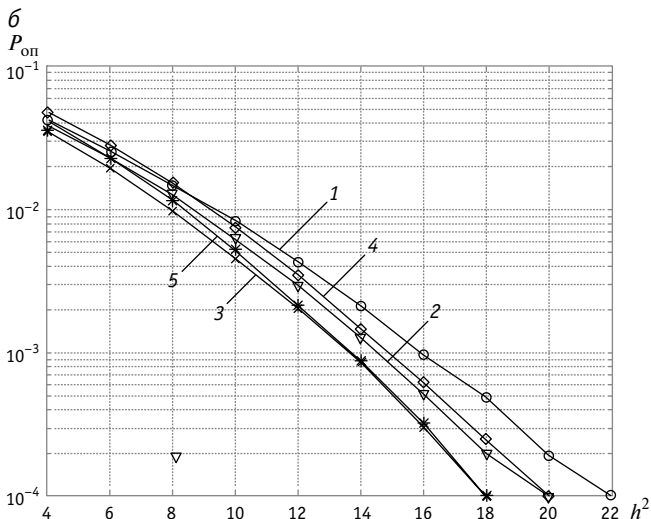
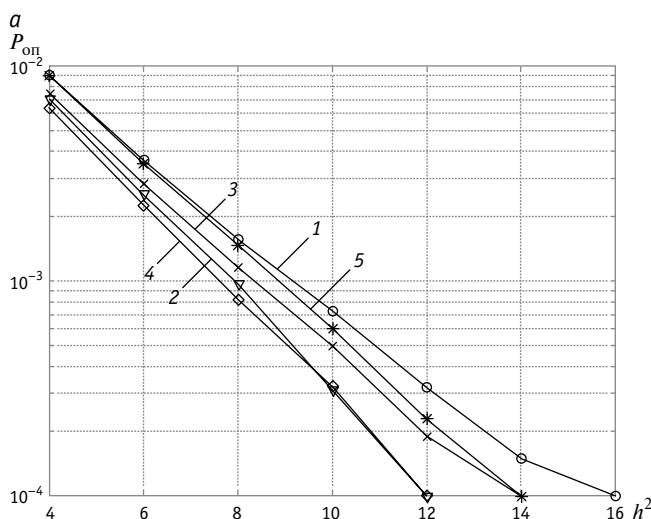


Рис. 3. Графики зависимостей вероятности опасного отказа исследуемых приемников от отношения «сигнал/помеха» при приеме сигнала КК «3» (а) и КК «КЖ» (б) для АД-приемника (1), КП (2), КПЗ (3), КПП (4) и КППЗ (5)

Таблица 2

Выигрыш в безопасности исследуемых приемников по сравнению с АД-приемником

Кодовая комбинация	Выигрыш в безопасности			
	КП	КПП	КПЗ	КППЗ
«З»	1,44–3,23	1,30–3,23	1,24–1,71	1,02–1,49
«КЖ»	1,05–2,48	0,87–1,97	1,17–4,91	0,98–4,91

1) наименее безопасным из исследованных при приеме сигнала КК «КЖ» является АД-приемник, наиболее безопасным — КПЗ;

2) с ростом значения  $h^2$  КППЗ по безопасности практически сравнивается с КПЗ;

3) добавление в КП комбинированного подавителя помех приводит к снижению безопасности приемника, а дополнительное добавление блока с зоной нечувствительности не только компенсирует это снижение, но и дает дополнительное повышение безопасности в сравнении с КП.

В табл. 2 приведены значения выигрыша в безопасности исследуемых приемников по сравнению с АД-приемником (отношение  $P_{оп}$  исследуемого приемника к  $P_{оп}$  АД-приемника).

**Сведения об авторах:**

**Алексей Сергеевич Хохрин**, аспирант кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» Самарского государственного университета путей сообщения

**Руслан Рифович Юсупов**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» Самарского государственного университета путей сообщения

Диапазон значений выигрыша (минимальное и максимальное значения) определен для принятого диапазона значений  $h^2$ . Согласно данным табл. 2, наиболее предпочтительным по критерию максимальной безопасности при приеме сигнала КК «З» является КП, при приеме сигнала КК «КЖ» — КПЗ, а КППЗ — незначительно хуже.

**ВЫВОДЫ**

Согласно результатам выполненных экспериментальных исследований, КП и варианты его реализации с добавлением БНП более устойчивы к воздействию флуктуационной помехи, чем АД-приемник. Безопасность КП и его реализаций с БНП значительно выше, чем у АД-приемника.

В целом анализ показал, что среди всех исследуемых приемников по критерию максимальной помехоустойчивости наиболее предпочтительным при приеме сигнала КК «З» является квадратурный приемник с комбинированным подавителем помех, а при приеме КК «КЖ» — квадратурный приемник с блоком с зоной нечувствительности.

Представленные результаты экспериментального исследования могут быть использованы при совершенствовании существующих или разработке новых приемников сигналов АЛСН для микропроцессорных локомотивных устройств безопасности.

**Authors information:**

**Alexey S. Khokhrin**, postgraduate student of Automation, Telemechanics and Communication in Railway Transport Department, Samara State Transport University

**Ruslan R. Yusupov**, PhD in Engineering, Associate Professor, Associate Professor of Automation, Telemechanics and Communication in Railway Transport Department, Samara State Transport University

**Литература**

- Чегуров А. Б. Повышение работоспособности устройств интервального регулирования движения поездов при воздействии помех : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва, 2011. 200 с.
- Приемное устройство автоматической локомотивной сигнализации / В. Б. Леушин, Р. Р. Юсупов, К. Э. Блачев : патент на полезную модель 165420 Российская Федерация. № 2015155567/11; заявл. 23.12.2015; опубл. 20.10.2016, Бюл. № 29.
- Юсупов Р. Р., Хохрин А. С., Леушин В. Б. Комбинированный приемник сигналов автоматической локомотивной сигнализации // Наука и образование транспорту. 2021. № 1. С. 325–329.
- Юсупов Р. Р., Хохрин А. С. Корреляционный приемник с квадратурными каналами для автоматической локомотивной сигнализации непрерывного типа АЛСН // Транспорт Урала. 2022. № 3 (74). С. 49–54. DOI: 10.20291/1815-9400-2022-3-49-54.
- Приемник автоматической локомотивной сигнализации / Р. Р. Юсупов, А. С. Хохрин : патент на полезную модель 218341 Российская Федерация. № 2023110361; заявл. 22.04.2023; опубл. 23.05.2023.

**References**

- Chegurov A. B. Improving the performance of train interval control devices when exposed to interference [Povyshenie rabotosposobnosti ustroystv interval'nogo regulirovaniya dvizheniya poezdov pri vozdeystvii pomekh] : PhD in Engineering Thesis. Moscow, 2011. 200 p.
- Leushin V. B., Yusupov R. R., Blachev K. E. Receiving device for automatic locomotive signaling [Priemnoe ustroystvo avtomaticheskoy lokomotivnoy signalizatsii] : Patent for utility model 165420 Russian Federation. No. 2015155567/11; filed 23.12.2015; publ. 20.10.2016, Bulletin No. 29.
- Yusupov R. R., Khokhrin A. S., Leushin V. B. Combined signals receiver for automatic locomotive signaling [Kombinirovannyi priemnik signalov avtomaticheskoy lokomotivnoy signalizatsii]. *Science and Education for Transport*. 2021. No. 1. Pp. 325–329.
- Yusupov R. R., Khokhrin A. S. Correlation receiver with quadrature channels for continuously working automatic cab signalling [Korrel'yatsionnyy priemnik s kvadraturnymi kanalami dlya avtomaticheskoy lokomotivnoy signalizatsii nepreryvnogo tipa ALSN]. *Transport of the Urals*. 2022. No. 3 (74). Pp. 49–54. DOI: 10.20291/1815-9400-2022-3-49-54.
- Yusupov R. R., Khokhrin A. S. Receiver for automatic cab signalling [Priemnik avtomaticheskoy lokomotivnoy signalizatsii] : Patent for utility model 218341 Russian Federation. No. 2023110361; filed 22.04.2023; publ. 23.05.2023.

- |  |  |
|--|--|
| <p>6. Имитационная модель квадратурного приемника сигналов автоматической локомотивной сигнализации непрерывного типа АЛСН / Р. Р. Юсупов, А. С. Хохрин, В. Б. Леушин : программа для ЭВМ 2022685678 Российская Федерация. № 2022684474; заявл. 13.12.2022; опублик. 27.12.2022.</p> <p>7. Юсупов Р. Р. Цифровое устройство обработки сигналов автоматической локомотивной сигнализации повышенной помехозащищенности : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Самара, 2003. 162 с.</p> <p>8. Теплов Н. Л. Помехоустойчивость систем передачи дискретной информации. Москва : Связь, 1964. 359 с.</p> | <p>6. Yusupov R. R., Khokhrin A. S., Leushin V. B. Simulation model of quadrature receiver for continuously working automatic cab signalling [Imitatsionnaya model' kvadraturnogo priemnika signalov avtomaticheskoy lokomotivnoy signalizatsii nepreryvnogo tipa ALSN] : Computer program 2022685678 Russian Federation. No. 2022684474; filed 13.12.2022; publ. 27.12.2022.</p> <p>7. Yusupov R. R. Digital device for processing of signals of automatic cab signalling with increased noise immunity [Tsifrovoe ustroystvo obrabotki signalov avtomaticheskoy lokomotivnoy signalizatsii povyshennoy pomekhoshishhenosti] : PhD in Engineering Thesis. Samara, 2003. 162 p.</p> <p>8. Teplov N. L. Interference sustainability of discrete information transmission systems [Pomekhoustoychivost' sistem peredachi diskretnoy informatsii]. Moscow : Communication, 1964. 359 p.</p> |
|--|--|

*Объем статьи 0,65 авторских листа*

Научная статья  
УДК 656.021.8

## Организация поездной радиосвязи и передачи данных в технологии «виртуальная сцепка» в одном цифровом радиоканале

Антон Николаевич Попов<sup>1</sup>, Дмитрий Сергеевич Романенко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Уральский государственный университет путей сообщения, Екатеринбург, Россия

## Organization of train radio communication and data transmission in the virtual coupling technology in one digital radio channel

Anton N. Popov<sup>1</sup>, Dmitriy S. Romanenko<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ural State University of Railway Transport, Ekaterinburg, Russia

### Аннотация

Несмотря на то что поездная радиосвязь и технология «виртуальная сцепка» должны обеспечивать безопасность движения, пока развитие этих систем на российских железных дорогах происходит в не связанных между собой направлениях. Сегодня поездная радиосвязь является аналоговой, организована в гектометровом диапазоне частот (2,13 и 2,15 МГц), ее качество и надежность необходимо улучшать, однако переход на цифровые стандарты идет медленными темпами, так как требует значительных капитальных вложений в строительство инфраструктуры. Что касается технологии «виртуальная сцепка», то в настоящее время ее испытания ведутся с использованием цифровых каналов радиосвязи.

В статье рассмотрены мероприятия, которые позволят на уже существующей инфраструктуре создать единую сеть передачи данных по технологии «виртуальная сцепка» и по поездной радиосвязи в одном цифровом радиоканале, что обеспечит снижение капитальных вложений в организацию системы связи, а также повысит ее надежность, качество и пропускную способность.

**Ключевые слова:** поездная радиосвязь, система интервального регулирования движения поездов, виртуальная сцепка, цифровые стандарты радиосвязи

### Abstract

Despite the fact that train radio communication and the virtual coupling technology should ensure traffic safety, so far the development of these systems on Russian railways is taking place in unrelated directions. Currently, train radio communication is analog, organized in the hectometer frequency range (2.13 and 2.15 MHz), its quality and reliability need to be improved. The transition to digital standards is slow, as it requires significant capital investments in infrastructure construction. Considering the virtual coupling technology, it is currently being tested using digital radio communication channels.

The article discusses measures that will allow creating the single data transmission network using virtual coupling technology and train radio communication in one digital radio channel on an existing infrastructure. It will ensure a reduction in capital investments in the organization of the communication system, as well as increase its reliability, quality and throughput.

**Keywords:** train radio communication, interval train control system, virtual coupling, digital radio communication standards

DOI: 10.20291/1815-9400-2024-1-79-82

### СУЩЕСТВУЮЩАЯ СЕТЬ ПОЕЗДНОЙ РАДИОСВЯЗИ НА ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГАХ РОССИИ

**П**оездная радиосвязь (ПРС) предназначена для переговоров дежурного по железнодорожной станции и участкового поездного диспетчера с машинистами локомотивов, а также для переговоров машинистов между собой и с другими работниками железных дорог [1].

Чаще всего аналоговая ПРС организована в гектометровом диапазоне (КВ) на частотах 2,13 МГц (I канал) и 2,15 МГц (II канал). Из-за большого уровня радиопомех для обеспечения хорошего качества радиосвязи необходим высокий уровень радиосигналов на входе радиоприемников.

В диапазоне КВ для снижения уровня помех и увеличения качества радиосигнала используются подвешиваемые на опорах контактной сети направляющие линии (волноводы) либо провода линий энергоснабжения, идущие вдоль железной дороги.

В диапазоне метровых волн (УКВ) аналоговая ПРС работает на частотах 151,725–156,000 МГц и позволяет машинисту вести переговоры с работниками железнодорожного транспорта, находящимися на перегоне: начальником поезда, маневровым диспетчером и пр. Радиосвязь в диапазоне УКВ обладает лучшей помехозащищенностью по сравнению с диапазоном КВ, однако радиус ее действия сильно ограничен, в результате радиодоступ на всех участках длинных перегонов между станциями может не обеспечиваться. В настоящее время наибольшая протяженность линий железных дорог оборудована системами ПРС в диапазоне КВ с направляющим проводом.

Недостатками аналоговой системы ПРС являются отсутствие групповых и индивидуальных вызовов, неудовлетворительное качество радиосвязи из-за высокого уровня помех в диапазоне КВ и ограниченные возможности по внедрению систем телесигнализации, телеуправления и передачи данных [2].

## ПЕРЕХОД ПОЕЗДНОЙ РАДИОСВЯЗИ НА СОВРЕМЕННЫЕ ЦИФРОВЫЕ СТАНДАРТЫ

В настоящее время в ОАО «РЖД» ведутся активные работы по переводу аналоговой поездной радиосвязи на современные цифровые стандарты при сохранении возможности использовать ее существующие каналы. В частности, для улучшения надежности и качества радиосвязи, а также обеспечения высоких скоростей передачи данных внедряются цифровые стандарты TETRA, CDMA, DMR и GSM-R. Рассмотрим их.

Стандарт TETRA может быть использован для совместимости технологических систем РЖД, однако к его недостаткам следует отнести сложность и дороговизну в построении, низкие скорости передачи данных, невозможность обеспечить требуемую надежность радиосвязи при высоких скоростях движения поездов. Система GSM-R применяется на участках железных дорог для обеспечения радиосвязи при скоростях движения поездов до 500 км/ч (в том числе на участке Туапсе — Сочи — Альпика — Веселое протяженностью 155 км). Однако за рубежом этот стандарт не стал популярным вопреки желанию разработчиков, а эксплуатацию уже построенных сетей планируется завершить к 2030 г. Как отмечено в работе [3], ни одна из систем GSM-R и TETRA не может решить всех поставленных перед ними задач, поэтому российские ученые предлагают использовать эти стандарты там, где они имеют максимальные преимущества и где их недостатки не влияют на безопасность движения поездов. Что касается системы CDMA, она не имеет перспектив развития, поскольку не поддерживает работу многих технологических приложений. Стандарт DMR по сравнению с TETRA, CDMA и GSM-R отличается меньшими затратами на инфраструктуру, лучшим соотношением цена/качество, однако, как и другие цифровые стандарты, на железных дорогах России он массово не применяется [4].

Внедрение цифровых стандартов радиосвязи требует значительных капитальных вложений в строительство инфраструктуры, поэтому они не получили широкого распространения на сети железных дорог, кроме того, их надежность и безопасность изучены недостаточно [5]. На основании изложенного можно сделать вывод, что на наибольшей протяженности сети железных дорог связь обеспечивается аналоговой ПРС в гектометровом диапазоне (2,13 и 2,15 МГц), качество и надежность которой не удовлетворяют растущим потребностям.

## ОПЫТ ВНЕДРЕНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИИ СИСТЕМ ИНТЕРВАЛЬНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ С ПЕРЕДАЧЕЙ ОТВЕТСТВЕННОЙ ИНФОРМАЦИИ ПО РАДИОКАНАЛУ

В настоящее время вариант построения системы интервального регулирования движения поездов с передачей ответственной информации по радиоканалу с использованием зарубежного оборудования является для нашей страны неприемлемым, что обусловлено малой распространенностью радиосвязи стандартов GSM-R и TETRA на сети отечественных железных дорог и нацеленностью России на курс импортозамещения оборудования, используемого в критически важных отраслях, в период санкционного давления.

В сложившихся условиях на существующей инфраструктуре целесообразно развивать систему интервального регулирования движения поездов «виртуальная сцепка». Технология «виртуальная сцепка» (ВСЦ) предполагает разделение поездов путевым интервалом, необходимым для проезда со скоростью, позволяющей обеспечить безопасность движения. Итогами внедрения указанной технологии будет увеличение пропускной способности железных дорог и сокращение межпоездного интервала [3].

В испытаниях технологии «виртуальная сцепка», проведенных в 2020 г., были использованы система ИСАВП — РТ — М и радиоканал стандарта DMR-RUS. Цель испытаний заключалась в установлении количества успешно доставленной информации при различных расстояниях между локомотивами. Для этого были осуществлены поездки 3 локомотивов, и по результатам сделан вывод о возможности работы системы передачи данных в ВСЦ для 2–4 локомотивов. Однако на границах зон действия базовых станций установлено большое количество потерь пакетов данных даже при достаточном уровне принятого сигнала от базовой станции.

Ограничивающими факторами для внедрения ВСЦ являются недостаточное число перегонов, оборудованных радиосвязью стандарта DMR, и небольшая дальность радиосвязи этого стандарта. Принимая во внимание малую оснащенность сети железных дорог радиосвязью стандарта DMR и необходимость повсеместного внедрения ВСЦ, дальнейшее развитие этой технологии целесообразно проводить с использованием существующих сетей передачи данных, действующих на разрешенном диапазоне радиочастот, и радиомодемов российского производства.

В 2023 г. прошли испытания технологии «виртуальная сцепка», в ходе которых проверялось наличие связи между машинистами ведомого и ведущего поездов, а также измерялся интервал попутного следования по данному цифровому радиоканалу на частоте гектометрового диапазона 2,15 МГц, организованного с помощью цифровых радиомодемов РМЦ/2.150. Такое решение позволяет использовать уже существующие антенно-фидерные устройства радиостанций железнодорожной радиосвязи [6]. Результаты испытаний показали устойчивый обмен сообщениями при среднем значении интервала между локомотивами 3500–4500 м и наличие протяженных участков пути, где связь между локомотивами отсутствует.

Для того чтобы обеспечить устойчивое функционирование канала радиосвязи, построенного на радиомодемах РМЦ/2.150, и тиражировать технологию «виртуальная сцепка», необходимо провести ревизию состояния системы волноводов на тех участках, где выявлено продолжительное отсутствие связи между локомотивами, следующими в интервалах радиодоступа [7].

## ДАЛЬНЕЙШЕЕ РАЗВИТИЕ ПОЕЗДНОЙ РАДИОСВЯЗИ И ТЕХНОЛОГИИ «ВИРТУАЛЬНАЯ СЦЕПКА» НА СУЩЕСТВУЮЩЕЙ ИНФРАСТРУКТУРЕ

Сегодня в России система поездной радиосвязи и технология «виртуальная сцепка» развиваются независимо друг от друга, причем в построении каждой из них требуются значительные капитальные вложения. Однако качество и надеж-



ность связи при передаче голоса по ПРС и при передаче данных в технологии «виртуальная сцепка» нуждаются в улучшении. Поэтому целесообразно рассмотреть возможность объединения и развития на существующей инфраструктуре такой системы радиосвязи, которая будет передавать по одному цифровому радиоканалу и голос в ПРС, и данные в технологии ВСЦ. Подобное решение позволит снизить капитальные затраты и повысить надежность и пропускную способность системы радиосвязи.

### **БЕСПРОВОДНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ**

Рассмотрим возможности использования беспроводных технологий (таких как Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee, группа радиочастотных диапазонов 434/868 МГц и LoRa) для организации передачи голоса в ПРС и данных в ВСЦ по одному цифровому радиоканалу.

Технология Wi-Fi (2412–2484 МГц) — это стандарт беспроводного подключения для коммуникации разных устройств, использующий радиоволны (так же, как Bluetooth и сотовые сети) на расстоянии до 100 м и служащий недорогим и быстрым способом передачи данных на короткие расстояния [8]. Однако Wi-Fi-сети достаточно сильно подвержены риску несанкционированного доступа, поэтому их защита требует особого внимания.

Стандарт Bluetooth (2400–2483 МГц) представляет собой технологию беспроводной связи на коротком расстоянии (около 100 м), обеспечивающую обмен данными между цифровыми устройствами, такими как компьютер или цифровая камера.

Иногда возникает необходимость в наращивании дальности радиосвязи при сохранении ее энергопотребления на низком уровне [9]. В этих случаях наиболее эффективным будет стандарт ZigBee (2400–2483 МГц), который обеспечивает коммутацию устройств на расстоянии до 200 м.

На практике бывает и так, что из всех существующих технологий беспроводной связи (Wi-Fi, Bluetooth или ZigBee) ни одна не отвечает критериям пользователя. Для решения этой проблемы используют группу радиочастотных диапазонов 434/868 МГц, в которых отсутствуют стандарты беспроводной радиосвязи, что позволяет любому разработчику наладить взаимодействие между устройствами радиосети при помощи создания своего стека протоколов. Дальность связи между устройствами группы радиочастотных диапазонов 434/868 составляет до 1000 м.

LoRa (Long Range) — это технология передачи данных на большие расстояния с минимальными затратами энергии [10]. Энергоэффективность устройств с модулем передачи данных LoRa позволяет создавать конечные устройства, работающие автономно 3, 5 и 10 лет. Технология LoRa не используется для

передачи голосового трафика, а только для передачи данных в системах безопасности и от беспроводных датчиков в приложениях промышленной автоматизации. LoRa обеспечивает работоспособность линии связи на расстоянии до 5 км в условиях плотной городской застройки и до 15 км в сельской местности. Технология предназначена для устройств интернета вещей, которые обмениваются между собой малым количеством информации (небольшими пакетами данных). Недостатками LoRa являются низкие скорости передачи данных и длительное/высокое время задержки.

Таким образом, на основании краткого анализа беспроводных технологий передачи данных можно сделать вывод, что они не подходят для реализации единой радиосети на железнодорожном транспорте по следующим причинам: из-за неадаптированности к специфике железных дорог, малой дальности действия по сравнению с длинами перегонов, больших капитальных затрат на внедрение. Беспроводные технологии могут применяться только точно на некоторых непротяженных участках железных дорог.

### **РЕАЛИЗАЦИЯ ЕДИНОЙ СЕТИ РАДИОСВЯЗИ ДЛЯ ПРС И ТЕХНОЛОГИИ «ВИРТУАЛЬНАЯ СЦЕПКА» НА СУЩЕСТВУЮЩЕЙ ИНФРАСТРУКТУРЕ**

Для повышения качества, надежности и пропускной способности предлагается организовать для ПРС и виртуальной сцепки единую сеть радиосвязи. В ней речь и данные будут передаваться в одном цифровом радиоканале, работающем в гектометровом диапазоне. Связь планируется обеспечивать с использованием существующих направляющих линий — волноводов и российских цифровых радиомодемов РМЦ/2.150.

Для решения этой задачи необходимо:

1) разработать математическую модель сети радиосвязи, функционирующей на существующей инфраструктуре. В модели должны быть определены такие параметры, как метод модуляции сигнала, количество и пропускная способность радиоканалов, защитный интервал между радиоканалами, скорость и задержки передачи информации, способы защиты передаваемых данных. Также необходимо определить расстояние между локомотивами, при котором будет обеспечена устойчивая передача переговоров и информации о путевых координатах и скорости движения. В случае неустойчивой работы радиосвязи (ее прерывание и (или) отсутствие) на перегонах следует устанавливать дополнительные базовые станции, а при движении в виртуальной сцепке трех и более локомотивов должна быть предусмотрена передача данных на все ведомые поезда одновременно;

2) выполнить имитационное моделирование полученной сети радиосвязи.

#### Сведения об авторах:

**Антон Николаевич Попов**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» Уральского государственного университета путей сообщения

**Дмитрий Сергеевич Романенко**, аспирант кафедры «Управление эксплуатационной работой» Уральского государственного университета путей сообщения

#### Authors information:

**Anton N. Popov**, PhD in Engineering, Associate Professor of Railway Automation, Telemechanics and Communication Department, Ural State University of Railway Transport

**Dmitriy S. Romanenko**, postgraduate student of Operations Management Department, Ural State University of Railway Transport

### Литература

1. Правила технической эксплуатации поездной радиосвязи ОАО «РЖД». Москва : ЦЕНТРМАГ, 2013. 48 с.
2. Воронов И., Мякочин Ю., Песоченко В. Цифровая связь для нужд РЖД // Компоненты и технологии. 2016. № 11 (184). С. 72–74. ISSN 2079-6811.
3. Маргарян С. Радиосеть управления и сбора данных для железнодорожных приложений. Часть 1 // Беспроводные технологии. 2020. № 1 (58). С. 48–56. ISSN 2079-9233.
4. Петриченко М. Н., Пономарев К. П. Анализ преимуществ сетей оперативной подвижной радиосвязи, построенных на оборудовании стандарта DMR, перед сетями, построенными на аналоговом оборудовании УКВ // Инновационная наука. 2023. № 3-2. С. 41–46. ISSN 2410-6070.
5. Свичинский Е. GSM-R — единый стандарт железнодорожной связи // Беспроводные технологии. 2013. № 3 (32). С. 32–38. ISSN 2079-9233.
6. Маргарян С. Радиосеть управления и сбора данных для железнодорожных приложений. Часть 3 // Беспроводные технологии. 2020. № 3 (60). С. 45–49. ISSN 2079-9233.
7. Развитие бортовых комплексов управления и обеспечения безопасности движения поездов / Е. Н. Розенберг, Е. Е. Шухина, В. И. Астрахан [и др.] // Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте. Компьютерное и математическое моделирование (ИСУЖТ-2019). Москва : АО «НИИАС», 2019. С. 100–104.
8. Вязмин В. И., Чернышова А. В. Беспроводная технология Wi-Fi. Уязвимости и методы защиты // Информатика и кибернетика. 2018. № 2 (12). С. 16–19.
9. Аникин А. Обзор современных технологий беспроводной передачи данных в частотных диапазонах ISM (Bluetooth, ZigBee, Wi-Fi) и 434/868 МГц // Беспроводные технологии. 2011. № 4 (25). С. 6–12. ISSN 2079-9233.
10. Верхулевский К. Технология LoRa компании Semtech: новый импульс развития «Интернета вещей» // Беспроводные технологии. 2015. № 3 (40). С. 42–48. ISSN 2079-9233.

### References

1. Rules of technical operation of train radio communication of JSC «Russian Railways» [Pravila tekhnicheskoy ekspluatatsii poezdnoy radiosvyazi ОАО «RZhD»]. Moscow, 2013. 48 p.
2. Voronov I., Myakochin Yu., Pesochenko V. Digital communication for the needs of JSC «Russian Railways» [Tsifrovaya svyaz' dlya nuzhd RZhD]. *Components & Technologies*. 2016. No. 11 (184). Pp. 72–74. ISSN 2079-6811.
3. Margaryan S. Radio control and data collection network for railway applications. Part 1 [Radioset' upravleniya i sbora dannykh dlya zheleznodorozhnykh prilozheniy. Chast' 1]. *Wireless Technologies*. 2020. No. 1 (58). Pp. 48–56. ISSN 2079-9233.
4. Petrichenko M. N., Ponomarev K. P. Analysis of the advantages of operational mobile radio communication networks built on DMR standard equipment over networks built on analog VHF equipment [Analiz preimushhestv setey operativnoy podvizhnoy radiosvyazi, postroennykh na oborudovanii standarta DMR, pered setyami, postroennymi na analogovom oborudovanii UKV]. *Innovation Science*. 2023. No. 3–2. Pp. 41–46. ISSN 2410-6070.
5. Svichinskiy E. GSM-R is a unified standard for railway communication [GSM-R — edinyy standart zheleznodorozhnoy svyazi]. *Wireless Technologies*. 2013. No. 3 (32). Pp. 32–38. ISSN 2079-9233.
6. Margaryan S. Radio control and data collection network for railway applications. Part 3 [Radioset' upravleniya i sbora dannykh dlya zheleznodorozhnykh prilozheniy. Chast' 3]. *Wireless Technologies*. 2020. No. 3 (60). Pp. 45–49. ISSN 2079-9233.
7. Rozenberg E. N., Shukhina E. E., Astrakhan V. I. [et al.]. Development of on-board control systems and train safety [Razvitie bortovykh kompleksov upravleniya i obespecheniya bezopasnosti dvizheniya poezdov]. *Intelligent control systems for railway transport. Computer and Mathematical Modeling (ISMST-2019)* : proceedings of the 8th scientific and technical conference. Moscow, 2019. Pp. 100–104.
8. Vyazmin V. I., Chernyshova A. V. Wireless technology Wi-Fi. Vulnerabilities and methods of protection [Besprovodnaya tekhnologiya Wi-Fi. Uязvimosti i metody zashhity]. *Informatics & Cybernetics*. 2018. No. 2 (12). Pp. 16–19.
9. Anikin A. Overview of modern wireless data transmission technologies in frequency bands ISM (Bluetooth, ZigBee, Wi-Fi) and 434/868 MHz [Obzor sovremennykh tekhnologiy besprovodnoy peredachi dannykh v chastotnykh diapazonakh ISM (Bluetooth, ZigBee, Wi-Fi) i 434/868 MGts]. *Wireless Technologies*. 2011. No. 4 (25). Pp. 6–12. ISSN 2079-9233.
10. Verkhulevskiy K. Semtech's LoRa technology: a new impetus for the development of the Internet of Things [Tekhnologiya LoRa kompanii Semtech: novyy impul's razvitiya «Interneta veshhey»]. *Wireless Technologies*. 2015. No. 3 (40). Pp. 42–48. ISSN 2079-9233.

Объем статьи 0,5 авторских листа

Научная статья  
УДК 656.07

## Критерии эффективности при управлении транспортным предприятием

Елена Николаевна Тимухина<sup>1</sup>, Кирилл Максимович Тимухин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Уральский государственный университет путей сообщения, Екатеринбург, Россия

## Criteria of efficiency in the management of a transport enterprise

Elena N. Timukhina<sup>1</sup>, Kirill M. Timukhin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ural State University of Railway Transport, Ekaterinburg, Russia

### Аннотация

В условиях геополитической напряженности российский бизнес находится с одной стороны под давлением санкционных ограничений, а с другой — под давлением внутренней конкуренции, обусловленной все возрастающим числом предприятий, осуществляющих свою деятельность в логистической отрасли. Сегодня стратегия транспортных компаний нацелена на преимущественное накопление собственных резервов для обеспечения внутренней устойчивости и запаса прочности. При этом особое значение приобретают контроль за издержками и повышение производительности труда. В статье рассматривается матрица KPI с использованием децентрализованных показателей, позволяющих выявить отстающие подразделения компании и оптимизировать их работу в деятельности всего предприятия как единой системы. При этом высший руководящий орган получает оперативную информацию о работе всех подразделений в режиме реального времени, не теряя иерархической монополии в принятии управленческих решений.

**Ключевые слова:** критерии эффективности, транспорт, логистика, управление предприятием, EBITDA, матрица KPI

### Abstract

In the context of geopolitical tensions, Russian business is under pressure from sanctions restrictions on the one hand, and on the other — under pressure from internal competition caused by an increasing number of enterprises operating in the logistics industry. Today, the strategy of transport companies is mainly aimed at accumulating their own reserves in order to ensure internal stability and margin of safety. At the same time, cost control and increased labor productivity are of particular importance.

The article examines the KPI matrix using decentralized indicators that identify lagging divisions of the company and optimize their work in the activities of the entire enterprise as a single system. At the same time, the supreme governing body receives operational information about the work of all departments in real time, without losing its hierarchical monopoly in making managerial decisions.

**Keywords:** performance criteria, transport, logistics, enterprise management, EBITDA, KPI matrix

DOI: 10.20291/1815-9400-2024-1-83-89

### ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях российский бизнес находится под санкционным давлением. Начиная со второго квартала 2022 г. наблюдалось резкое сокращение импорта товаров, обусловленное введением в отношении нашей страны санкционных ограничений, нарушениями транспортно-логистических цепочек и общим спадом экономической активности [1]. Согласно Прогнозу социально-экономического развития Российской Федерации на 2023 г. и плановый период 2024 и 2025 гг. был разработан План первоочередных действий по обеспечению развития российской экономики в условиях внешнего санкционного давления, принятый Правительством Российской Федерации 15 марта 2022 г. и впоследствии регулярно дополняемый новыми мерами в зависимости от изменения экономической ситуации.

Основными целями плана обозначены: обеспечение максимальной свободы хозяйственной деятельности внутри страны; поддержание бесперебойной работы предприятий и выстраивание новых логистических и производственных цепочек; обеспечение предприятий оборотными средствами; сохранение занятости населения. План включает также меры, направленные на снижение издержек производителей и обеспечение максимального предложения отечественной и импортной продукции на внутреннем рынке.

Таким образом, эффективное управление транспортно-логистическим предприятием (вне зависимости от масштабов бизнеса) — весьма актуальная задача, поскольку оптимизация работы не только сокращает издержки, но и способствует повышению культуры труда, а также вовлеченности сотрудников в деятельность компании [2].

### КРИТЕРИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ

Одна из важнейших задач при управлении любым предприятием — постоянный анализ ключевых факторов, оказывающих влияние на финансовые результаты [3]. При этом независимо от вида оказываемых услуг ключевые показатели эффективности (КПЭ), или Key Performance Indicator (KPI), и формы ведения бизнеса за редким исключением не изменяются. Классическими показателями, указывающими на эффективность любого бизнеса, являются маржинальность, рентабельность, оборот товаров и услуг [4].

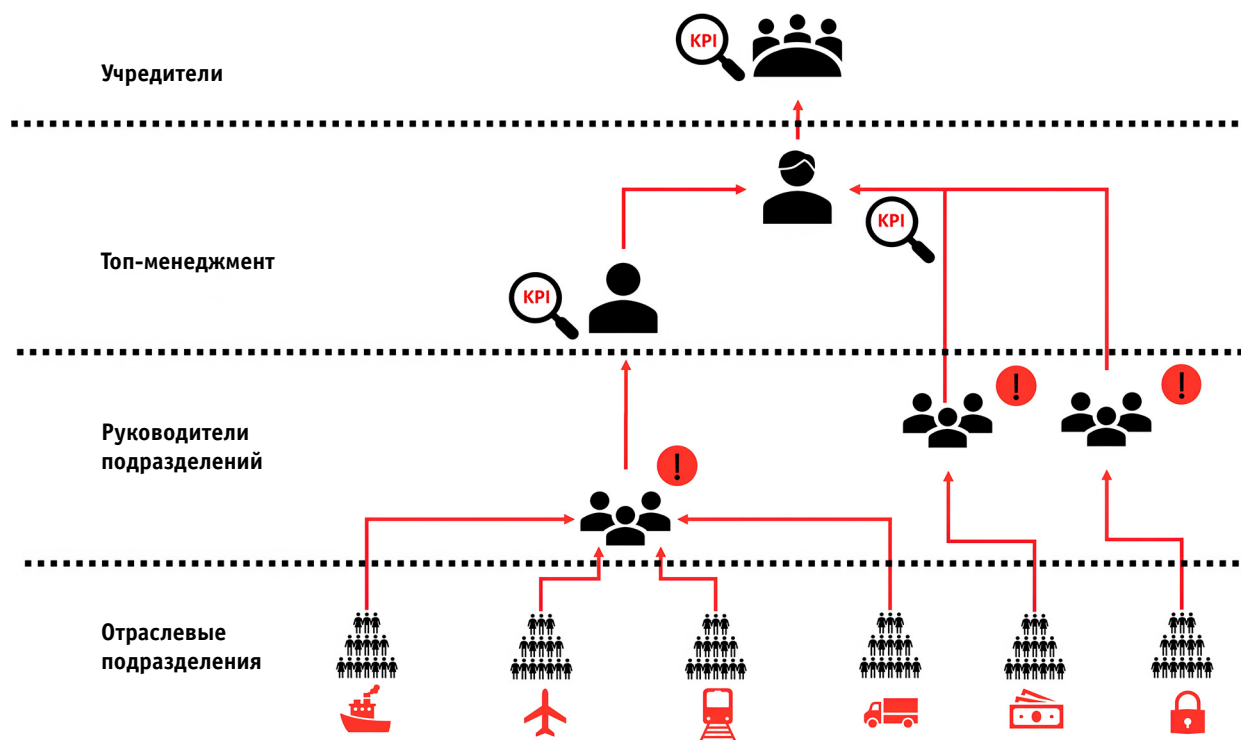


Рис. 1. Уязвимости на управленческом уровне предприятия

От своевременной и грамотной аналитики зависят оперативные и стратегические решения, позволяющие не только поддерживать устойчивую деятельность компании, но и накапливать резервы для ее дальнейшего развития. В понимании рядового сотрудника успешность бизнеса напрямую зависит от величины денежных средств на счетах предприятия, что в отрыве, скажем, от коэффициента финансовой зависимости не является показателем успешного бизнеса [5]. Также и наличие кассовых разрывов или высокий коэффициент долговой нагрузки ( $КДН \leq 3$ ) не свидетельствуют о явных признаках несостоятельности/банкротства.

Отсюда можно сделать вывод, что результативность деятельности предприятия характеризуется комплексным анализом показателей, оцениваемых в динамике с вероятностным анализом будущих прибыли/убытков.

Как известно, хотя определение показателей эффективности довольно распространенная практика, но те или иные методы контроля выбирает руководство, а также топ-менеджмент предприятия, что приводит к потенциальным уязвимостям на уровне руководителей подразделений (рис. 1).

Уязвимости в структуре оценки деятельности транспортного предприятия могут возникать под влиянием двух видов негативных факторов: первый — беспечность (непонимание важности критериев эффективности), второй — стремление получить материальную выгоду от эффективных и эффективных показателей работы (рис. 2).

Первую группу факторов (беспечность) можно исключить за счет повышения квалификации работников и мотивационных лекций о вкладе каждого сотрудника в деятельность всей

компании. Вторая группа факторов (стремление), являясь, по сути, умышленным подлогом, требует повышенного контроля и ужесточения санкций за выявленные нарушения. При этом важно отметить, что сами целевые показатели не могут быть основной целью работы предприятия.

Показатели эффективности — это диагностический маркер состояния компании [6]. Раннее выявление и диагностика слабых мест в управлении и технологических процессах предупреждают кризисные явления в компании и последующую ликвидацию/банкротство.

### ПОКАЗАТЕЛИ ДЕЛОВОЙ АКТИВНОСТИ

Согласно п. 1 ст. 2 Гражданского кодекса Российской Федерации, предпринимательской является самостоятельная, осуществляемая на свой риск деятельность, направленная на систематическое получение прибыли от пользования имуществом, продажи товаров, выполнения работ или оказания услуг. В данном ключе можно утверждать, что каждый работник является в определенной мере предпринимателем. А его предпринимательская деятельность — это отчуждение собственного рабочего времени. Таким образом, личные показатели эффективности напрямую коррелируют с показателями эффективности предприятия. Несмотря на это, многие сотрудники не информированы о стратегических планах предприятия и представляют их в виде неконкретизированных образов: «стать лучшим на рынке перевозок», «работать качественнее», «перевезти больше тоннаж» и т.п. (Согласно неофициальной статистике, лишь 16 % сотрудников могут назвать стратегические цели предприятия, миссию компании, цели организации

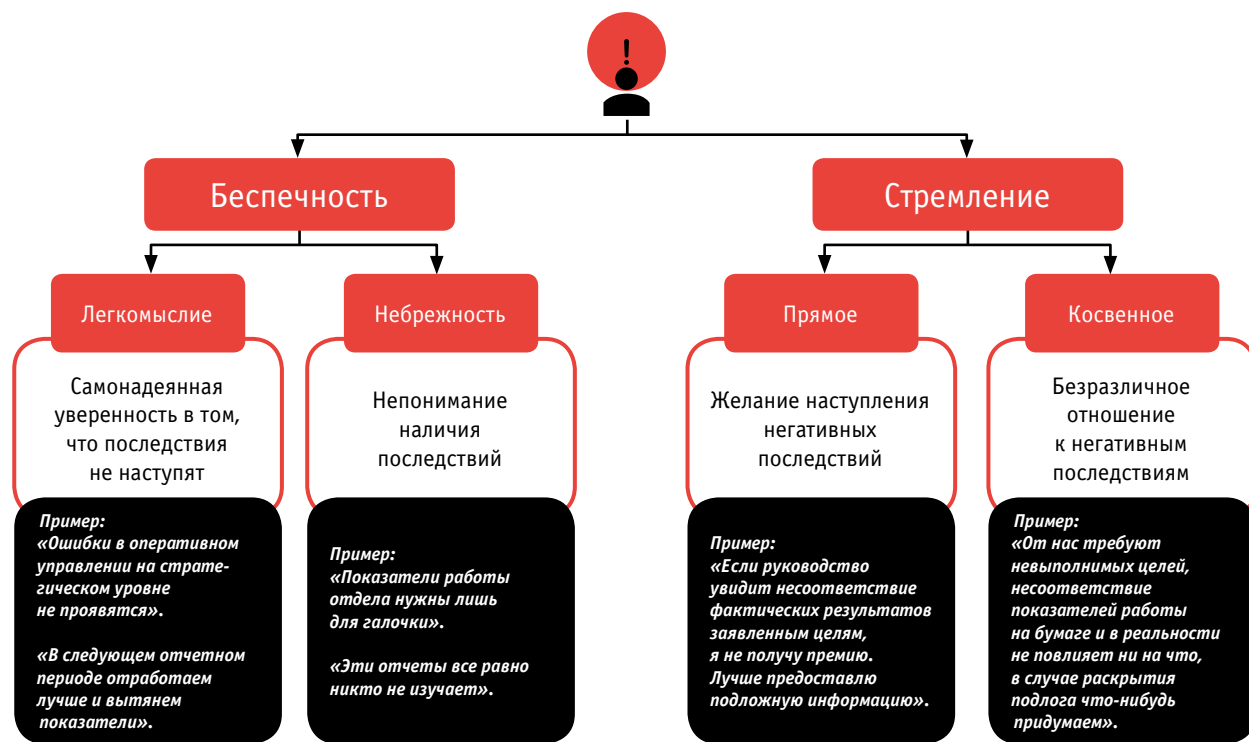


Рис. 2. Негативные факторы в оценивании КРІ

на 5 лет вперед.) При непонимании цели, при отсутствии корреляции «моя работа — решенная задача для компании» производительность труда, равно как и заинтересованность в его результате, снижается, что негативно отражается и на компании, и на самом работнике.

На основании изложенного можно сделать вывод о важности целеполагания в деятельности каждого сотрудника и о необходимости визуализировать зависимость эффективной работы предприятия от действий каждого сотрудника.

Для определения эффективности работы можно применять различные индикаторы на основе оценки задач, выполняемых каждым сотрудником, а также руководителем [6]. При этом следует понимать, что ключевые показатели эффективности являются индикаторами, а влияние на конечную цель могут оказывать различные факторы. Для каждого отдела, сотрудника ключевые показатели могут отличаться, а степень их влияния является динамически изменяемым фактором [7]. Обычно в качестве ключевых факторов используются следующие показатели:

- 1) EBITDA — прибыль до вычета (Earnings before) процентов (Interest), налогов (Taxes) и амортизации (Depreciation and Amortization);
- 2) ARR (коэффициент рентабельности инвестиций);
- 3) NPM (норма чистой прибыли);
- 4) NPS (индекс лояльности);
- 5) SCR (коэффициент конкурентоспособности оплаты труда).

При этом следует отметить, что ключевые показатели являются инструментом диагностики, а не целью работы предприятия.

Для примера на рис. 3 представлена матрица КРІ типовых отделов транспортно-логистической компании. Цветная маркировка иллюстрирует, какое подразделение заинтересовано в использовании того или иного показателя эффективности. Как видно из рис. 3, на ключевые показатели работы с клиентами влияет деятельность различных отделов (транспортного, отдела снабжения, отдела продаж), что позволяет выполнять перекрестный анализ одного и того же показателя по разным отделам для верификации входящей информации. В том числе открытость такой матрицы дает возможность сотрудникам всех уровней отслеживать текущее состояние своих подразделений в разрезе деятельности всего транспортного предприятия.

Работа с КРІ-матрицей подразумевает сбалансированный цикл анализа ключевых показателей эффективности с делегированием каждого показателя одному или нескольким отделам. Для примера рассмотрим такой популярный показатель, как EBITDA (рис. 4).

На рис. 4 также приведены показатели EBITDA компании — представителя малого бизнеса. Из анализа показателей прибыли до вычета процентов, налогов, износа и амортизационных отчислений можно сделать вывод, что этот показатель отражает работу нескольких отделов (маркетинга, снабжения, инвестиционного и др.).

Выручка от реализации продукта/услуги ( $B_p$ ) складывается из показателей, представленных на рис. 5. Поскольку на эти параметры влияет деятельность каждого отдельного взятого сотрудника, можно составить динамическую карту эффективности его работы (рис. 6) с выделением интересующих критериев.

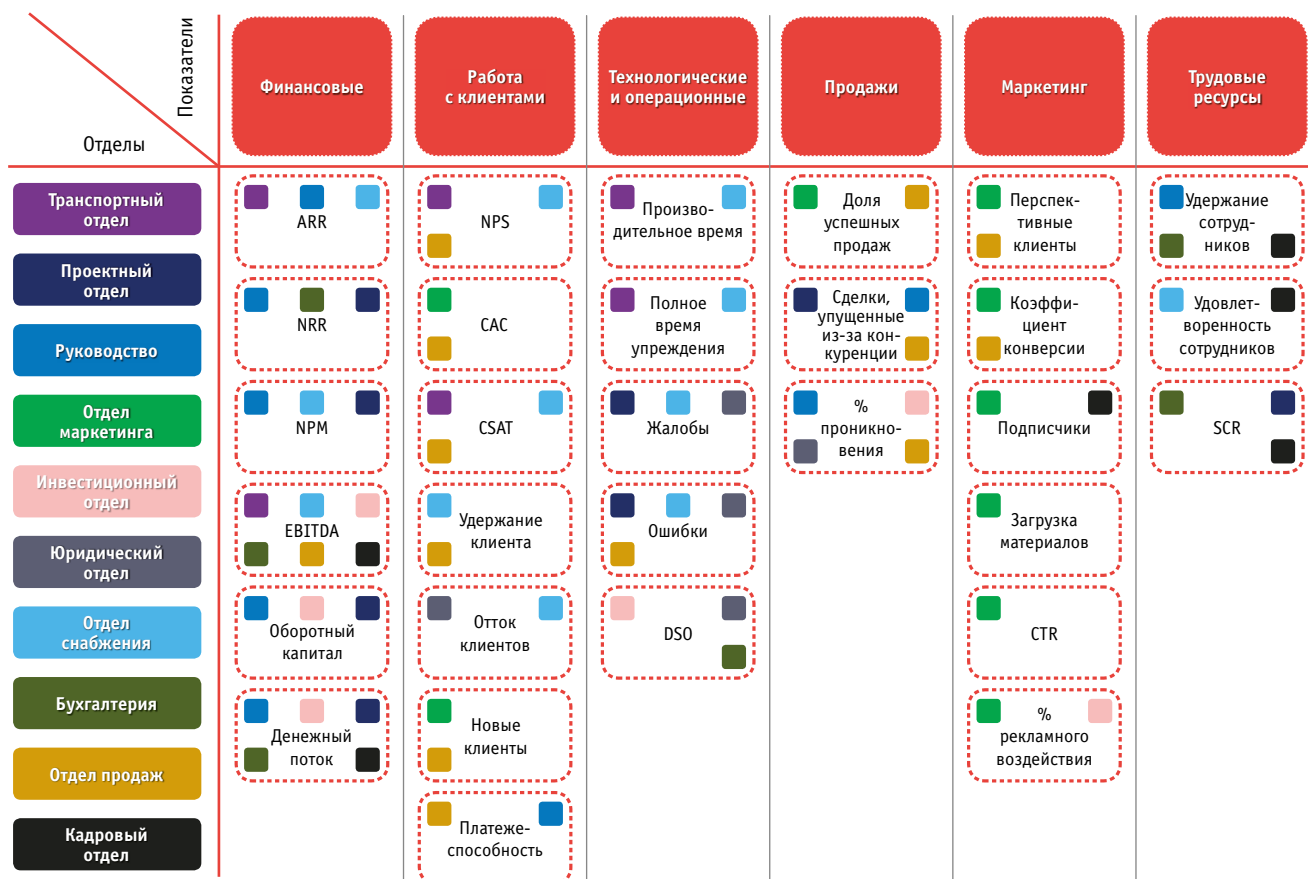
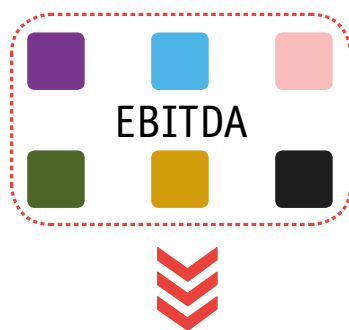


Рис. 3. KPI-матрица транспортно-логистического предприятия



$$EBITDA = Vr - CT + Nп + Пр + А,$$

где:

Vr — выручка от реализации продукции;

CT — ее себестоимость;

Nп — налог на прибыль;

Пр — проценты по займам;

А — амортизация основных средств и нематериальных активов.

Анализ показателей рентабельности	Ед.	2023	2024	2025	2026	2027
<b>Маржа валовой прибыли</b>						
Валовая прибыль	тыс. руб.	54707	135 851	289 120	502 017	537 481
Выручка	тыс. руб.	96373	291 215	603 376	955 241	1 119 274
Маржа валовой прибыли	%	57%	47%	48%	53%	48%
<b>Маржа чистой прибыли</b>						
Чистая прибыль	тыс. руб.	37539	104 574	218 553	408 575	415 116
Выручка	тыс. руб.	96373	291 215	603 376	955 241	1 119 274
Маржа чистой прибыли	%	39%	36%	36%	43%	37%
<b>Рентабельность продаж (маржа EBIT)</b>						
Операционная прибыль	тыс. руб.	46724	122 939	273 194	484 432	519 016
Выручка	тыс. руб.	96373	291 215	603 376	955 241	1 119 274
Рентабельность продаж (маржа EBIT)	%	48%	42%	45%	51%	46%
<b>Маржа EBITDA</b>						
EBIT	тыс. руб.	46724	122 939	273 194	484 432	519 016
Амортизация	тыс. руб.	0	0	4	83	83
EBITDA	тыс. руб.	46724	122 940	273 198	484 515	519 099
Выручка	тыс. руб.	96373	291 215	603 376	955 241	1 119 274
Маржа EBITDA	%	48%	42%	45%	51%	46%
<b>Рентабельность активов по EBIT (ROA)</b>						
Операционная прибыль	тыс. руб.	46724	122 939	273 194	484 432	519 016
Средние активы	тыс. руб.	—	102 434	253 368	551 159	943 522
Рентабельность активов по EBIT	%	—	120%	108%	88%	55%
<b>Рентабельность чистых активов (RONA)</b>						
Чистая прибыль	тыс. руб.	37539	104 574	218 553	408 575	415 116
Средние чистые активы	тыс. руб.	—	99448	252 175	566 134	978 618
Рентабельность чистых активов по EBIT	%	—	105%	87%	72%	42%
<b>Рентабельность собственного капитала по чистой прибыли (ROE)</b>						
Чистая прибыль	тыс. руб.	37539	104 574	218 553	408 575	415 116
Средний собственный капитал	тыс. руб.	—	91496	253 585	567 199	979 069
Рентабельность собственного капитала	%	—	114%	86%	72%	42%
Темп прироста рентабельности собственного капитала	%	—	—	-25%	-16%	-41%
Среднее значение рентабельности собственного капитала	%	—	—	—	—	79%

Рис. 4. Показатели EBITDA транспортно-логистической компании



Отчет о прибыли и убытках		I кв.	II кв.	III кв.	IV кв.
<b>Выручка</b>		<b>8860</b>	<b>17412</b>	<b>28927</b>	<b>41174</b>
	– себестоимость проданной продукции	–6117	–8783	–11983	–14783
	<i>материалы</i>	–3840	–6464	–9622	–12379
	<i>оплата труда</i>	–1170	–1191	–1213	–1235
	<i>налоги, относимые на текущие результаты</i>	–398	–405	–412	–420
	<i>общепроизводственные расходы</i>	–709	–722	–735	–749
	<i>амортизация</i>	0	0	0	0
<b>Валовая прибыль</b>		<b>2743</b>	<b>8629</b>	<b>16944</b>	<b>26391</b>
	– административные расходы	–1206	–1228	–1250	–1273
	– коммерческие расходы	–736	–749	–763	–777
<b>Прибыль (убыток) от продаж</b>		<b>801</b>	<b>6652</b>	<b>14931</b>	<b>24341</b>
	– налоги, относимые на финансовые результаты	0	0	0	0
	– проценты к уплате	0	0	0	0
<b>Прибыль (убыток) до налогообложения</b>		<b>801</b>	<b>6652</b>	<b>14931</b>	<b>24341</b>
	Сумма переносимого убытка	0	0	0	0
	Налоговая база	0	6652	14931	24341
	– налог на прибыль	0	1330	2986	4868
<b>Чистая прибыль (убыток)</b>		<b>801</b>	<b>5321</b>	<b>11945</b>	<b>19473</b>
	– дивиденды	0	0	0	0
	<b>= нераспределенная прибыль</b>	<b>801</b>	<b>5321</b>	<b>11945</b>	<b>19473</b>
	<b>= то же нарастающим итогом</b>	<b>801</b>	<b>6122</b>	<b>18067</b>	<b>37539</b>

Рис. 5. Отчет о прибыли и убытках, тыс. руб.

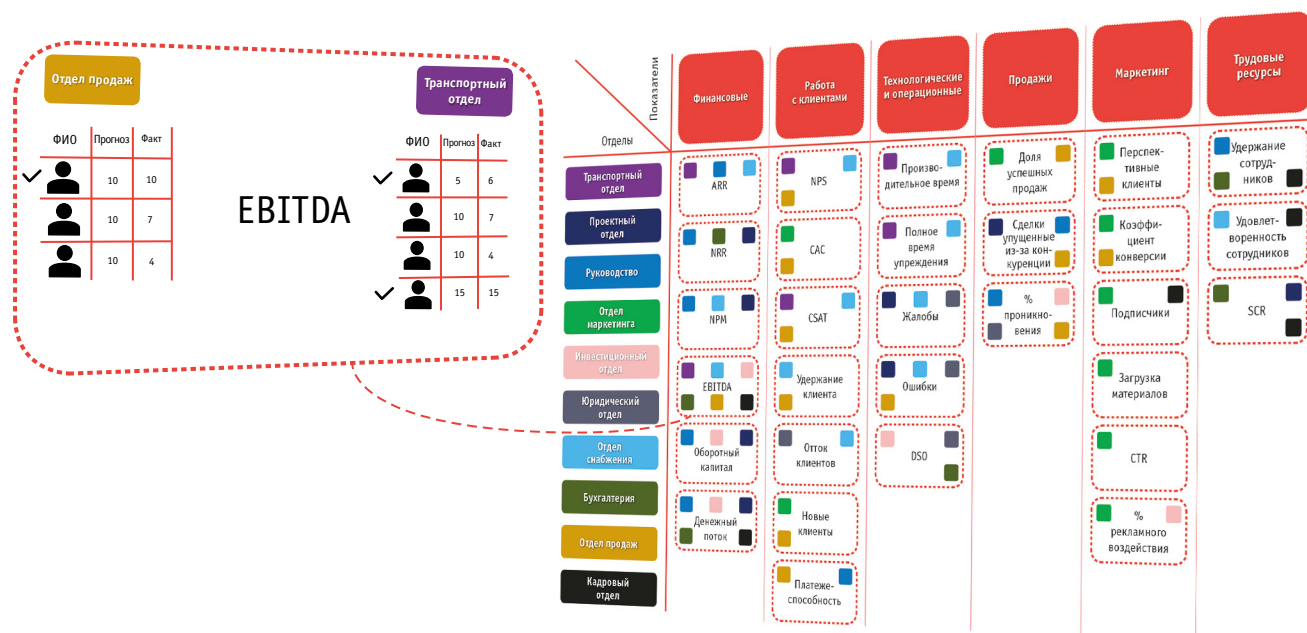


Рис. 6. Карта эффективности сотрудника

Показатели работы сотрудников рекомендуется распределять вместе с руководителями служб/отделов. Причем ключевые цели и показатели эффективности должны отвечать принципам SMART (рис. 7).

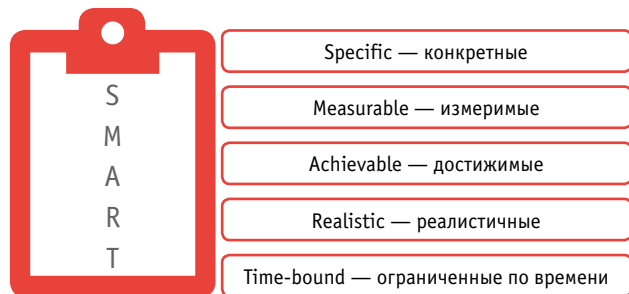


Рис. 7. Принципы SMART

Адаптивный пример работы с матрицей KPI представлен на рис. 8.

При работе с матрицей KPI важно понимать, что показатели эффективности — это диагностические маркеры деятельности транспортного предприятия, соответственно они не могут быть целью работы с матрицей, а представляют собой «диагностический лист» состояния бизнеса. Основная идея при составлении матрицы KPI — вовлечение каждого сотрудника в процесс достижения стратегических целей предприятия, визуализация вклада каждого работника в общее дело компании.

Вместе с тем следует отметить, что негативные результаты не всегда свидетельствуют о неэффективной работе подразделения — они могут быть следствием либо ошибок в планировании, либо завышенных ожиданий, либо непонимания объема рынка. Понятно, что привлечь клиентов сверх объема рынка, какими бы запасами ни обладало транспортное предприятие, невозможно. Также невозможно увеличивать рост маржинального дохода в условиях падающего рынка и падения платежеспособности потенциальных клиентов. Кроме того, неэффективная работа отдельно взятого предприятия может быть следствием кризисных явлений во всей отрасли.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сегодня транспортно-логистические компании находятся под двойным давлением: и со стороны санкционных ограничений, и со стороны внутренней конкуренции. Как следует из цикличности экономики, экономический рост не может длиться бесконечно долго, что также подразумевает отсутствие бесконечной рецессии [8]. По мнению некоторых аналитиков, сейчас наблюдается спад деловой активности — стратегия компаний направлена в сторону накопления внутренних резервов. На этом фоне контроль издержек, а также повышение производительности труда становятся чрезвычайно важными задачами. В основе роста производительности труда не последнее место занимают целеполагание, мотивация сотрудников и балансировка распределения финансовых потоков внутри предприятия. Для грамотного анализа состояния бизнеса важ-

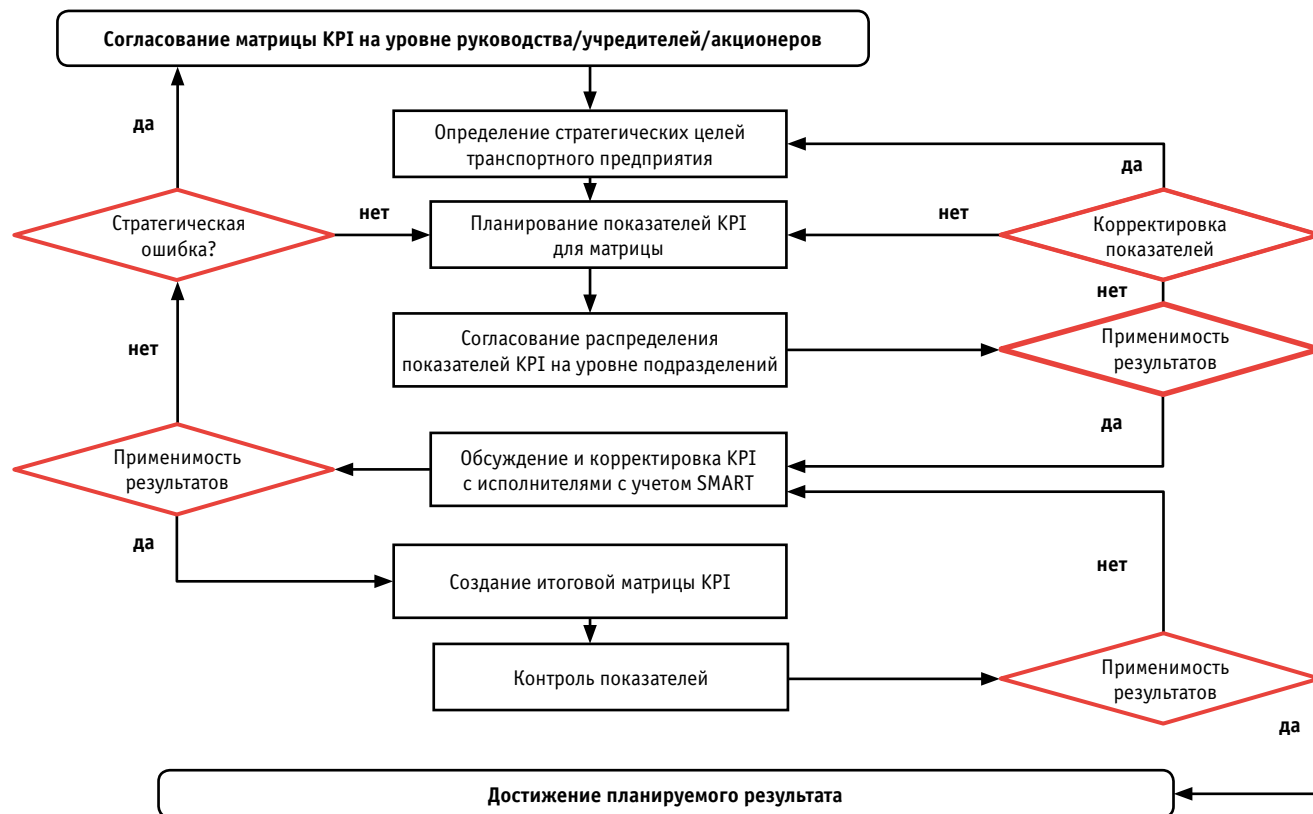


Рис. 8. Алгоритм работы с матрицей KPI

ным элементом является понимание структуры и деятельности всех подразделений, задействованных в достижении общей цели предприятия.

Матрица КРІ, развернутая для каждого сотрудника, позволяет ему отслеживать свой вклад в общую цель компании, знать результат своего труда, понимать, что его деятельность важна и из показателей его работы складывается рост бизнеса. Такой подход способствует профилактике «эмоционального выгорания» сотрудника: осознание вклада в общее дело позволяет работать с повышенным интересом и отдачей. Кроме того, открытая статистика результатов работы стимулирует

внутриколлективную конкуренцию, способствует вовлеченности в выполнение поставленных задач.

Развитием идеи матрицы КРІ может стать ее использование в программных продуктах для контроля показателей в режиме реального времени. Направлением дальнейших исследований будет изучение того, как каждый показатель критерия эффективности подразделений влияет на всю систему транспортно-логистического предприятия, а также определение в зависимости от влияния на финальный результат показателей первого порядка, как наиболее важных, и последующих.

#### Сведения об авторах:

**Елена Николаевна Тимухина**, доктор технических наук, профессор кафедры «Управление эксплуатационной работой» Уральского государственного университета путей сообщения

**Кирилл Максимович Тимухин**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление эксплуатационной работой» Уральского государственного университета путей сообщения

#### Authors information:

**Elena N. Timukhina**, DSc in Engineering, Professor of Operations Management Department, Ural State University of Railway Transport

**Kirill M. Timukhin**, PhD in Engineering, Associate Professor of Operations Management Department, Ural State University of Railway Transport

## Литература

1. Прогноз социально-экономического развития Российской Федерации на 2023 год и на плановый период 2024 и 2025 годов. URL: [https://www.economy.gov.ru/material/directions/makroec/prognozy\\_socialno\\_ekonomicheskogo\\_razvitiya/prognoz\\_socialno\\_ekonomicheskogo\\_razvitiya\\_rossiyskoy\\_federacii\\_na\\_2023\\_god\\_i\\_na\\_planovyy\\_period\\_2024\\_i\\_2025\\_godov.html](https://www.economy.gov.ru/material/directions/makroec/prognozy_socialno_ekonomicheskogo_razvitiya/prognoz_socialno_ekonomicheskogo_razvitiya_rossiyskoy_federacii_na_2023_god_i_na_planovyy_period_2024_i_2025_godov.html) (дата обращения: 26.11.2023).
2. Ведерникова О. Как повысить вовлеченность персонала в работу. URL: <https://www.hr-portal.ru/article/kak-povysit-vovlechenost-personala-v-rabotu> (дата обращения: 26.11.2023).
3. Горшенина Е. В. КРІ и мотивация персонала // Экономические исследования. 2022. № 2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kpi-i-motivatsiya-personala> (дата обращения: 17.12.2023).
4. Тушин Н. А., Чумаков А. В., Тимухин К. М. Стратегические ориентиры и автоматизация транспортно-экспедиторских предприятий // Транспорт Урала. 2017. № 2 (53). С. 8–12. DOI: 10.20291/1815-9400-2017-2-8-12.
5. Тушин Н. А., Тимухин К. М. Влияние конкуренции на рынок транспортно-экспедиционных услуг // Транспорт Урала. 2016. № 2 (49). С. 69–74. DOI: 10.20291/1815-9400-2016-2-69-74.
6. Базарова Т. Ю., Еремина Б. Л. Управление персоналом. Москва : Юнити-Дана, 2012. 273 с.
7. Зубарев И. С., Щербина Н. С. Применение показателя EBITDA как основного для анализа платежеспособности исследуемой организации // Известия СПбГАУ. 2014. № 37. С. 142–145. ISSN 2078-1318.
8. Свиридова Н. Д. Теоретические основы экономических кризисов: исторический аспект // Экономика и социум. 2023. № 1-1 (104). С. 405–410. ISSN 2225-1545.

## References

1. Forecast of socio-economic development of the Russian Federation for 2023 and for the planning period of 2024 and 2025 [Prognoz sotsial'no-ekonomicheskogo razvitiya Rossiyskoy Federatsii na 2023 god i na planovyy period 2024 i 2025 godov]. URL: [https://www.economy.gov.ru/material/directions/makroec/prognozy\\_socialno\\_ekonomicheskogo\\_razvitiya/prognoz\\_socialno\\_ekonomicheskogo\\_razvitiya\\_rossiyskoy\\_federacii\\_na\\_2023\\_god\\_i\\_na\\_planovyy\\_period\\_2024\\_i\\_2025\\_godov.html](https://www.economy.gov.ru/material/directions/makroec/prognozy_socialno_ekonomicheskogo_razvitiya/prognoz_socialno_ekonomicheskogo_razvitiya_rossiyskoy_federacii_na_2023_god_i_na_planovyy_period_2024_i_2025_godov.html) (access date: 26.11.2023).
2. Vedernikova O. How to increase staff engagement in work [Kak povysit' vovlechenost' personala v rabotu]. URL: <https://www.hr-portal.ru/article/kak-povysit-vovlechenost-personala-v-rabotu> (access date: 26.11.2023).
3. Gorshenina E. V. KPI and staff motivation [KPI i motivatsiya personala]. *Economic Research*. 2022. No. 2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kpi-i-motivatsiya-personala> (access date: 17.12.2023).
4. Tushin N. A., Chumakov A. V., Timukhin K. M. Strategic identities and automation of forwarding agency [Strategicheskie orientiry i avtomatizatsiya transportno-ekspeditorskikh predpriyatij]. *Transport of the Urals*. 2017. No. 2 (53). Pp. 8–12. DOI: 10.20291/1815-9400-2017-2-8-12.
5. Tushin N. A., Timukhin K. M. Effects of competition on the market of freight forwarding services [Vliyaniye konkurentsii na rynek transportno-ekspeditSIONnykh uslug]. *Transport of the Urals*. 2016. No. 2 (49). Pp. 69–74. DOI: 10.20291/1815-9400-2016-2-69-74.
6. Bazarova T. Yu., Eremina B. L. Personnel management [Upravlenie personalom]. Moscow : Unity-Dana, 2012. 273 p.
7. Zubarev I. S., Shcherbina N. S. Application of EBITDA as the primary analysis for the solvency of the organization under study [Primenenie pokazatelya EBITDA kak osnovnogo dlya analiza platezhesposobnosti issleduemoy organizatsii]. *News of the St. Petersburg State Agrarian University*. 2014. No. 37. Pp. 142–145. ISSN 2078-1318.
8. Sviridova N. D. Theoretical foundations of economic crises: historical aspect [Teoreticheskie osnovy ekonomicheskikh krizisov: istoricheskiy aspekt]. *Economics and Society*. 2023. No. 1–1 (104). Pp. 405–410. ISSN 2225-1545.

Объем статьи 0,83 авторских листа

Научная статья

УДК 621.331

## Сравнение систем тягового электроснабжения 25 кВ и 2×25 кВ на участке с односторонним питанием без учета индуктивных сопротивлений тяговой сети

Андрей Николаевич Штин<sup>1</sup>, Дарья Андреевна Марченко<sup>2</sup>,  
Дмитрий Валентинович Лесников<sup>1</sup>, Наталья Александровна Афанасьева<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Уральский государственный университет путей сообщения, Екатеринбург, Россия

<sup>2</sup>Тяговая подстанция о.п. Мочаги Магнитогорской дистанции электроснабжения «Трансэнерго» — филиала ОАО «РЖД», п. Новокаолиновый, Россия

## Comparison of 25 kV and 2×25 kV traction power supply systems in a one-way power supply section without taking into account the inductive resistances of the traction network

Andrey N. Shtin<sup>1</sup>, Darya A. Marchenko<sup>2</sup>, Dmitriy V. Lesnikov<sup>1</sup>, Natalya A. Afanasyeva<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ural State University of Railway Transport, Ekaterinburg, Russia

<sup>2</sup>The traction substation Mochagi, Magnitogorsk power supply division, «Transenergo», branch of JSC «Russian Railways», Novokaolinovy, Russia

### Аннотация

С учетом переориентации на новые рынки выбор системы тягового электроснабжения для электрификации железнодорожных линий приобретает особую актуальность. В России предпочтительными считаются система однофазного переменного тока 25 кВ и система переменного тока 2×25 кВ. Обе они обладают рядом преимуществ и недостатков, влияющих на их дальнейшее обслуживание и стоимость электрификации.

В статье дано технико-экономическое сравнение систем переменного тока 25 кВ и 2×25 кВ, предложена методика, позволяющая сопоставить их по приведенным затратам, представлен пример расчета при использовании ряда допущений.

**Ключевые слова:** система тягового электроснабжения, технико-экономическое сравнение, приведенные затраты, капитальные вложения, потери мощности, тяговая сеть, трансформаторное оборудование

### Abstract

Taking into account the reorientation to new markets, the choice of a traction power supply system for the electrification of railway lines is becoming particularly relevant. In Russia, a 25 kV single-phase alternating current system and a 2×25 kV alternating current system are considered preferable. Both of them have some advantages and disadvantages that affect their further maintenance and the cost of electrification.

The article provides a technical and economic comparison of 25 kV and 2×25 kV alternating current systems. It also proposes the methodology that allows them to be compared according to the given costs, and presents an example of calculation with some assumptions.

**Keywords:** traction power supply system, technical and economic comparison, reduced costs, capital investments, power losses, traction network, transformer equipment

DOI: 10.20291/1815-9400-2024-1-90-97

В связи с ростом грузооборота на многих участках электрифицированных железных дорог применяется система тягового электроснабжения (СТЭ) однофазного переменного тока 2×25 кВ. Согласно [1–3], такая система по сравнению с СТЭ однофазного переменного тока 25 кВ имеет как преимущества (меньшие токи в тяговой сети, снижение влияния на линии связи, увеличение расстояния между тяговыми подстанциями), так и недостатки (возрастание единиц оборудования, увеличение потерь в трансформаторах). Поэтому применение той или иной СТЭ должно быть экономически обосновано.

В статье предлагается упрощенная методика технико-экономического сравнения систем 25 кВ и 2×25 кВ.

Сравнение будем производить по величине приведенных затрат  $Z_{\text{ПР}}$  для каждого варианта, которые определим по формуле [4]

$$Z_{\text{ПР}} = K_0 + (1 - \psi) \cdot \sum_{t_0}^T \frac{C_t}{(1 + E)^t}, \quad (1)$$

где  $K_0$  — капитальные вложения в первом году на реализацию проекта;  $\psi$  — доля налоговых отчислений от прибыли ( $\psi = 0,2$ );  $t_0$  — год капитальных вложений ( $t_0 = 0$ );  $T$  — горизонт расчета или расчетный период ( $T = 7$  лет);  $C_t$  — текущие расходы в  $t$ -м году;  $E$  — норма дисконта (на 15.09.2023  $E = 0,13$ ).

Капитальные вложения для различных СТЭ можно найти как сумму стоимостей оборудования тяговых подстанций ( $K_{\text{ТП}}$ ), автотрансформаторных пунктов ( $K_{\text{АП}}$ ) и элементов тяговой сети ( $K_{\text{ТС}}$ ):

$$K_0 = K_{\text{ТП}} + K_{\text{АП}} + K_{\text{ТС}}. \quad (2)$$

Годовые текущие расходы будем рассчитывать по выражению

$$C_t = O_{AM} + O_{MAT} + Z_{ЭЭ}, \quad (3)$$

где  $O_{AM}$  — амортизационные отчисления (примем  $O_{AM} = 0,055 \cdot K_0$ );  $O_{MAT}$  — затраты на материалы (примем  $O_{MAT} = 0,01 \cdot K_0$ );  $Z_{ЭЭ}$  — годовые затраты на электроэнергию.

Выполним технико-экономическое сравнение СТЭ 25 кВ и 2×25 кВ при следующих допущениях:

1) электрифицированный перегон длиной  $L$  имеет одностороннее питание от одного тягового трансформатора (ТТ) отпаечной тяговой подстанции (ТП);

2) перегон разбит на  $M$  равных участков длиной  $\Delta L = L/M$ ;

3) при СТЭ 2×25 кВ на перегоне установлены два автотрансформаторных пункта (АП1 и АП2), имеющих одинаковое оборудование и расположенных от ТП на расстоянии  $2 \cdot \Delta L$  и  $4 \cdot \Delta L$  соответственно;

4) капитальные вложения определяются только стоимостью силового оборудования;

5) распределительные устройства 27,5 кВ и 10 (35) кВ на ТП одинаковы для СТЭ 25 кВ и 2×25 кВ;

6) марки контактного провода (КП), несущего троса (НТ) и рельса (Р) одинаковы для СТЭ 25 кВ и 2×25 кВ;

7) энергия, которую потребляют электровозы в режиме тяги, одинакова для СТЭ 25 кВ и 2×25 кВ;

8) скорость поезда на перегоне является постоянной величиной;

9) потери мощности в СТЭ будем определять для  $(M + 1)$  положений электровоза, соответствующих началам и (или) концам участков (т. 0 — т. 5 на рис. 1–7), считая, что между этими положениями потери мощности изменяются линейно;

10) потери в линиях электропередачи внешнего электропитания одинаковы для СТЭ 25 кВ и 2×25 кВ;

11) потери в трансформаторах собственных нужд и СЦБ одинаковы для СТЭ 25 кВ и 2×25 кВ;

12) потери в индуктивных сопротивлениях тяговых сетей не рассматриваются.

С учетом допущений 3–6 слагаемые в (2) можно записать следующим образом:

$$K_{ТП} = N_{ТТ} \cdot C_{ТТ} + N_{ПТ} \cdot C_{ПТ} + N_{ТА} \cdot C_{ТА} + N_{ТВ} \cdot C_{ТВ} + N_Q \cdot C_Q + N_{QS} \cdot C_{QS} + N_{FV} \cdot C_{FV}; \quad (4)$$

$$K_{AT} = 2 \cdot (N_{AT} \cdot C_{AT} + N_{TA} \cdot C_{TA} + N_Q \cdot C_Q + N_{QS} \cdot C_{QS} + N_{FV} \cdot C_{FV}); \quad (5)$$

$$K_{ТС} = N_{У(П)П} \cdot C_{0У(П)П} \cdot L, \quad (6)$$

где  $N_{ТТ}, C_{ТТ}, N_{ПТ}, C_{ПТ}, N_{ТА}, C_{ТА}, N_{ТВ}, C_{ТВ}, N_Q, C_Q, N_{QS}, C_{QS}, N_{FV}, C_{FV}$  — соответственно число ( $N$ ) и единичная стоимость ( $C$ ) тяговых трансформаторов, понижающих трансформаторов, автотрансформаторов, трансформаторов тока, трансформаторов напряжения, выключателей, разъединителей и ограничителей перенапряжений на ТП или одном АП;

$N_{У(П)П}, C_{0У(П)П}$  — соответственно число и стоимость единицы длины усиливающих или питающих проводов.

Годовые затраты на электроэнергию складываются из двух частей:

$$Z_{ЭЭ} = Z_T + \Delta Z_{ЭЭ}, \quad (7)$$

где  $Z_T$  — годовые затраты на электроэнергию, которую потребляют электровозы в режиме тяги;  $\Delta Z_{ЭЭ}$  — годовые затраты на потери электроэнергии в СТЭ.

С учетом допущения 7 выражение (7) будет состоять только из второго слагаемого, которое определяется как

$$\Delta Z_{ЭЭ} = \Delta W_{ЭЭ} \cdot N_{П} \cdot e_{ЭЭ}, \quad (8)$$

где  $\Delta W_{ЭЭ}$  — потери электроэнергии в СТЭ при прохождении одного поезда;  $N_{П} = 8760/\Delta T_{П}$  — число поездов в году; 8760 — число часов в году;  $\Delta T_{П}$  — межпоездной интервал;  $e_{ЭЭ}$  — тариф на электроэнергию.

Потери электроэнергии при прохождении одного поезда можно найти по формуле

$$\Delta W_{ЭЭ} = \int_0^{T_{П}} \Delta p \cdot dt = \int_0^{T_{П}} f_p(t) \cdot dt = \Delta P_{СР} \cdot T_{П}, \quad (9)$$

где  $T_{П} = L/v_{П}$  — время хода поезда по перегону;  $v_{П}$  — скорость поезда на перегоне;  $\Delta p = f_p(t)$  и  $\Delta P_{СР}$  — соответственно мгновенное и среднее значения потерь мощности в СТЭ за время  $T_{П}$ .

В соответствии с допущением 9 можно сказать, что график  $\Delta p = f_p(t)$  состоит из участков линейных функций, который в общем виде представлен на рис. 1.

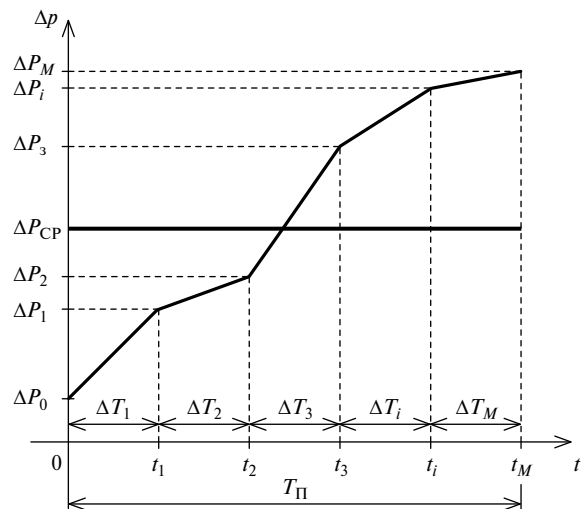


Рис. 1. Пример графика  $\Delta p = f_p(t)$ , состоящего из линейных функций

Очевидно, что для нахождения среднего значения любой функции необходимо площадь фигуры, образованную этой функцией и осью абсцисс, разделить на основание фигуры.

Из рис. 1 следует, что в данном случае фигура состоит из  $M$  трапеций, основаниями которых являются потери мощности  $\Delta P_i$  в моменты времени  $t_i$ , а высотами — времена движения по участку  $\Delta T_i$ . Поэтому среднее значение потерь мощности  $\Delta P_{CP}$  за время хода поезда по участку  $T_{П}$  составит

$$\Delta P_{CP} = \frac{1}{T_{П}} \cdot \sum_{i=1}^M \frac{\Delta P_{i-1} + \Delta P_i}{2} \cdot \Delta T_i.$$

Учитывая допущения 2 и 8, окончательно получим

$$\Delta P_{CP} = \frac{1}{M} \cdot \left( \frac{\Delta P_0 + \Delta P_M}{2} + \sum_{i=1}^{M-1} \Delta P_i \right). \quad (10)$$

Из (9) следует, что для определения потерь электроэнергии в СТЭ необходимо иметь зависимость  $\Delta p = f_p(t)$  при прохождении одного поезда. Построим эти зависимости для систем 25 кВ и 2×25 кВ на рассматриваемом перегоне.

С учетом допущения 10 можно заключить, что основные потери мощности в СТЭ происходят в трансформаторном оборудовании ( $\Delta P_{ТО}$ ) и в тяговой сети ( $\Delta P_{ТС}$ ):

$$\Delta P_i = \Delta P_{ТОi} + \Delta P_{ТСi} \quad (11)$$

где  $i$  — номер положения электровоза (от 0 до  $M$ ).

С достаточной точностью потери мощности в любом трансформаторе ( $\Delta P_T$ ) определяются как сумма потерь в стали ( $\Delta P_C$ ) и в меди ( $\Delta P_M$ ), и их можно найти следующим образом:

$$\Delta P_T = \Delta P_C + \Delta P_M = \Delta P_{XX} + \Delta P_{K3} \cdot k_3^2,$$

где  $\Delta P_{XX}$  и  $\Delta P_{K3}$  — соответственно паспортные значения потерь холостого хода и короткого замыкания;  $k_3 = I_T / I_{HT}$  — коэффициент загрузки трансформатора;  $I_T$  и  $I_{HT}$  — соответственно текущий и номинальный ток трансформатора.

Поэтому потери в трансформаторном оборудовании, расположенном на перегоне, для  $i$ -го положения электровоза могут быть получены как

$$\Delta P_{ТОi} = \sum_{n=1}^N \Delta P_{XXn} + \sum_{n=1}^N \Delta P_{K3n} \cdot k_{3n}^2,$$

где  $N$  — число единиц трансформаторного оборудования на перегоне;  $\Delta P_{XXn}$ ,  $\Delta P_{K3n}$ ,  $k_{3n}$  — соответственно потери холостого хода, потери короткого замыкания и коэффициент загрузки  $n$ -го трансформаторного оборудования.

В соответствии с допущениями 3 и 11 потери мощности в трансформаторном оборудовании на рассматриваемом перегоне будут равны:

для системы 25 кВ

$$\Delta P_{ТОi} = \Delta P_{XXT} + \Delta P_{K3T} \cdot k_{3Ti}^2 \quad (12)$$

для системы 2×25 кВ

$$\begin{aligned} \Delta P_{ТОi} = & \Delta P_{XXT} + \Delta P_{XXП} + 2 \cdot \Delta P_{XXA} + \\ & + \Delta P_{K3T(Л)} \cdot k_{3T(Л)i}^2 + \Delta P_{K3T(П)} \cdot k_{3T(П)i}^2 + \\ & + \Delta P_{K3П} \cdot k_{3Pi}^2 + \Delta P_{K3A} \cdot (k_{3A1i}^2 + k_{3A2i}^2), \end{aligned} \quad (13)$$

где  $\Delta P_{XXT}$ ,  $\Delta P_{XXП}$ ,  $\Delta P_{XXA}$  — потери холостого хода тягового трансформатора систем 25 кВ или 2×25 кВ, понижающего трансформатора 110/10 кВ системы 2×25 кВ и автотрансформатора АП соответственно;  $\Delta P_{K3T}$ ,  $\Delta P_{K3T(Л)}$ ,  $\Delta P_{K3T(П)}$ ,  $\Delta P_{K3П}$ ,  $\Delta P_{K3A}$  — потери короткого замыкания тягового трансформатора системы 25 кВ, левой и правой частей тягового трансформатора системы 2×25 кВ, понижающего трансформатора 110/10 кВ системы 2×25 кВ и автотрансформатора АП соответственно;  $k_{3Ti}$ ,  $k_{3T(Л)i}$ ,  $k_{3T(П)i}$ ,  $k_{3Pi}$ ,  $k_{3A1i}$ ,  $k_{3A2i}$  — коэффициенты загрузки в  $i$ -м положении электровоза соответственно тягового трансформатора системы 25 кВ, левой и правой частей тягового трансформатора системы 2×25 кВ, понижающего трансформатора 110/10 кВ системы 2×25 кВ, и автотрансформаторов АП1 и АП2.

В дальнейшем токи, протекающие по какому-либо элементу СТЭ, будем выражать в долях от тока электровоза, идущего по перегону. Эту величину назовем «относительное значение тока» и обозначим как  $d$ :

$$d = \frac{I}{I_{\Theta}}, \quad (14)$$

где  $I$  — ток, протекающий по элементу СТЭ;  $I_{\Theta}$  — ток электровоза.

Тогда коэффициент загрузки трансформатора можно выразить как

$$k_3 = d \cdot \frac{I_{\Theta}}{I_{HT}}. \quad (15)$$

Коэффициент загрузки понижающего трансформатора практически не зависит от тяговой нагрузки. Поэтому с учетом (14) выражения (12) и (13) можно записать следующим образом:

для системы 25 кВ

$$\Delta P_{ТОi} = \Delta P_{XXT} + \Delta P_{K3T} \cdot \left( d_{Ti} \cdot \frac{I_{\Theta}}{I_{HT}} \right)^2; \quad (16)$$

для системы 2×25 кВ

$$\begin{aligned} \Delta P_{ТОi} = & \Delta P_{XXT} + \Delta P_{XXП} + 2 \cdot \Delta P_{XXA} + \Delta P_{K3T(Л)} \times \\ & \times \left( d_{T(Л)i} \cdot \frac{I_{\Theta}}{I_{HT(Л)}} \right)^2 + \Delta P_{K3T(П)} \cdot \left( d_{T(П)i} \cdot \frac{I_{\Theta}}{I_{HT(П)}} \right)^2 + \\ & + \Delta P_{K3П} \cdot k_{3П}^2 + \Delta P_{K3A} \cdot \left[ \left( d_{A1i} \cdot \frac{I_{\Theta}}{I_{HA1}} \right)^2 + \left( d_{A2i} \cdot \frac{I_{\Theta}}{I_{HA2}} \right)^2 \right], \end{aligned} \quad (17)$$



где  $d_{Ti}$ ,  $d_{T(L)i}$ ,  $d_{T(\Pi)i}$ ,  $d_{A1i}$ ,  $d_{A2i}$  — относительные значения токов в  $i$ -м положении электровоза соответственно вторичной обмотки ТТ системы 25 кВ, левой и правой частей тягового трансформатора системы 2×25 кВ, автотрансформатора АП1, автотрансформатора АП2;  $I_{HT}$ ,  $I_{HT(L)}$ ,  $I_{HT(\Pi)}$ ,  $I_{HA}$  — номинальные токи соответственно вторичной обмотки ТТ системы 25 кВ, левой и правой частей тягового трансформатора системы 2×25 кВ, автотрансформатора АП.

С достаточной точностью можно считать, что

$$\Delta P_{K3T(L)} = \Delta P_{K3T(\Pi)} = \Delta P_{K3T/2};$$

$$I_{HT(L)} = I_{HT(\Pi)} = I_{HT},$$

где  $\Delta P_{K3T}$ ,  $I_{HT}$  — соответственно потери КЗ и номинальный ток тягового трансформатора системы 2×25 кВ.

Тогда с учетом последних равенств выражение (17) можно записать как

$$\Delta P_{TOi} = \Delta P_{XHT} + \Delta P_{XHP} + 2 \cdot \Delta P_{XHA} + I_{\Xi}^2 \cdot \left[ \frac{\Delta P_{K3T}}{2 \cdot I_{HT}^2} \cdot (d_{T(L)i}^2 + d_{T(\Pi)i}^2) + \frac{\Delta P_{K3A}}{I_{HA}^2} \cdot (d_{A1i}^2 + d_{A2i}^2) \right] + \Delta P_{K3\Pi} \cdot k_{\Xi}^2 \Pi. \quad (18)$$

Потери мощности в тяговой сети складываются из потерь в контактной сети, состоящей из контактного провода, несущего троса и усиливающих проводов ( $\Delta P_{KC}$ ), в питающем проводе ( $\Delta P_{ПП}$ ) и рельсе ( $\Delta P_{P}$ ) и могут быть найдены по следующим выражениям:

$$\Delta P_{TCi} = \Delta P_{KCi} + \Delta P_{ППi} + \Delta P_{Pi} = \sum_{j=1}^M I_{KCj}^2 \cdot R_{KCj} + \sum_{j=1}^M I_{ППj}^2 \cdot R_{ППj} + \sum_{j=1}^M I_{Pj}^2 \cdot R_{Pj} = r_{0KC} \cdot \sum_{j=1}^M I_{KCj}^2 \cdot l_{KCj} + (19)$$

$$+ r_{0ПП} \cdot \sum_{j=1}^M I_{ППj}^2 \cdot l_{ППj} + r_{0P} \cdot \sum_{j=1}^M I_{Pj}^2 \cdot l_{Pj},$$

где  $I_{KCj}$ ,  $R_{KCj}$ ,  $l_{KCj}$ ,  $r_{0KC}$  — соответственно ток, полное активное сопротивление, длина  $j$ -го участка и активное сопротивление 1 км контактной сети;  $I_{ППj}$ ,  $R_{ППj}$ ,  $l_{ППj}$ ,  $r_{0ПП}$  — то же, но питающего провода;  $I_{Pj}$ ,  $R_{Pj}$ ,  $l_{Pj}$ ,  $r_{0P}$  — то же, но рельса.

С учетом допущения 12 сопротивления 1 км контактной сети, питающего провода и рельса будем определять по формулам [1]:

$$r_{0KC} = \frac{\rho_M}{S_{MKC}}; r_{0ПП} = \frac{\rho_M}{S_{MПП}}; r_{0P} = \frac{1}{G}, \quad (20)$$

где  $\rho_M$  — удельное сопротивление медных проводов ( $\rho_M = 18,2 \cdot 0,000001 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{км}$ );  $S_{MKC}$ ,  $S_{MПП}$  — соответственно площади

сечения контактной сети и питающего провода в медном эквиваленте;  $G$  — масса погонного метра рельса.

Согласно допущению 2,  $j$ -е участки равны  $L/M$ . Кроме того,

$$I_{KCj} = I_{ППj} = I_{Pj} = L. \quad (21)$$

Подставляя выражения (14), (20) и (21) в (19), окончательно получим

$$\Delta P_{TCi} = I_{\Xi}^2 \cdot \frac{L}{M} \times \left[ \frac{\rho_M}{S_{MKC}} \cdot \sum_{j=1}^M d_{KCj}^2 + \frac{\rho_M}{S_{MПП}} \cdot \sum_{j=1}^M d_{ППj}^2 + \frac{1}{G} \cdot \sum_{j=1}^M d_{Pj}^2 \right], \quad (22)$$

где  $d_{KCj}$ ,  $d_{ППj}$ ,  $d_{Pj}$  — относительные значения токов на  $j$ -м участке соответственно контактной сети, питающего провода и рельса.

Таким образом, для определения потерь мощности  $\Delta P_i$  (11) необходимо найти относительные значения токов  $d$ , протекающих по трансформаторному оборудованию (16), (18) и тяговой сети (22), для всех положений электровоза рассматриваемых СТЭ.

Положения электровоза для системы 25 кВ, а также токи, протекающие по тяговым трансформатору и сети, соответствующие положению электровоза в т. 4, проиллюстрированы на рис. 2.

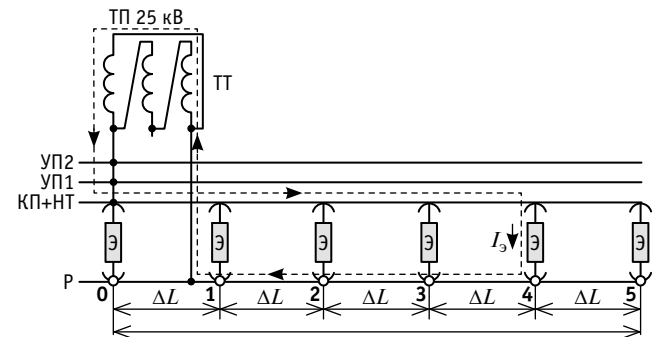


Рис. 2. Шесть положений электровоза и ток для т. 4 в системе 25 кВ

На рис. 3а–е показаны шесть положений (т. 0 — т. 5) электровоза и токи, протекающие по трансформаторному оборудованию и тяговой сети для системы 2×25 кВ с величинами токов (сплошными линиями обозначены токи, идущие от тягового трансформатора к автотрансформаторам, пунктирными и штрихпунктирными — токи, идущие к электровозу слева и справа соответственно).

На основании рис. 3 составлены табл. 1 и 2, в которых приведены относительные значения токов  $d$ , протекающих по трансформаторному оборудованию и тяговой сети, для вышеуказанных вариантов и положений электровоза.

Выполним технико-экономическое сравнение для систем 25 кВ с двумя усиливающими проводами (25 кВ + 2УП) и 2×25 кВ. Параметры для расчета приведены в табл. 3 и 4.

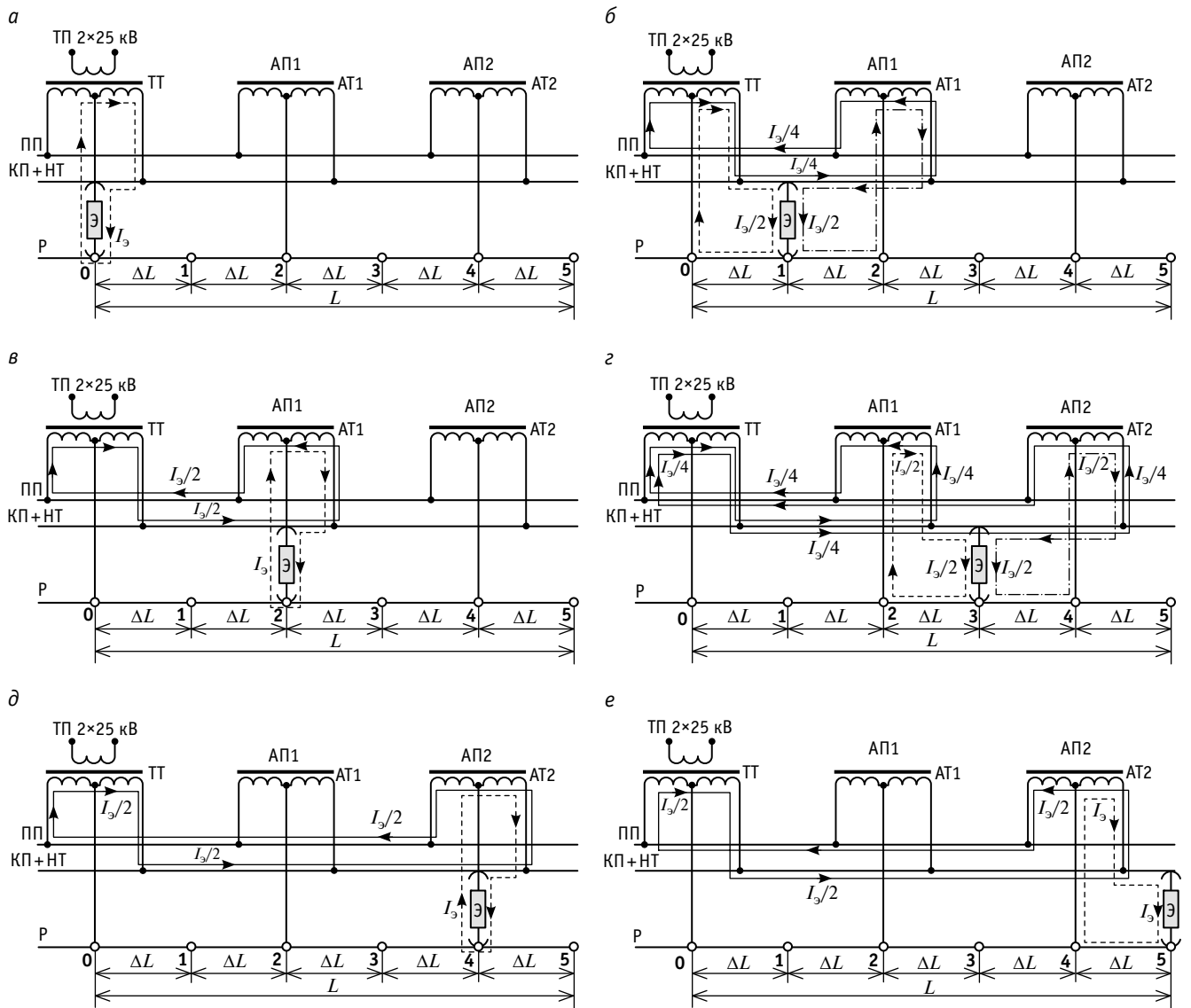


Рис. 3. Шесть положений электровоза и токи в системе 2×25 кВ:  
а–е — положения в т. 0, т. 1, т. 2, т. 3, т. 4 и т. 5 соответственно

Таблица 1

Относительные значения токов  $d$  трансформаторного оборудования

СТЭ	Трансформаторное оборудование	Положение электровоза					
		0	1	2	3	4	5
25 кВ	ТТ	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
2×25 кВ	ТТ — левая часть	0,00	0,25	0,50	0,50	0,50	0,50
	ТТ — правая часть	1,00	0,75	0,50	0,50	0,50	0,50
	АТ1	0,00	0,25	0,50	0,25	0,00	0,00
	АТ2	0,00	0,00	0,00	0,25	0,50	0,50

Таблица 2

Относительные значения токов  $d$  тяговой сети

СТЭ	Уча- сток ТС	Положение электровоза*														
		1			2			3			4			5		
		КС	ПП	Р	КС	ПП	Р	КС	ПП	Р	КС	ПП	Р	КС	ПП	Р
25 кВ	0-1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1
	1-2	0	0	0	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1
	2-3	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	1	1	0	1
	3-4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	1
	4-5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
2×25 кВ	0-1	0,75	0,25	0,5	0,5	0,5	0	0,5	0,5	0	0,5	0,5	0	0,5	0,5	0
	1-2	0,25	0,25	0,5	0,5	0,5	0	0,5	0,5	0	0,5	0,5	0	0,5	0,5	0
	2-3	0	0	0	0	0	0	0,75	0,25	0,5	0,5	0,5	0	0,5	0,5	0
	3-4	0	0	0	0	0	0	0,25	0,25	0,5	0,5	0,5	0	0,5	0,5	0
	4-5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1

\*В таблице не показаны значения при положении электровоза в т. 0, так как в ней во всех элементах тяговой сети  $d = 0$ .

Таблица 3

Исходные данные для расчетов

Параметр	Обозначение	Значение
Длина перегона, км	$L$	50
Число участков	$M$	5
Длина участка, км	$\Delta L$	10
Скорость поезда на участке, км/ч	$v_{\text{П}}$	50
Межпоездной интервал, ч	$\Delta T_{\text{П}}$	1
Ток электровоза*, А	$I_{\text{Э}}$	262,4
Коэффициент загрузки понижающего трансформатора 110/10	$K_{\text{ЗП}}$	0,3
Тариф на ЭЭ, руб./кВт·ч	$e_{\text{Э}}$	4,5
Сечение КП, мм <sup>2</sup>	$S_{\text{КП}}$	100
Сечение НТ, УП, ПП, мм <sup>2</sup>	$S_{\text{НТ}}, S_{\text{УП}}, S_{\text{ПП}}$	120
Масса рельса, кг	$G$	75

\*Ток электровоза равен половине номинального тока тягового трансформатора ТДТНЖ-25000 для системы 25 кВ (см. табл. 4).

Таблица 4

Параметры трансформаторного оборудования

СТЭ	Назначение	Тип	$S_{\text{НТ}}$ , кВА	$U_{\text{НТ}}$ , кВ	$I_{\text{НТ}}$ , А	$\Delta P_{\text{ХХ}}$ , кВт	$\Delta P_{\text{КЗ}}$ , кВт
25 кВ	Тяговый	ТДТНЖ	25000	27,5	524,9	21	140
2×25 кВ	Тяговый	ОРДНЖ	16000	55	290,9	27	84
	Понижающий	ТМН	6300	10	363,7	10	44
	Авто	АОМНЖ	10000	55	181,8	6,5	26

На основе схемных решений ТП и АП [1–3, 5] и в соответствии с выражениями (4)–(6) составим таблицы для определения капитальных вложений на сооружение рассматриваемых вариантов (табл. 5–7). Стоимость оборудования взята как средняя из открытых источников.

Пользуясь табл. 1–4 и выражениями (11), (16), (18), (22), выполним расчеты мгновенных значений потерь мощности в шести положениях электровоза для рассматриваемых вариантов (табл. 8).

Таблица 5

Расчет капитальных вложений на сооружение ТП

Оборудование	Тип (марка)	Цена за единицу, млн руб.	СТЭ 25 кВ		СТЭ 2×25 кВ	
			Кол-во	Стоимость, млн руб.	Кол-во	Стоимость, млн руб.
Тяговый трансформатор	ТДТНЖ-25000/110	8,00	2	16,00	0	0,00
Тяговый трансформатор	ОРДНЖ-16000/110	6,00	0	0,00	2	12,00
Понижающий трансформатор	ТМН-6300/110	3,60	0	0,00	2	7,20
Трансформатор тока	ТРГ-110	0,30	30	9,00	80	24,00
Трансформатор напряжения	ЗНГ-110	0,30	6	1,80	6	1,80
Выключатель	ВЭБ-110	2,00	2	4,00	4	8,00
Разъединитель	РПД-110	0,30	8	2,40	10	3,00
Ограничитель напряжения	ОПН-110	0,20	6	1,20	10	2,00
ВСЕГО:				34,40		58,00

Таблица 6

Расчет капитальных вложений на сооружение одного АП

Оборудование	Тип (марка)	Цена за единицу, млн руб.	Кол-во	Стоимость, млн руб.
Автотрансформатор	АОМЖ-10000/27,5×2	3,00	1	3,00
Трансформатор тока	ТОЛ-35	0,15	18	2,70
Выключатель	ЗАН47–27,5	2	3	6,00
Разъединитель	РГ-35	0,2	3	0,60
Ограничитель напряжения	ОПН-27,5	0,02	8	0,16
ВСЕГО:				12,46

Таблица 7

Расчет капитальных вложений на сооружение тяговой сети ( $L = 50$  км)

СТЭ	Оборудование	Марка провода	Цена за 1 км, млн руб.	$L$ , км	Кол-во	Общая длина	Стоимость, млн руб.
25 кВ+2УП	Усиливающий провод	М-120	1,00	50	2	100	100,00
2×25кВ	Питающий провод	М-120	1,00	50	1	50	50,00

Таблица 8

Потери мощности в тяговой сети при различных положениях электровоза, кВт

СТЭ	Положение электровоза					
	0 ( $t_0$ )	1 ( $t_1$ )	2 ( $t_2$ )	3 ( $t_3$ )	4 ( $t_4$ )	5 ( $t_5$ )
25 кВ + 2УП	56,00	92,43	128,86	165,29	201,73	238,16
2×25 кВ	88,14	131,96	165,31	211,79	246,02	312,18

С учетом допущения 8 положения электровоза (т. 0–т. 5) в табл. 8 можно заменить на моменты времени ( $t_0-t_5$ ), в которые электровоз находится в этих положениях.

Пользуясь данными табл. 8, по выражениям (8)–(10) рассчитаем годовые затраты на потери электроэнергии для рассматриваемых вариантов (табл. 9).

По данным табл. 5–7 и 9 и выражениям (1)–(3) составим итоговую табл. 10.

На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

разработана упрощенная методика технико-экономического сравнения систем тягового электроснабжения 25 кВ и 2×25 кВ;

дальнейшее уточнение представленной методики возможно путем отказа от некоторых допущений;

Таблица 9

Средние потери мощности ( $\Delta P_{СР}$ ), потери энергии ( $\Delta W_{ЭЭ}$ ) и годовые затраты на потери электроэнергии ( $\Delta Z_{ЭЭ}$ )

СТЭ	$\Delta P_{СР}$ , кВт	$\Delta W_{ЭЭ}$ , кВт·ч	$\Delta Z_{ЭЭ}$ , млн руб.
25 кВ + 2УП	147,08	147,08	5,80
2×25 кВ	191,05	191,05	7,53

согласно расчетам приведенных затрат, выполненным при принятых схемах, допущениях и стоимости оборудования, система 25 кВ с двумя усиливающими проводами более экономична, чем система 2×25 кВ.

Таблица 10

Расчет приведенных затрат для СТЭ, млн руб.

Система ЭЛС	$K_0$	$O_{АМ}$	$O_{МАТ}$	$\Delta Z_{ЭЭ}$	$C_t$	$Z_{ПР}$
25 кВ + 2УП	134,40	7,39	1,34	5,80	14,53	228,97
2×25 кВ	132,92	7,31	1,33	7,53	16,17	238,15

**Сведения об авторах:**

**Андрей Николаевич Штин**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение транспорта» Уральского государственного университета путей сообщения

**Дарья Андреевна Марченко**, электромеханик тяговой подстанции о.п. Мочаги Магнитогорской дистанции электроснабжения «Трансэнерго» — филиала ОАО «РЖД»

**Дмитрий Валентинович Лесников**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение транспорта» Уральского государственного университета путей сообщения

**Наталья Александровна Афанасьева**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Экономика транспорта» Уральского государственного университета путей сообщения

**Authors information:**

**Andrey N. Shtin**, PhD in Engineering, Associate Professor of Transport Power Supply Department, Ural State University of Railway Transport

**Darya A. Marchenko**, electromechanic of the traction substation Mochagi, Magnitogorsk power supply division, «Transenergo», branch of JSC «Russian Railways»

**Dmitriy V. Lesnikov**, PhD in Engineering, Associate Professor of Transport Power Supply Department, Ural State University of Railway Transport

**Natalya A. Afanasyeva**, PhD in Engineering, Associate Professor of Transport Economics Department, Ural State University of Railway Transport

**Литература**

1. Пышкин А. А., Лесников Д. В. Электроснабжение железных дорог. Екатеринбург : Изд-во УрГУПС, 2023. 507 с.
2. Чернов Ю. А. Электроснабжение электрических железных дорог. Ч. 3. Москва : МИИТ, 2012. 170 с.
3. Система тягового электроснабжения 2×25 кВ / Б. М. Бородулин, И. М. Векслер, В. Е. Марский, И. В. Павлов. Москва : Транспорт, 1989. 247 с.
4. Афанасьева Н. А., Чернышева Л. И. Экономическое обоснование организационно-технических решений в дипломных проектах. Екатеринбург : Изд-во УрГУПС, 2012. 58 с.
5. Унифицированные тяговые подстанции магистральных железных дорог. Электротехнические и строительные решения ОРУ 35, 220 кВ (введены в действие с 30.10.1989 г.). Москва : Министерство путей сообщения СССР, 1989.

**References**

1. Pyshkin A. A., Lesnikov D. V. Power supply of railways [Elektrosnabzhenie zheleznykh dorog]. Ekaterinburg : Publishing House of USURT, 2023. 507 p.
2. Chernov Yu. A. Power supply of electrified railways [Elektrosnabzhenie elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog]. Part 3. Moscow : Publishing House of MIIT, 2012. 170 p.
3. Borodulin B. M., Veksler I. M., Marskiy V. E., Pavlov I. V. Traction power supply system 2×25 kV [Sistema tyagovogo elektrosnabzheniya 2×25 kV]. Moscow : Transport, 1989. 247 p.
4. Afanasyeva N. A., Chernysheva L. I. Economic justification of organizational and technical solutions in graduation projects [Ekonomicheskoe obosnovanie organizatsionno-tekhnicheskikh resheniy v diplomnykh proektakh]. Ekaterinburg : Publishing House of USURT, 2012. 58 p.
5. Unified traction substations of mainline railways. Electrical and construction solutions Open Switchgear 35, 220 kV [Unifitsirovannye tyagovye podstantsii magistral'nykh zheleznykh dorog. Elektrotekhnicheskie i stroitel'nye resheniya ORU 35, 220 kV]. Moscow : Ministry of Railways of the USSR, 1989.

Объем статьи 0,64 авторских листа

Научная статья

УДК 621.316.9:625

## Варианты интегрирования микропроцессорных терминалов защиты и автоматики в цифровую сеть железной дороги

 Павел Сергеевич Пинчуков<sup>1</sup>
<sup>1</sup>Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск, Россия

## Options for integrating microprocessor protection and automation terminals into the digital railway network

 Pavel S. Pinchukov<sup>1</sup>
<sup>1</sup>Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, Russia

### Аннотация

Статья посвящена оценке возможностей интегрирования микропроцессорных терминалов защиты и автоматики в цифровые системы, используемые на железнодорожном транспорте, и разработке вариантов построения локальных вычислительных сетей, адаптированных для совместной работы с микропроцессорными терминалами защиты и автоматики фидеров контактной сети системы тягового электроснабжения 25 кВ, 50 Гц переменного тока. По результатам анализа состава коммутационной аппаратуры на примере действующих тяговых подстанций Дальневосточной железной дороги предложены схемы локальных вычислительных сетей для случаев использования микропроцессорных терминалов защиты и автоматики различных производителей, а также для случаев наличия либо отсутствия штатных серверов и элементов автоматизированных систем управления.

**Ключевые слова:** электроснабжение железных дорог, тяговая подстанция, микропроцессорные устройства релейной защиты, локальная вычислительная сеть, коммутатор, маршрутизатор

### Abstract

The article is devoted to assessing the possibilities of integrating microprocessor terminals of protection and automation into digital systems used in railway transport. The article describes the development of options for building local area networks adapted to work together with microprocessor terminals for protection and automation of feeders in the contact network for the traction power supply system of 25 kV, 50 Hz AC. The results of the analysis of the composition for switching equipment on the example of existing traction substations of the Far Eastern Railway were used to make a conclusion: developing several variants of schemes is important for building a local computer network. Schemes of local computer networks are proposed for the use of microprocessor protection and automation terminals from various manufacturers and for the presence or absence of regular servers and elements of automated control systems.

**Keywords:** railway power supply, traction substation, microprocessor relay protection devices, local area network, switchboard, router

DOI: 10.20291/1815-9400-2024-1-98-104

### ВВЕДЕНИЕ

Повышение экономической эффективности, безопасности и надежности железнодорожного транспорта напрямую связано с бесперебойным функционированием системы тягового электроснабжения (СТЭ) электрифицированных железных дорог. Защиту от коротких замыканий в контактной сети и на других элементах СТЭ выполняют устройства релейной защиты и автоматики (РЗА) [1]. На сети электрифицированных железных дорог применяются РЗА, построенные на различных типах аппаратной базы (электромеханические, микроэлектронные и микропроцессорные). Уже несколько лет на тяговых подстанциях российских железных дорог применяются микропроцессорные устройства защиты и автоматики (МУРЗ), которые не только отвечают за защиту от аварийных и ненормальных режимов, но и способны обеспечить управление оборудованием тяговой подстанции, мониторинг электрических параметров и др. Трендом настоящего времени стало интегрирование МУРЗ в автоматизированные системы управления (АСУ) понизительных подстанций электрифицированных железных дорог [2, 3]. Однако при эксплуатации на тяговых подстанциях возникают проблемы, обусловленные слабой интеграцией МУРЗ в другие используемые на железнодорожном транспорте цифровые системы. Это не позволяет в полной мере реализовать многие полезные функции МУРЗ, такие как возможность удаленного мониторинга параметров присоединений, управление коммутационной аппаратурой, пересылка записей аварийных регистраторов, дистанционное переключение программ уставок и т.п. [4–6].

В России на сети электрифицированных железных дорог переменного тока наибольшее применение нашли микропроцессорные терминалы защиты фидеров контактной сети (ФКС) типа БМРЗ-ФКС, ЦЗА-27,5-ФКС и ИнТер-27,5-ФКС. В частности, на полигоне Дальневосточной железной дороги (ДВЖД) все защиты ФКС главного хода Транссибирской магистрали оснащены именно этими типами защит, преимущественно ИнТер-27,5-ФКС [4]. Однако, как показали исследования на тяговых подстанциях ДВЖД [4], весь функционал, заложенный в эти терминалы, не используется в полном объеме. Из-за различия интерфейсов и протоколов обмена информацией, которые применяются

в МУРЗ, часто возникает проблема их подключения к локальной вычислительной сети (ЛВС) — главному элементу объединения цифровых систем и построения любой цифровой подстанции [7–11]. При отсутствии ЛВС на тяговых подстанциях терминалы могут выполнять только функции защиты и автоматики. При этом невозможен удаленный мониторинг параметров и доступ к терминалам. Как показывает опыт расследования причин возникновения коротких замыканий в контактной сети на ДВЖД, при срабатывании регистратора аварийных событий (РАС) терминала просмотр журнала событий возможен только непосредственно на тяговой подстанции по прибытии оперативного персонала, что не позволяет быстро устанавливать причины возникновения коротких замыканий и ненормальных режимов [4]. Программы уставок на терминалах переключаются тоже только вручную с использованием панели управления. Все это снижает эффективность и надежность работы СТЭ в целом.

В связи с вышесказанным главной целью представленного в статье исследования является рассмотрение возможностей интегрирования микропроцессорных терминалов защиты и автоматики, установленных на тяговых подстанциях, в цифровые системы железных дорог, а также возможностей расширения используемых ими функций.

### ОСОБЕННОСТИ ТЕРМИНАЛОВ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ ФИДЕРОВ КОНТАКТНОЙ СЕТИ

Микропроцессорные терминалы защиты и автоматики представляют собой комплексное решение, включающее в себя микропроцессорное управление, цифровую обработку сигналов и коммуникационные возможности. В зависимости от своего назначения и области применения [10] микропроцессорные терминалы выполняют различные функции и могут применяться для защиты электрооборудования от перегрузок, коротких замыканий и других аварийных ситуаций; управления и контроля работы электрооборудования; мониторинга параметров электрических сетей (таких как напряжение, ток, мощность и т.д.); управления и контроля работы систем автоматизации; обеспечения безопасности и контроля доступа к электрооборудованию; хранения и анализа данных о работе электрооборудования и электрических сетей.

Микропроцессорные терминалы защиты и автоматики обладают широкими коммуникационными возможностями, могут интегрироваться в другие цифровые системы [3, 11]. При этом к схемам подключения МУРЗ к измерительным трансформаторам тока (ТТ) и напряжения (ТН) предъявляется ряд специальных требований (выбор схем подключения терминалов к ТТ и ТН подробно рассмотрен ранее в [12, 13]).

Однако у МУРЗ есть и свои особенности, характеризующие их подключение к цифровым системам. В частности, реализовать подключение терминала БМРЗ-ФКС [14] к цифровым системам, таким как АСУ-ЭЧ, АСУТП и т.д., возможно через интерфейс Ethernet. В зависимости от исполнения этот терминал может подключаться по проводной линии связи через встроенный интерфейс Ethernet 10/100 BASE-TX или же по волоконно-оптической линии связи (ВОЛС) через встроенный интерфейс Ethernet 100 BASE-FX. При использовании интерфейса Ethernet

доступны протоколы информационного обмена 10/100 BASE-TX (Ethernet 100 BASE-FX): MODBUS-TCP, MODBUS-RTU/TCP, ГОСТ Р МЭК 60870-5-104-2004, МЭК 61850 (MMS, GOOSE), что показывает очень высокий уровень коммуникационных возможностей терминалов БМРЗ [15, 16]. Подключить эти терминалы можно также через интерфейс RS-485, что расширяет спектр объектов, где они могут использоваться.

Подключение микропроцессорных терминалов ИнТер-27,5-ФКС (или ЦЗА) производства ООО «НИИЭФА-ЭНЕРГО» к сети передачи данных в основном осуществляется по интерфейсу RS-485. Интерфейс Ethernet (10/100 BASE-TX) присутствует в терминале ИнТер-27,5-ФКС-825, но этот терминал предназначен для защиты и автоматики фидеров постоянного тока напряжением 825 В тяговых подстанций метрополитена. Данные терминалы имеют только два интерфейса RS-485 для включения их в ЛВС с базовым протоколом MODBUS.

Анализ цифровых систем, применяемых на тяговых подстанциях Дальневосточной дирекции по энергообеспечению СП Трансэнерго — филиала ОАО «РЖД», показал, что все ФКС, питающие межподстанционные зоны главного хода Транссибирской магистрали, полностью оснащены микропроцессорными терминалами защиты и автоматики [4]. Однако при этом на большинстве тяговых подстанций ДВЖД отсутствуют ЛВС. Серверы и минимальная ЛВС, играющие роль верхнего уровня АСУ, установлены только на нескольких тяговых подстанциях. С помощью таких серверов обслуживающий персонал контролирует параметры присоединений тяговой подстанции, но не может управлять оборудованием. На части подстанций серверы неисправны и выведены из эксплуатации. К тому же на некоторых подстанциях установлены терминалы ИнТер-27,5-ФКС, которые в отличие от терминалов БМРЗ оснащены только интерфейсом RS-485 и не способны без дополнительного оборудования интегрироваться в ЛВС с интерфейсом Ethernet, что ограничивает возможности их использования в современных АСУ. Поэтому при интегрировании МУРЗ в существующие цифровые системы необходимо дополнительно предусматривать устройства для преобразования протоколов обмена информации. В связи с перечисленными проблемами формирование ЛВС для каждой тяговой подстанции становится практически уникальной задачей. В нашем исследовании в качестве еще одной цели рассматривалась возможность предоставления удаленного доступа к терминалам МУРЗ с автоматизированного рабочего места (АРМ), установленного в помещении Дорожной электротехнической лаборатории ДВЖД (ДЭЛ).

В ходе исследований было разработано четыре варианта компоновки ЛВС и оборудования с учетом реальной оснащенности отдельных тяговых подстанций терминалами и другим сетевым оборудованием. Рассмотрим их подробнее.

**Вариант № 1. Схема ЛВС подстанции с использованием терминалов БМРЗ при наличии сервера** (рис. 1). Если на тяговой подстанции уже имеются терминалы БМРЗ и был установлен сервер, удовлетворяющий условиям ПК WebScadaMT, подстанцию можно условно разделить на два уровня управления: первый — уровень присоединений, второй — уровень подстанции. На первом уровне находятся терминалы БМРЗ и блок корректировки времени. На втором уровне расположены шина



подстанции, состоящая из коммутаторов, а также сервер, маршрутизатор и каналообразующая аппаратура. В данном случае вся каналообразующая аппаратура встроена в маршрутизатор в виде трансивера, обеспечивающего передачу данных через оптоволокно. Все устройства в ЛВС подключаются к коммутатору. По используемой аппаратуре и ее техническим характеристикам, а также по поддержке стандартов этот вариант обладает большим потенциалом для построения полноценной цифровой подстанции, в частности, благодаря наличию резервной шины подстанции. Как видно из рис. 1, со стороны ДЭЛ маршрутизатор подключается к коммутатору организации, к сети которой подключен компьютер (АРМ) для удаленного мониторинга SCADA-системы на подстанции.

**Вариант № 2. Схема ЛВС подстанции с использованием терминалов БМРЗ при отсутствии сервера** (рис. 2). В случае отсутствия подходящего сервера на подстанции можно рассмотреть вариант установки стандартного шкафа автоматизированной системы управления от производителя терминалов БМРЗ — компании НТЦ «Механотроника».

В схеме шкафа ШАСУ-МТ [17] уже предустановлены коммутаторы, сервер точного времени и канал связи с верхним уровнем управления. Помимо этого в нем может быть реализован резервный канал связи с верхним уровнем посредством GSM/GPRS-антенны. Терминалы БМРЗ подключаются непосредственно к шкафу ШАСУ-МТ через Ethernet или RS-485. Трансиверы в ретрансляторах и маршрутизаторе подбираются по условиям совместимости и характеристикам ВОЛС системы передачи данных (СПД).

Если в эксплуатации на тяговых подстанциях находятся терминалы типа ИнТер-27,5-ФКС (ЦЗА) производства ООО «НИИЭФА-ЭНЕРГО», ЛВС должна создаваться только под интерфейс передачи данных RS-485. При этом можно упростить некоторое оборудование ЛВС, например, отказаться от PRP-резервирования. В данном случае модульный коммутатор использовать не будет, и его можно заменить на коммутатор РТ-510-ММ-LC-HV производства компании МОХА [18], также поддерживающий стандарт МЭК 61850. Коммутатор управляемый, имеет 8 пор-

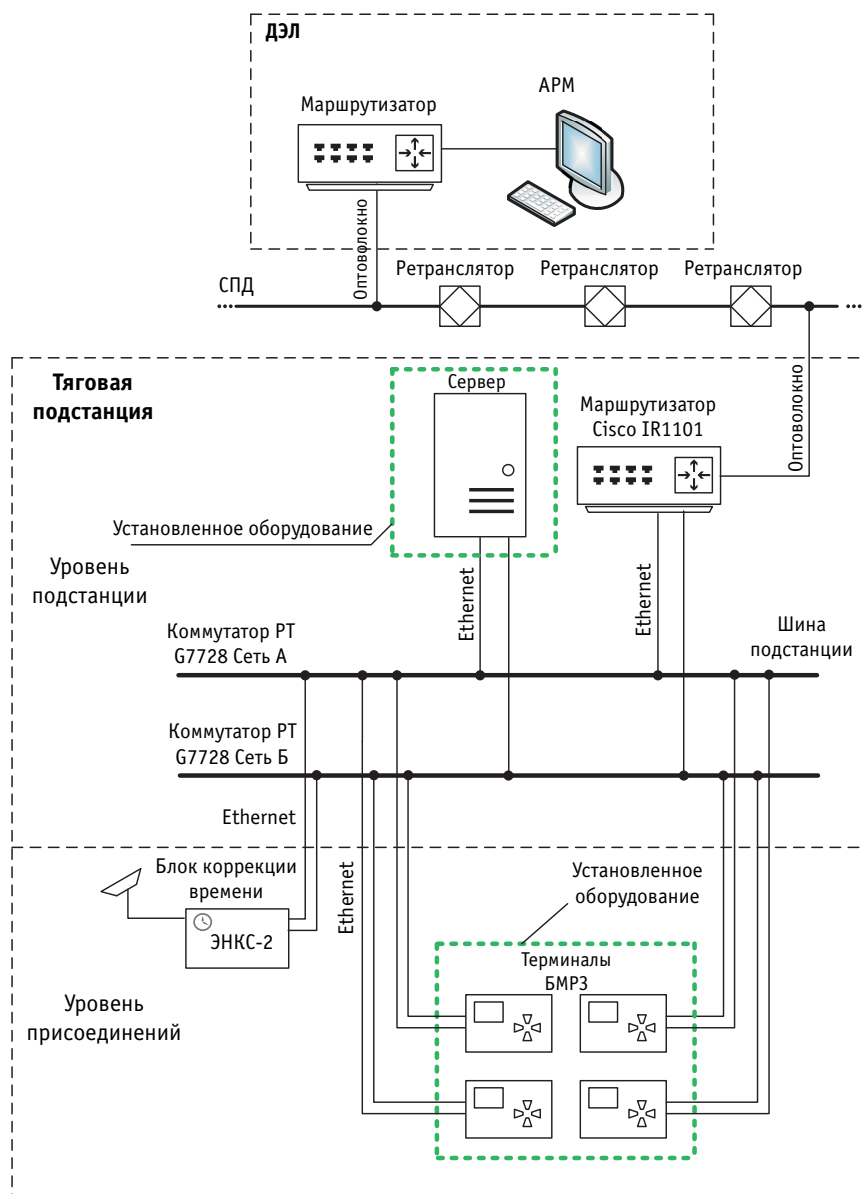


Рис. 1. Структурная схема ЛВС тяговой подстанции при наличии терминалов БМРЗ и сервера

тов 10/100BaseTX, 2 порта 100BaseFX и протоколы резервирования STP/RSTP, MSTP, Turbo Ring v1/v2, Turbo Chain, Link Aggregation. В ЛВС для обеспечения резервирования RSTP можно применять несколько таких коммутаторов.

Следует отметить, что ООО «НИИЭФА-ЭНЕРГО» является производителем собственной SCADA-системы. Программное обеспечение, выполненное на основе специализированной SCADA-АКТМУ с функциями оперативного управления и сервера диагностики и мониторинга, предустановлено в шкафу управления подстанцией

(ШУП) [19]. В данном оборудовании используются протоколы обмена MODBUS, МЭК 60870-5-103/104 или MODBUS TCP/IP. Так как терминалы ИнТер-27,5-ФКС имеют только интерфейс RS-485, для их взаимодействия с коммутаторами подстанции следует преобразовать RS-485 в Ethernet. Эту задачу способны выполнить специальные преобразователи (конвертеры), например преобразователь NPORT IA5150A производства МОХА [20]. Это устройство имеет два порта Ethernet и один последовательный порт, выполненный как COM-порт и клеммная колодка.

**Вариант № 3. Схема ЛВС подстанции с использованием терминалов ИнТер-27,5-ФКС при наличии сервера** (рис. 3). Рассматривается тяговая подстанция, на которой уже эксплуатируются терминалы ИнТер-27,5-ФКС и установлен сервер. В связи с тем что SCADA-система от «НИИЭФА-ЭНЕРГО» не может устанавливаться на базовые серверы подстанций, SCADA-система должна быть разработана отдельно специалистами АСУТП. Терминалы ИнТер-27,5-ФКС последовательно подключаются к преобразователю интерфейсов, после чего идет подключение к коммутатору через Ethernet. На схеме рис. 3 представлен только один коммутатор, но возможно построение ЛВС из нескольких коммутаторов при реализации протоколов резервирования. Также для оперативного взаимодействия с сетью и терминалами в ЛВС тяговой подстанции можно встроить АРМ.

**Вариант № 4. Схема ЛВС подстанции с использованием терминалов ИнТер-27,5-ФКС при отсутствии сервера** (рис. 4). В данном случае на тяговой подстанции устанавливается шкаф управления подстанцией производства

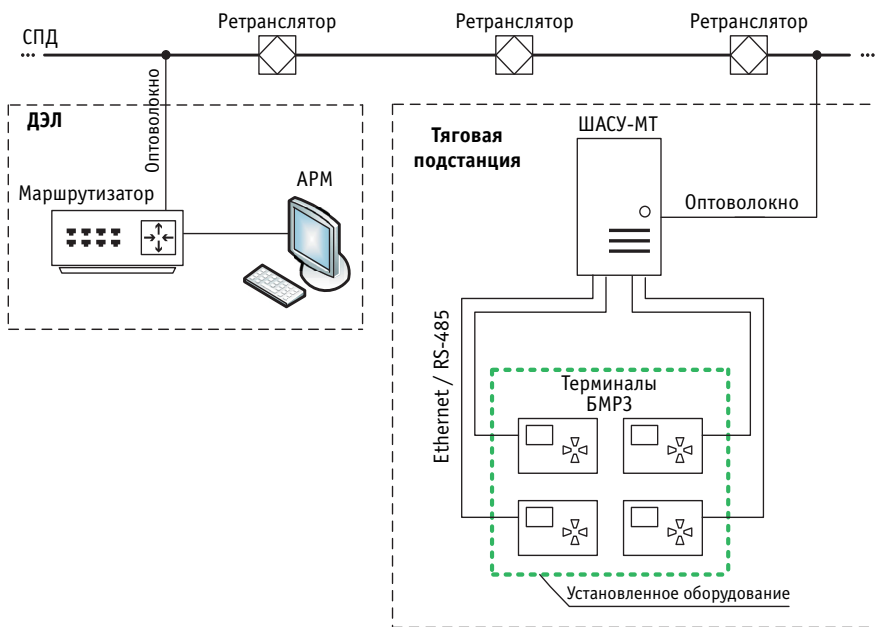


Рис. 2. Структурная схема ЛВС подстанции при наличии терминалов БМРЗ и отсутствии сервера

«НИИЭФА-ЭНЕРГО», к которому подключаются терминалы ИнТер-27,5-ФКС. ШУП уже имеет преобразователи интерфейсов, коммутаторы, два компьютера, вывод на

верхний уровень и другое необходимое оборудование, что полностью удовлетворяет требованиям к аппаратуре коммуникации уровня подстанции.

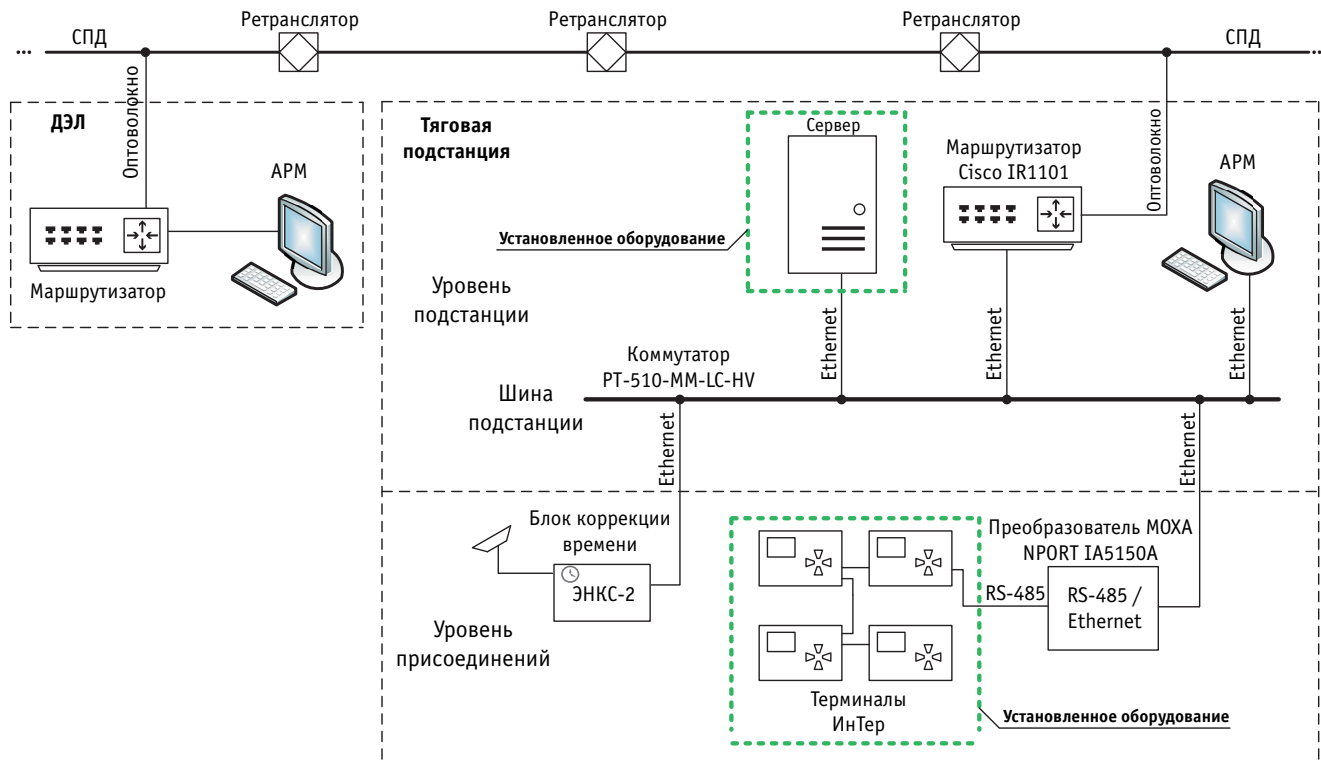


Рис. 3. Структурная схема ЛВС подстанции при наличии терминалов ИнТер-27,5-ФКС и сервера

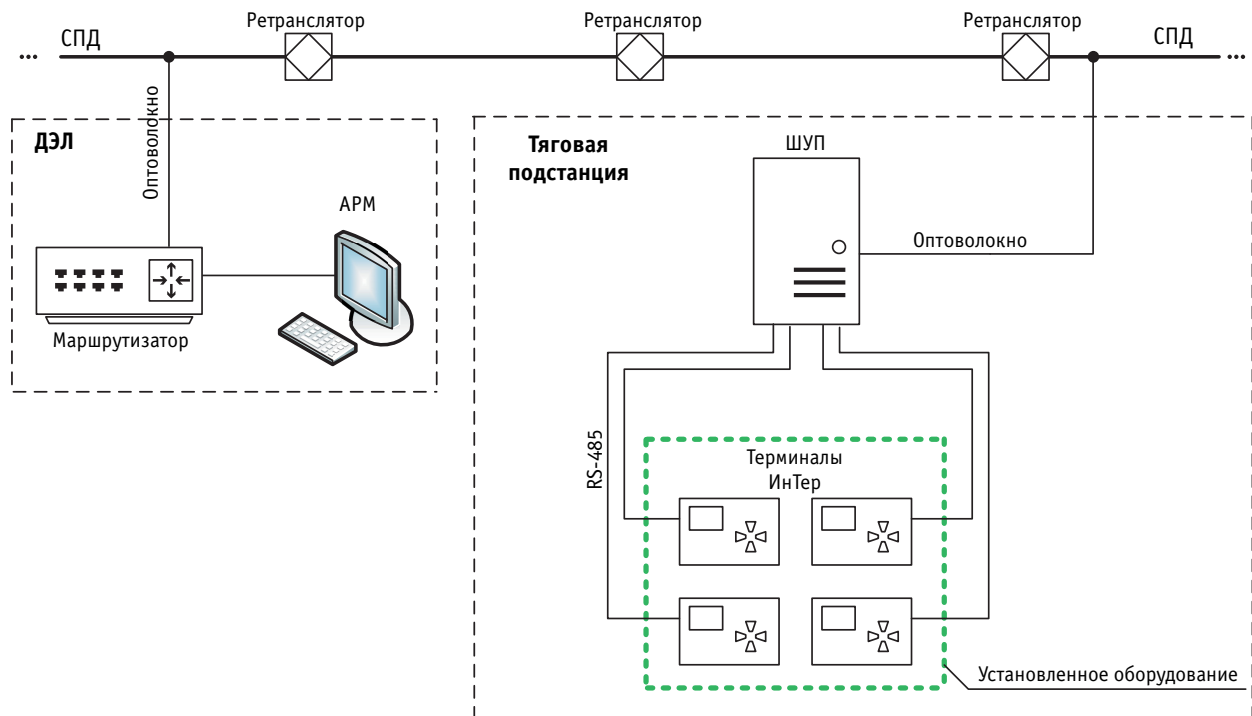


Рис. 4. Структурная схема ЛВС подстанции при наличии терминалов Интер-27,5-ФКС и отсутствии сервера

Также во всех четырех вариантах должна предусматриваться каналобразующая аппаратура, которая позволит обеспечить передачу данных между ДЭЛ и тяговыми подстанциями, расположенными по плечам дистанции электроснабжения, расстояние которых составляет более 200 км.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, результаты исследования позволяют сделать следующие выводы.

1. Терминалы МУРЗ ФКС от различных производителей поддерживают разные интерфейсы и протоколы передачи данных для подключения к локальным вычислительным сетям, что требует различного состава оборудования ЛВС.

2. Исходя из перечня оборудования действующих тяговых подстанций ДВЖД возможны четыре варианта реализации ЛВС:

первый вариант — технически хорошо развитая локальная вычислительная сеть, на базе которой можно реализовать цифровую тяговую подстанцию. Оборудование, используемое в этом случае, изготавливается для промышленных целей и мо-

жет применяться на электрических подстанциях с обменом информацией по стандарту МЭК 61850;

третий вариант во многом схож с первым, однако используемая в нем аппаратура проще и дешевле, а по уровню надежности схема первого варианта выигрывает благодаря PRP-резервированию;

второй и четвертый варианты предусматривают установку шкафов АСУ ТП, которые уже содержат коммутационную аппаратуру. Шкаф ШАСУ-МТ от НТЦ «Механотроника» или ШУП от ООО «НИИЭФА-ЭНЕРГО» эксплуатируются совместно с терминалам БМРЗ-ФКС или Интер-27,5-ФКС соответственно.

3. Интеграция в цифровые системы, применяемые на железнодорожном транспорте, и подключение к СПД позволит полноценно использовать терминалы МУРЗ и, как следствие, совершенствовать работу персонала, обслуживающего системы РЗА на тяговых подстанциях.

*Работа поддержана персональным грантом ОАО «РЖД» на развитие научно-педагогических школ железнодорожного транспорта № 4663593 от 27.12.2021 г., утвержденным на 2022–2023 гг.*

### Сведения об авторе:

**Павел Сергеевич Пинчуков**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Системы электроснабжения» Дальневосточного государственного университета путей сообщения

### Author's information:

**Pavel S. Pinchukov**, PhD in Engineering, Associate Professor of Power Supply Systems Department, Far Eastern State Transport University

## Литература

1. Фигурнов Е. П. Релейная защита. Москва : УМЦ ЖДТ, 2009. 210 с.
2. Shah V. Protection — Evolution, Technologies and Trends // *Power Research — A Journal of CPRI*. 2022. 17 (2). Pp. 89–95.
3. Кондратьев Ю. В., Незевак В. Л., Эрбес В. В. Концепция развития цифровой тяговой подстанции // *Разработка и эксплуатация электротехнических комплексов и систем энергетики и наземного транспорта*. Омск : Изд-во ОмГУПС, 2018. С. 13–20.
4. Костин А. П., Пинчуков П. С. Анализ функционирования устройств определения места повреждения на участках Дальневосточной железной дороги // *Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке*. 2022. Т. 2. С. 38–42.
5. Pinchukov P., Makasheva S. Improving Methods for Reliability Assessment of Electric Power Systems // *Proceedings of International Scientific Conference Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport, EMMFT 2017*. Cham : Springer. 2018. Vol. 692. P. 162–169. DOI: 10.1007/978-3-319-70987-1\_17.
6. Макашева С. И., Пинчуков П. С. Расчет показателей надежности цифровой подстанции // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика*. 2019. Т. 19. № 4. С. 41–51. DOI: 10.14529/power190405.
7. Опыт реализации подсистемы телемеханики цифровой подстанции / И. Н. Боченков, Д. С. Доброхотов, И. С. Негодин, А. В. Трофимов // *Электрические станции*. 2023. № 4. С. 36–39. DOI: <http://dx.doi.org/10.34831/EP.2023.1101.4.006>.
8. Андрианова Л. П., Павлова Зухра Хасановна, Хакимьянов Марат И., Хазиева Регина Т. Основы построения цифровых подстанций в рамках концепции «Цифровая трансформация 2030» // *II Всероссийский педагогический форум*. Петрозаводск : Новая наука, 2020. С. 348–360.
9. Пинчуков П. С., Макашева С. И., Костин А. П. Повышение эффективности работы релейной защиты при цифровизации железной дороги // *Проблемы транспорта Дальнего Востока*. 2019. Т. 1. С. 275–277.
10. Тасенко А. А., Игнатъев И. В. Принципы построения микропроцессорных устройств релейной защиты // *Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки*. 2020. Т. 1. С. 36–41.
11. Пузина Е. Ю. Сравнительный анализ оборудования уровня процесса для цифровой тяговой подстанции // *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование*. 2021. № 2 (70). С. 92–104. DOI: 10.26731/1813-9108.2021.2(70).92-104.
12. Пинчуков П. С. Исследование вариантов подключения микропроцессорных терминалов защит тяговых подстанций // *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование*. 2021. № 4 (72). С. 87–95. DOI: 10.26731/1813-9108.2021.4(72).87-95.
13. Пинчуков П. С., Макашева С. И., Мамаев А. Р. Оценка надежности перспективных схем подключения микропроцессорных систем релейной защиты тяговой сети переменного тока // *Электроника и электрооборудование транспорта*. 2021. № 1. С. 35–39.
14. Блок микропроцессорный релейной защиты БМРЗ-ФКС-01. Руководство по эксплуатации. Ч. 2. ДИВГ.648228.082-14.01 РЭ1. URL: <https://www.mtrele.ru/files/filedoc/releynaya-zashita/bmrz-gd/bmrz-fks-01.pdf> (дата обращения: 07.07.2023).

## References

1. Figurnov E. P. Relay protection [Releynaya zashhita]. Moscow : UMTs ZhDT, 2009. 210 p.
2. Shah V. Protection — Evolution, Technologies and Trends. *Power Research — A Journal of CPRI*. 2022. 17 (2). Pp. 89–95.
3. Kondratyev Yu. V., Nezevak V. L., Erbes V. V. The concept of development of a digital traction substation [Kontseptsiya razvitiya tsifrovoy tyagovoy podstantsii]. *Development and operation of electrotechnical complexes and systems of power engineering and land transport*. Omsk : Publishing House of OSTU, 2018. Pp. 13–20.
4. Kostin A. P., Pinchukov P. S. Analysis for the functioning of damage location detection devices on sections of the Far Eastern Railway [Analiz funktsionirovaniya ustroystv opredeleniya mesta povrezhdeniya na uchastkakh Dal'nevostochnoy zheleznoy dorogi]. *Scientific, technical and economic cooperation of the Asia-Pacific countries in the XXI century*. 2022. Vol. 2. Pp. 38–42.
5. Pinchukov P., Makasheva S. Improving Methods for Reliability Assessment of Electric Power Systems. *Proceedings of International Scientific Conference Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport, EMMFT 2017*. Cham : Springer. 2018. Vol. 692. Pp. 162–169. DOI: 10.1007/978-3-319-70987-1\_17.
6. Makasheva S. I., Pinchukov P. S. Digital substation reliability evaluation [Raschet pokazateley nadezhnosti tsifrovoy podstantsii]. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Power Engineering*. 2019. Vol. 19. No. 4. Pp. 41–51. DOI: 10.14529/power190405.
7. Bochenkov I. N., Dobrokhoto D. S., Negodin I. S., Trofimov A. V. Experience in implementing the telemechanics subsystem of a digital substation [Opyt realizatsii podsistemy telemekhaniki tsifrovoy podstantsii]. *Electric stations*. 2023. No. 4. Pp. 36–39. DOI: <http://dx.doi.org/10.34831/EP.2023.1101.4.006>
8. Andrianova L. P., Pavlova Zuhra Khasanovna, Khakimjanov Marat I., Khazieva Regina T. Basics of building digital substations within the framework of the «Digital transformation 2030 concept» [Osnovy postroeniya tsifrovyykh podstantsiy v ramkakh kontseptsiy «Tsifrovaya transformatsiya 2030»]. *II All-Russian pedagogical forum*. Petrozavodsk : New Science, 2020. Pp. 348–360.
9. Pinchukov P. S., Makasheva S. I., Kostin A. P. Increasing the relay protection effectiveness in via railway digitalization [Povyshenie effektivnosti raboty releynoy zashhity pri tsifrovizatsii zheleznoy dorogi]. *Transport problems of The Far East*. 2019. Vol. 1. Pp. 275–277.
10. Tsenko A. A., Ignatyev I. V. Principles of construction for microprocessor relay protection devices [Printsipy postroeniya mikroprotsessornykh ustroystv releynoy zashhity]. *Proceedings of the Bratsk State University. Series: Natural and Engineering Sciences*. 2020. Vol. 1. Pp. 36–41.
11. Puzina E. Yu. Comparative analysis of the technological equipment for the digital traction substation [Srvnitel'nyy analiz oborudovaniya urovnya protsesssa dlya tsifrovoy tyagovoy podstantsii]. *Modern technologies. System analysis. Modeling*. 2021. No. 2 (70). Pp. 92–104. DOI: 10.26731/1813-9108.2021.2(70).92-104.
12. Pinchukov P. S. Microprocessor protection terminals of traction substations: Study of connection variants [Issledovanie variantov podklyucheniya mikroprotsessornykh terminalov zashhit tyagovyykh podstantsiy]. *Modern technologies. System analysis. Modeling*. 2021. No. 4 (72). Pp. 87–95. DOI: 10.26731/1813-9108.2021.4(72).87-95.
13. Pinchukov P. S., Makasheva S. I., Mamaev A. R. Reliability estimation of perspective microprocessor relay protection connecting schemes for AC traction network [Otsenka nadezhnosti perspektivnykh skhem podklyucheniya mikroprotsessornykh sistem releynoy zashhity tyagovoy seti perezmennogo toka]. *Electronics and electrical equipment of transport*. 2021. No. 1. Pp. 35–39.
14. BMRZ microprocessor relay protection unit BMRZ-FKS-01. Application guide. Part 2 [Blok mikroprotsessorny releynoy zashhity BMRZ-FKS-01. Rukovodstvo po ekspluatatsii]. URL: <https://www.mtrele.ru/files/filedoc/releynaya-zashita/bmrz-gd/bmrz-fks-01.pdf> (access date: 07.07.2023).

15. Андреев А., Хусаинов Р. Применение стандарта МЭК-61850 в микропроцессорных терминалах релейной защиты и автоматики // Силовая электроника. 2020. № 2 (83). С. 60–63.
16. A New Distance Protection Scheme Based on Improved Virtual Measured Voltage / Y. Liang, W. Li, Z. Lu [et al.] // IEEE Transactions on Power Delivery. 2019. 35 (2). Pp. 774–786. doi:10.1109/TPWRD.2019.2926295.
17. Шкаф автоматизированной системы управления. НТЦ «Механотроника». URL: <https://www.mtrele.ru/shop/shkafyi-asu-tp-i-aiis-kue/asu/shasu-mt.html> (дата обращения: 25.07.2023).
18. Коммутатор РТ-510-ММ-ЛС-НВ. МОХА. URL: <https://moxa.ru/shop/ethernet/powertrans/pt-500/pt-510/pt-510-mm-lc-hv/> (дата: обращения 25.07.2023).
19. Шкаф управления подстанцией. URL: [http://www.nfenergo.ru/rus\\_product.html?itemid=80](http://www.nfenergo.ru/rus_product.html?itemid=80) (дата обращения: 25.07.2023).
20. Преобразователь NPORT IA5150A. МОХА. URL: [https://moxa.ru/shop/com\\_v\\_ethernet/industrial/ia\\_5000a/nport-ia5150a/](https://moxa.ru/shop/com_v_ethernet/industrial/ia_5000a/nport-ia5150a/) (дата обращения: 25.07.2023).

Объем статьи 0,88 авторских листа

Научная статья  
УДК 624.046.5

## Оценка напряженно-деформированного состояния железобетонной опоры, подверженной электрической коррозии, при помощи моделирования

Алексей Анатольевич Ковалев<sup>1</sup>, Александр Владимирович Окунев<sup>1</sup>,  
Александр Викторович Паранин<sup>1</sup>, Михаил Станиславович Чепижко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Уральский государственный университет путей сообщения, Екатеринбург, Россия

## Assessment of the crisis-deformed state of reinforced concrete supports electrically corroded by means of simulation

Alexey A. Kovalev<sup>1</sup>, Alexander V. Okunev<sup>1</sup>, Alexander V. Pararin<sup>1</sup>, Mikhail S. Chepizhko<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ural State University of Railway Transport, Ekaterinburg, Russia

### Аннотация

В статье предложена модель напряженно-деформированного состояния железобетонной опоры контактной сети с учетом влияния электрической коррозии на диаметр стальной арматуры. Модель учитывает потерю массы металлической арматуры на разной глубине от уровня грунта и позволяет задавать различные горизонтальные и вертикальные нагрузки.

По результатам моделирования получены данные, характеризующие распределение напряжений по Мизесу и пластическую деформацию на поверхности опоры в зависимости от остаточной массы арматуры и прилагаемой силы. При помощи предлагаемой модели установлена связь места коррозионного повреждения арматуры с напряжением и деформацией на опоре, дано заключение о причинах возникновения деформации опоры.

**Ключевые слова:** контактная сеть, железобетонная опора, арматура, электрическая коррозия, напряжение по Мизесу, Comsol Multiphysics

### Abstract

The article proposes a model of the stress-strain state of a reinforced concrete support of a contact network taking into account the influence of electrical corrosion of steel reinforcement. The model takes into account the weight loss of metal reinforcement at different depths from the ground level and allows setting different horizontal and vertical loads.

According to modeling results data of stress distribution according to Mises were obtained characterizing plastic deformation on the surface of the support depending on the residual weight of the reinforcement and the applied force. By using the proposed model a connection between stress and deformation with the location of corrosion damage to the reinforcement has been established and the reasons leading to the deformation of the support have been established.

**Keywords:** contact network, reinforced concrete support, reinforcement, electrical corrosion, stress distribution according to Mises, Comsol Multiphysics

DOI: 10.20291/1815-9400-2024-1-105-109

### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Основной тип опор, эксплуатируемых на железных дорогах России, — железобетонные (например, на Свердловской железной дороге их насчитывается 85 тыс., или 84 % от общего количества опор). Однако при использовании таких опор на участках, питаемых от системы тягового электроснабжения постоянного тока 3 кВ, возникают проблемы, обусловленные электрической коррозией арматуры [1].

Электрической коррозии арматуры в подземной части подвержены опоры с пробитым заземляющим устройством, металлическим контактом арматуры с закладной деталью и установленные в анодных и знакопеременных зонах [2], т.е. в зонах с преобладанием положительного потенциала на участке цепи «рельс — земля».

Это приводит к тому, что железобетонные опоры длительное время могут находиться под воздействием положительного потенциала «рельс — земля» [3] и, как следствие, под влиянием токов утечки, величина которых в большей степени зависит от пропускной способности участка (чем она больше, тем выше ток и тем быстрее будет протекать электрическая коррозия).

Процесс электрической коррозии приводит к потере массы арматуры в подземной части опоры и к образованию трещин на поверхности бетона [1, 4, 5]. Это снижает несущую способность опоры и может вызвать отказы в виде излома или падения конструкции (рис. 1).

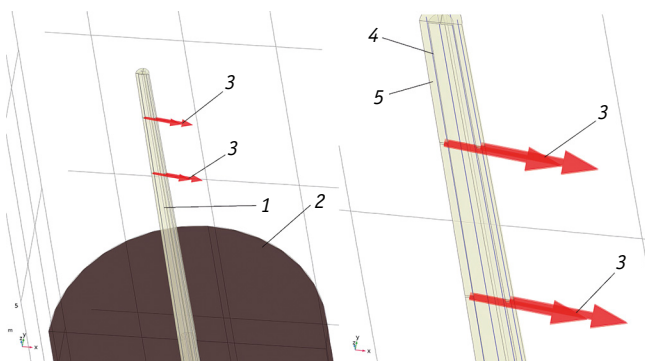
### ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

В программном комплексе Comsol Multiphysics создана модель железобетонной опоры контактной сети высотой 13,6 м, помещенной в грунт на глубине 4 м, с приложенными к ней горизонтальной и вертикальной силами в месте установки закладных деталей (рис. 2). Грунт в модели задан глубиной 7 м и радиусом 2 м вокруг опоры. Между опорой и грунтом установлен механический контакт. Учитывая симметрию задачи, модель рассматривается в разрезе с соответствующими установленными граничными условиями.





**Рис. 1. Падение анкерной опоры вследствие электрической коррозии арматуры**



**Рис. 2. Общий вид модели в разрезе:**  
1 — железобетонная опора; 2 — грунт;  
3 — направление силы; 4 — бетон; 5 — арматура

При моделировании горизонтальная сила принята статической и задана в пределах от 1000 до 5000 Н с шагом 2000 Н в направлении поперек оси пути. Вертикальная сила на каждом шаге расчета принята равной 3000 Н. Для каждого значения горизонтальной силы определена величина изгибающего момента на уровне условного обреза фундамента (УОФ): именно эта величина задается в качестве нормативной несущей способности у каждой марки стойки опоры [6].

В качестве материалов, из которых выполнена модель опоры, применялись:

бетон (плотность 2385 кг/м<sup>3</sup>, прочность на сжатие 39 МПа, модуль Юнга 32500 МПа);

арматура диаметром 10 мм из стали (модуль Юнга 200000 МПа, временное сопротивление разрыву 590 МПа, предел текучести 395 МПа);

грунт (сцепление 1 МПа, модуль Юнга 100 МПа, плотность 1100 кг/м<sup>3</sup>).

Поскольку упругопластическая модель деформации бетона характеризуется нелинейной зависимостью между напряжениями и деформациями и разной сопротивляемостью на сжатие и растяжение [7], в расчетах применялся критерий прочности Уиллама — Варнке. В качестве арматуры принята сталь с упругой деформацией. Общая упругая деформация определялась законом Гука. Грунт имеет упругопластическую деформацию и описывается критерием прочности Друкера — Прагера.

Так как размеры арматуры намного меньше, чем геометрические размеры бетонной конструкции [8], что затрудняет построение сетки и проведение расчетов, для моделирования арматура выполнялась в виде одномерных стержней типа truss. Геометрия бетона и грунта выполнена в виде трехмерных тел типа solid.

При формировании модели большой интерес представляет изучение воздействия электрической коррозии арматуры на железобетонные опоры. Подробнее необходимо рассмотреть напряженно-деформированное состояние опоры в зависимости от изменения массы арматуры.

Снижение массы металла в подземной части опоры моделировалось изменением диаметра арматуры на глубине 0–30 и 60–90 см от УОФ. Напряженно-деформированное состояние оценивалось при помощи расчета напряжений по Мизесу на опоре, арматуре и их изменений в зависимости от состояния арматуры.

Особенность предложенной модели заключается в том, что ее расчет дает информацию о пределе разрушения материала путем сравнения полученного напряжения с допустимым, причем возникающие напряжения на бетонной поверхности опоры будут по-разному на нее влиять. Поэтому необходимо рассмотреть давление, возникающее в опоре, а затем сопоставить его распределение с распределением в опоре механического напряжения. Так как на опору в разных точках одновременно действуют растягивающее и сжимающее напряжения, то при оценке возникающего напряжения необходимо прежде всего определить, где происходит растяжение и сжатие опоры, потому что бетон относится к хрупким материалам [8], т.е. предел его текучести невысокий (5–10 % от предела на сжатие).

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Результатами моделирования являются расчет распределения напряжений по Мизесу, давление и пластическая деформация, возникающие на опоре в зависимости от остаточной массы арматуры. Распределение механического напряжения в опоре при горизонтальной нагрузке 3000 Н (момент на УОФ 24 кН·м) и глубине коррозии на 0–30 см от уровня грунта по-



казано на рис. 3. Исходя из расчетных значений можно сделать вывод, что максимальное напряжение в стенках железобетонной опоры сосредоточено между отверстием под закладные детали и областью, близкой к поверхности грунта.

Максимальное напряжение распределено вблизи условного обреза фундамента. Следует также отметить возникновение напряжения на нижней части опоры, находящейся в грунте, что объясняется вертикальной реакцией грунта на торце опоры. Поэтому в дальнейшем будем рассматривать часть опоры в области условного обреза фундамента.

Как видно из рис. 4, на котором показано распределение давления в опоре при горизонтальной нагрузке 3000 Н (момент на УОФ 24 кН·м) и 5000 Н (момент на УОФ 40 кН·м), есть отрицательное и положительное давление, что соответствует растягивающему и сжимающему напряжению. С возрастанием нагрузки не только происходит увеличение давления, но и расширяется область растяжения.

Сравнение величин напряжений и их распределений при одинаковых нагрузках, возникающих на опоре и арматуре с учетом электрической коррозии, показало следующее.

При моделировании таких условий, как потеря массы арматуры от 0 до 90 %, коррозия на глубине 0–30 см от уровня грунта и нагрузка 3000 Н, напряжение на опоре возрастает от 4,19 до 4,24 МПа и сосредоточено в области условного обреза фундамента на диаметрально противоположных стенках опоры.

Максимальное напряжение возникает при коррозионном повреждении на уровне 0–30 см и достигает 3,54 МПа. Зависимость максимального напряжения в зоне растяжения от коррозионного повреждения на различной глубине показана на рис. 5.

Напряжение на арматуре находится в пределах от 18,4 до 19,4 МПа при коррозии на глубине 0–30 см. В случае коррозионных повреждений, которые находятся глубже, напряжение снижается и независимо от величины повреждения не изменяется.

В результате воздействия на опору механической нагрузки возникает деформация, и область ее распределения изменяется в зависимости от сте-

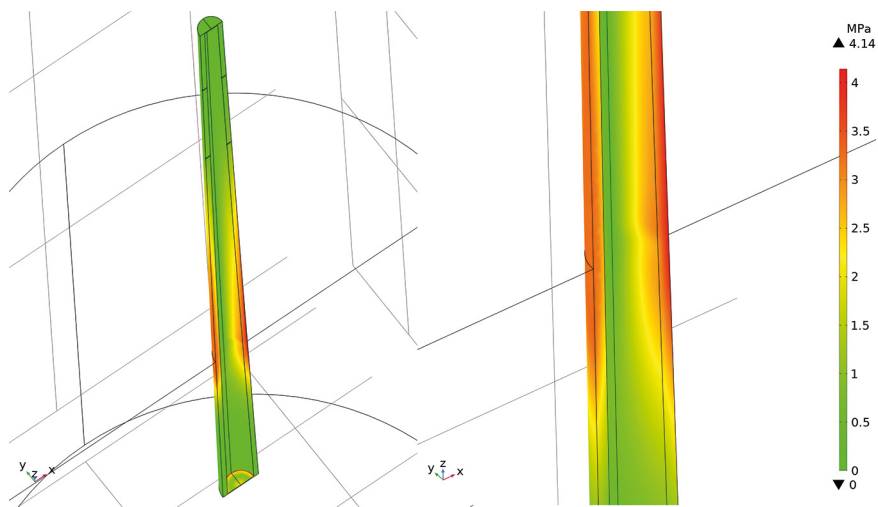


Рис. 3. Результат расчета механического напряжения в теле опоры

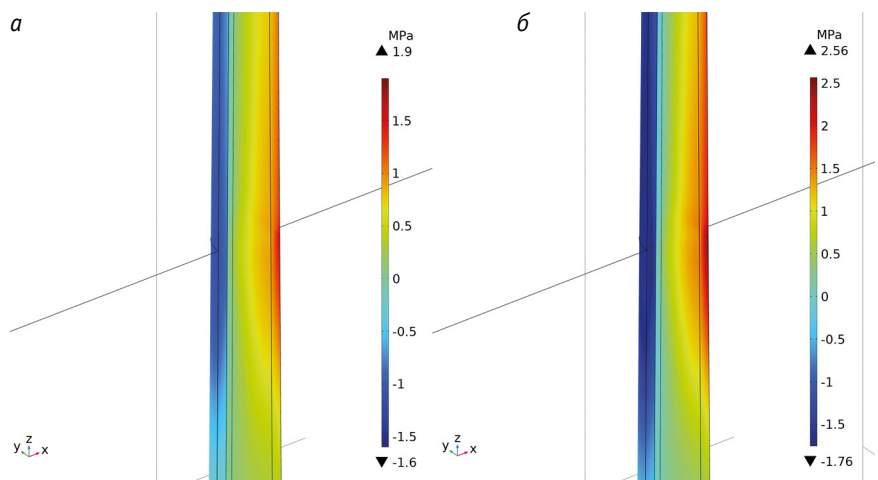


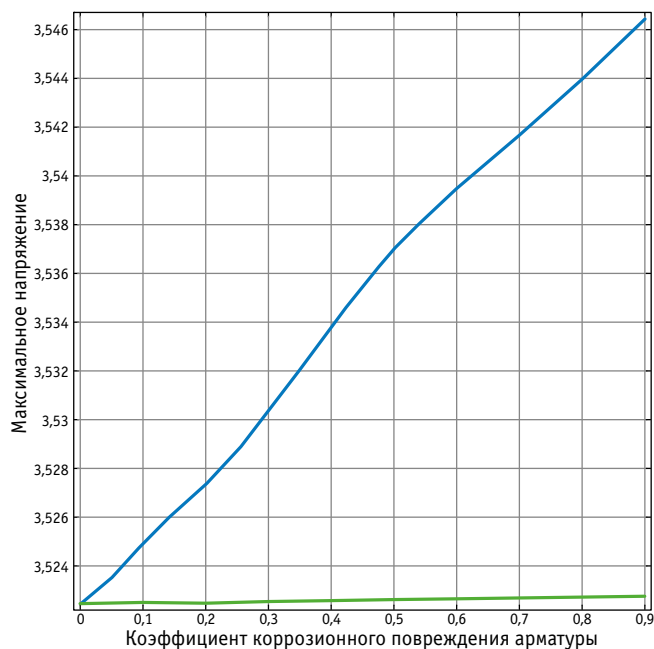
Рис. 4. Распределение давления в теле опоры при горизонтальной нагрузке 3000 Н (а) и 5000 Н (б)

пени электрической коррозии арматуры (в модели задается уменьшением диаметра арматуры).

При нагрузке 3000 Н (момент на УОФ 24 кН·м) появляется область пластической деформации бетона на уровне условного обреза фундамента опоры, вызванная растяжением [6, 9, 10] и расположенная в зоне с отрицательным давлением в теле опоры. На рис. 6 показана зависимость площади пластической деформации на уровне УОФ от электрической коррозии арматуры на различной глубине. Если коррозионное повреждение находится в области УОФ, то при снижении массы арматуры в подземной части площадь максимальной деформации бетона увеличивается.

## ВЫВОДЫ

В результате моделирования установлено, что на железобетонных опорах контактной сети при электрической коррозии арматуры возрастает механическое напряжение и появляется пластическая деформация, особенно в области УОФ. Однако в зависимости от вида возникающего напряжения сжатия или растяжения железобетонная опора будет воспринимать его по-разному. Пластическая деформация начинает появляться на стенке, где из-за малого значения текучести бетона действует растягивающее напряжение. При электрической коррозии объем и величина области пластической деформации увеличиваются в зависимости от снижения массы металла арматуры.



**Рис. 5. Зависимость максимального напряжения в зоне растяжения от коррозионного повреждения на различной глубине при нагрузке 3000 Н:**

— коррозийное повреждение на глубине 0–30 см;  
— коррозийное повреждение на глубине 60–90 см

Согласно моделированию, при коррозионном повреждении на уровне 0–30 см от поверхности УОФ напряжение в зоне растяжения на 0,5 % больше, чем при коррозии на уровне от 60–90 см от поверхности УОФ. Кроме того, установлено, что чем глубже находится участок коррозии, тем меньше изменяется напряжение. Однако площадь пластической деформации на уровне УОФ увеличивается на 82 %.

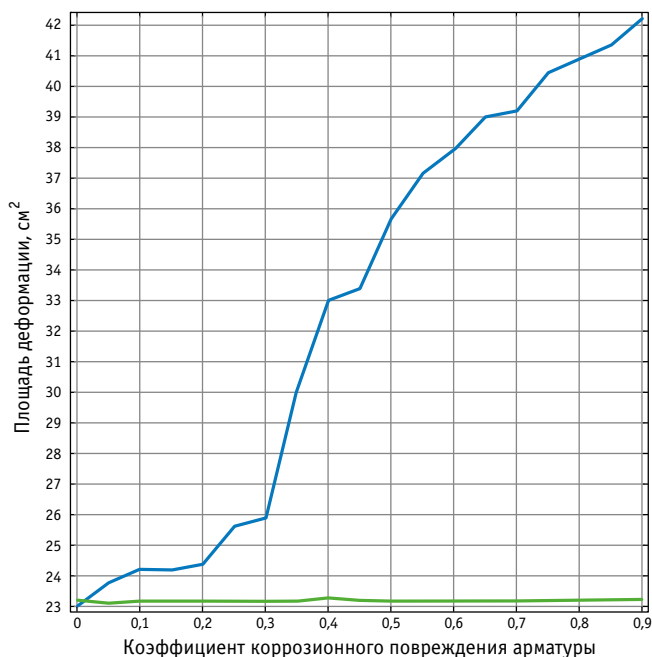
**Сведения об авторах:**

**Алексей Анатольевич Ковалев**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение транспорта» Уральского государственного университета путей сообщения

**Александр Владимирович Окунев**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение транспорта» Уральского государственного университета путей сообщения

**Александр Викторович Паранин**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение транспорта» Уральского государственного университета путей сообщения

**Михаил Станиславович Чепижко**, ассистент кафедры «Электроснабжение транспорта» Уральского государственного университета путей сообщения



**Рис. 6. Площадь пластической деформации в сечении опоры на уровне УОФ:**

— коррозийное повреждение на глубине 0–30 см;  
— коррозийное повреждение на глубине 60–90 см

Напряжение на арматуре, равно как и на бетоне, возрастает в той же области. Но при заданных нагрузках оно находится в допустимом диапазоне. При моделировании максимально полученное напряжение составило 19,4 МПа, что существенно меньше предела текучести стали (395 МПа), следовательно, арматура не подвержена пластической деформации.

**Authors information:**

**Alexey A. Kovalev**, PhD in Engineering, Associate Professor of Transport Power Supply Department, Ural State University of Railway Transport

**Alexander V. Okunev**, PhD in Engineering, Associate Professor of Transport Power Supply Department, Ural State University of Railway Transport

**Alexander V. Parinin**, PhD in Engineering, Associate Professor of Transport Power Supply Department, Ural State University of Railway Transport

**Mikhail S. Chepizhko**, Assistant Lecturer of Transport Power Supply Department, Ural State University of Railway Transport

## Литература

1. Котельников А. В., Кандаев А. В. Блуждающие токи и эксплуатационный контроль коррозионного состояния подземных сооружений систем электроснабжения железнодорожного транспорта. Москва : УМЦ ЖДТ, 2013. 552 с.
2. Вайнштейн А. Л., Павлов А. В. Коррозионные повреждения опор контактной сети. Москва : Транспорт, 1988. 112 с.
3. Шилкин П. М., Порцелан А. А., Котельников А. В. Защита контактной сети постоянного тока при различных способах заземления опор. Москва : Транспорт, 1977. 104 с.
4. Марквардт К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог. Москва : Транспорт, 1982. 528 с.
5. Ковалев А. А., Окунев А. В. Оценка состояния опор контактной сети на протяжении жизненного цикла // Инновационный транспорт. 2015. № 3 (17). С. 23–29. ISSN 2311-164X.
6. Окунев А. В., Галкин А. Г., Ковалев А. А. Определение предельных состояний опор контактной сети на основе математического моделирования изменения их несущей способности // Известия Транссиба. 2019. № 2 (38). С. 82–90. ISSN 2220-4245.
7. Скоробогатов С. М. Иерархия трещинообразования бетона в изгибаемых железобетонных элементах // Транспорт Урала. 2014. № 2 (41). С. 62–66. ISSN 1815-9400.
8. Подольский В. И. Железобетонные опоры контактной сети. Конструкции, эксплуатация, диагностика. Москва : Интекст, 2007. 152 с.
9. Подольский В. И. Повышение долговечности центрифугированных железобетонных опор контактной сети // Теоретические и конструктивно-технологические разработки и рекомендации по повышению долговечности железнодорожных зданий и сооружений. Москва : МИИТ, 1988. С. 78–86.
10. Указания по техническому обслуживанию и ремонту опорных конструкций контактной сети. К-146-2008. Москва, 1989. 54 с.

Объем статьи 0,58 авторских листа

## References

1. Kotel'nikov A. V., Kandaev V. A. Stray currents and operational monitoring of the corrosion state of underground structures of railway power supply systems [Bluzhdayushhie toki i ekspluatatsionnyy kontrol' korrozionnogo sostoyaniya podzemnykh sooruzheniy sistem elektrosnabzheniya zheleznodorozhnogo transporta]. Moscow : UMTs ZhDT, 2013. 552 p.
2. Vaynshteyn A. L., Pavlov A. V. Corrosion damage to overhead contact supports [Korroziionnye povrezhdeniya opor kontaktnoy seti]. Moscow : Transport, 1988. 112 p.
3. Shilkin P. M., Portselan A. A., Kotel'nikov A. V. Protection of DC contact network with various methods of grounding supports [Zashhita kontaktnoy seti postoyannogo toka pri razlichnykh sposobakh zazemleniya opor]. Moscow : Transport, 1977. 104 p.
4. Markvardt K. G. Power supply of electrified railways [Elektrosnabzhenie elektrifitsirovannykh zheleznnykh dorog]. Moscow : Transport, 1982. 528 p.
5. Kovalev A. A., Okunev A. V. Assessment of serviceability of catenary supports throughout the life cycle [Otsenka sostoyaniya opor kontaktnoy seti na protyazhenii zhiznennogo tsikla]. *Innotrans*. 2015. No. 3 (17). Pp. 23–29. ISSN 2311-164X.
6. Okunev A. V., Galkin A. G., Kovalev A. A. Determination of the limit states of the support of a contact network on the basis of mathematical modeling of changes in their carrying capability [Opredelenie predel'nykh sostoyaniy opor kontaktnoy seti na osnove matematicheskogo modelirovaniya izmeneniya ikh nesushhey sposobnosti]. *Journal of Transsib Railway Studies*. 2019. No. 2 (38). Pp. 82–90. ISSN 2220-4245.
7. Skorobogatov S. M. Hierarchy of concrete cracking in curving concrete elements [Ierarkhiya treshhinoobrazovaniya betona v izgibaemykh zhelezobetonnykh elementakh]. *Transport of the Urals*. 2014. No. 2 (41). Pp. 62–66. ISSN 1815-9400.
8. Podol'skiy V. I. Reinforced concrete supports of the contact network. Designs, operation, diagnostics [Zhelezobetonnyye opory kontaktnoy seti. Konstruktsii, ekspluatatsiya, diagnostika]. Moscow : Intext, 2007. 152 p.
9. Podol'skiy V. I. Increasing the durability of centrifuged reinforced concrete contact network supports [Povyshenie dolgovechnosti tsentrifugirovannykh zhelezobetonnykh opor kontaktnoy seti]. *Theoretical, design and technological developments and recommendations for increasing the durability of railway buildings and structures*. Moscow : MIIT, 1988. Pp. 78–86.
10. Instructions for maintenance and repair of contact network support structures. K-146-2008 [Ukazaniya po tekhnicheskomu obsluzhivaniyu i remontu opornykh konstruktsiy kontaktnoy seti. K-146-2008]. Moscow, 1989. 54 p.

Научная статья

УДК 621.311

## Повышение надежности электроснабжения постов электрической централизации Восточного полигона

 Елена Юрьевна Пузина<sup>1</sup>
<sup>1</sup>Иркутский государственный университет путей сообщения, Иркутск, Россия

## Improving the reliability of the signalling control power supply of the Eastern operating domain

 Elena Yu. Puzina<sup>1</sup>
<sup>1</sup>Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia

### Аннотация

Посты электрической централизации (ПЭЦ) — одни из наиболее ответственных потребителей электроэнергии на железнодорожном транспорте. На отдельных участках Восточного полигона их электроснабжение организовано от городских электрических сетей, где в последние годы из-за возрастающих нагрузок и определенной изношенности наблюдается тенденция роста повреждений на ПЭЦ. В статье представлена модель системы электроснабжения постов электрической централизации Восточного полигона, разработанная в программно-вычислительном комплексе Fazonord. В процессе моделирования выбран оптимальный вариант электроснабжения, обеспечивающий достаточный уровень надежности и позволяющий снизить эксплуатационные расходы.

**Ключевые слова:** посты электрической централизации, надежность электроснабжения, железнодорожные источники, Восточный полигон

### Abstract

Signalling control posts are one of the most responsible consumers of electricity on railway transport. In some sections of the Eastern operating domain power supply is organized from urban electric networks, where in recent years, due to increasing loads and certain deterioration of networks, there has been an increasing tendency for damage at signalling control posts.

The article presents a model of the power supply system for the signalling control posts of the Eastern operating domain, developed in the Fazonord programming and computing suite. In the process of modeling, the optimal option for power supply from railway sources was selected, which provides a sufficient level of reliability and reduces operating costs.

**Keywords:** signalling control posts, reliability of power supply, railway sources, Eastern operating domain

DOI: 10.20291/1815-9400-2024-1-110-115

### ВВЕДЕНИЕ

**Ж**елезнодорожный транспорт получает электроэнергию от электростанций и подстанций региональных энергосистем, от электростанций и подстанций независимых производителей электроэнергии, а также от подстанций, входящих в состав ОАО «РЖД».

Все устройства, от генераторов электростанций до тяговой сети, образуют систему электроснабжения (СЭС), основная задача которой — обеспечение эксплуатационной работы железной дороги, прежде всего надежное электроснабжение подвижного состава [1]. Эта задача неразрывно связана с поддержанием, в частности, высокого уровня надежности электроснабжения постов электрической централизации (ПЭЦ) [2, 3].

Посты электрической централизации — потребители 1-й категории, однако при количестве стрелок более 30 их относят даже к особой группе первой категории. Такие потребители получают электроснабжение минимум от двух независимых источников питания. Как правило, основным источником являются воздушные линии 10(6) кВ СЦБ. Резервными источниками могут быть линии продольного электроснабжения железнодорожных потребителей (ВЛ ПЭ) напряжением 10 или 27,5 кВ или другие ЛЭП, предназначенные для потребителей первой и второй категорий. Резервным, автономным, источником питания служит дизель-генераторный агрегат или аккумуляторная батарея [1].

В настоящее время ряд ПЭЦ Восточного полигона получают основное и резервное электроснабжение (кроме дизель-генератора) только от городских сетей, на которых нередко фиксируются повреждения линий, что снижает надежность электроснабжения и, как следствие, может отрицательно повлиять на безопасность перевозочного процесса, особенно при пропуске тяжеловесных поездов [4–6]. Поэтому необходима разработка предложений по повышению надежности электроснабжения таких ПЭЦ [7].

### ПРОБЛЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПЭЦ ВОСТОЧНОГО ПОЛИГОНА

Рассмотрим проблемы электроснабжения отдельных ПЭЦ Восточного полигона на примере постов, расположенных на железнодорожных станциях МК и НХ. Их основное электроснабжение осуществляется от городского фидера ТЭЦ от шин 6 кВ. Резервное электроснабжение также осуществляется от шин 6 кВ ТЭЦ (рис. 1), вторым резервным источником питания является дизель-генератор.

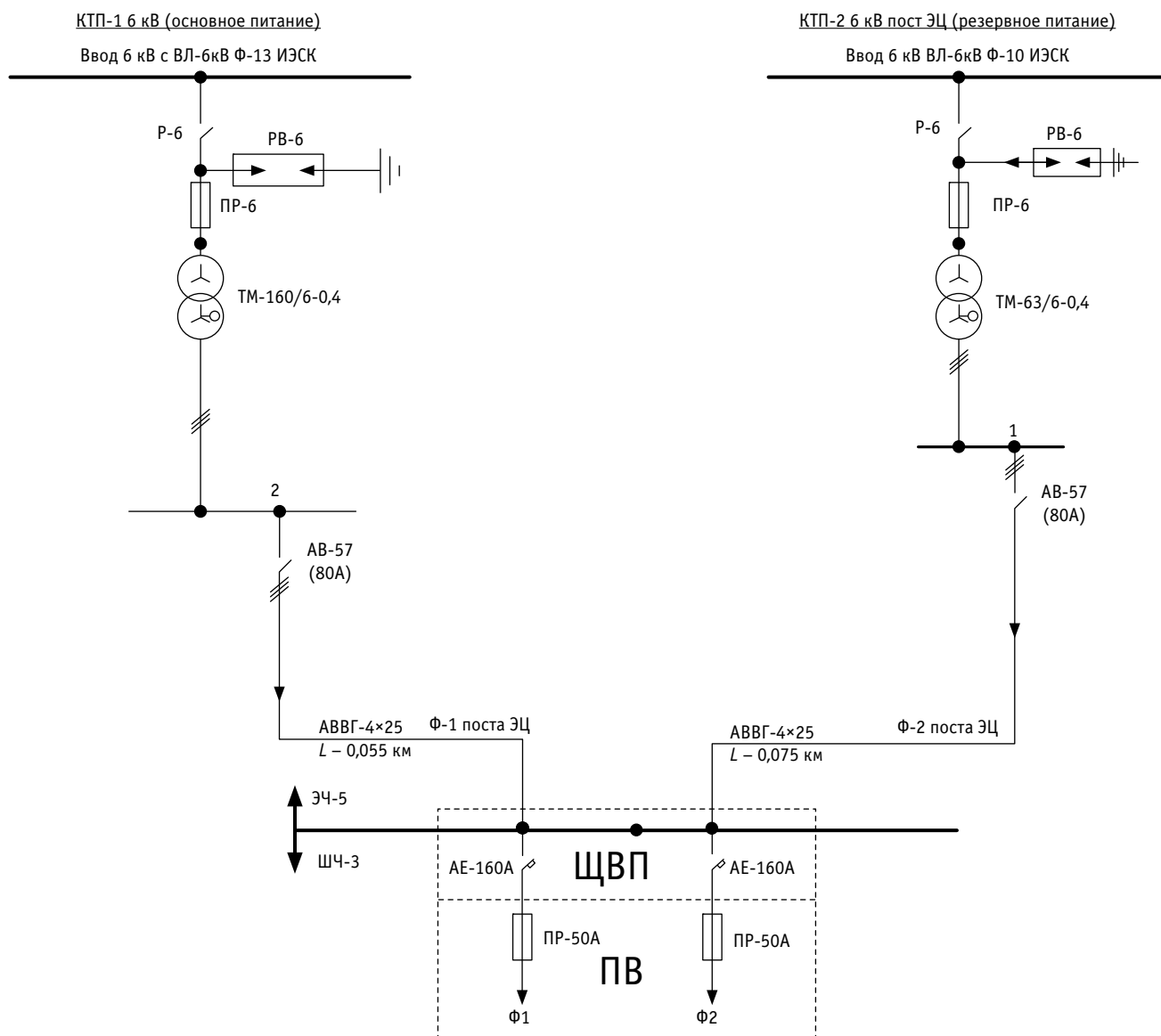


Рис. 1. Однолинейная схема электроснабжения ПЭЦ станции НХ

На основании полученной в дирекции по энергообеспечению железной дороги, обслуживающей СЭС этих ПЭЦ, статистики отказов на линиях, питающих посты электрической централизации МК и НХ, за период с 2013 по 2022 г. выполнен анализ, результаты которого представлены на рис. 2.

Как видно из представленных данных, с 2018 по 2022 г. проявилась тенденция роста числа отказов, наибольшее количество которых произошло в 2021 и 2022 гг. Среди первоочередных причин, приводящих к отказам, стоит выделить штормовой ветер, грозовые разряды, повреждение воздушных линий электропередачи.

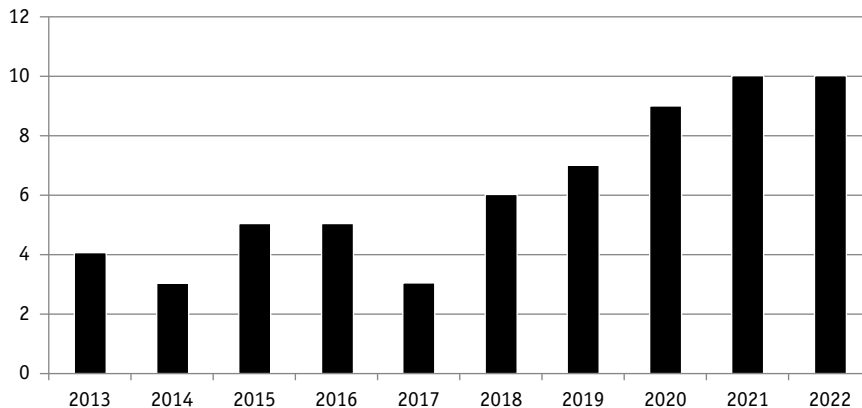


Рис. 2. Количество отказов на линиях электроснабжения ПЭЦ станций МК и НХ с 2013 по 2022 г.

Анализ и статистика отказов показали, что электроснабжение постов электрической централизации станций МК и НХ, существующее в настоящее время, недостаточно надежно.

### ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПЭЦ

В связи с недостаточной надежностью питания постов электрической централизации станций МК и НХ Восточного полигона от городских электрических сетей необходимо исследовать возможность их электроснабжения от железнодорожных источников. Ближайшими железнодорожными источниками питания могут служить фидеры 10 кВ (№ 11, 13, 14, 15 и 16) тяговой подстанции ГР (ЭЧЭ ГР). С целью выбора конкретного фидера было проанализировано электропотребление по всем из них за каждый месяц 2022 г. (рис. 3).

Как видно из рис. 3, по 15-му фидеру нет расхода электроэнергии, следовательно, он является резервным и подключать к нему новую линию электроснабжения нецелесообразно. На основании данных, полученных в дирекции по энергообеспечению, установлено, что 11-й фидер не подходит территориально, так как осуществляет питание смежной межподстанционной зоны. Для дальнейшего выбора одного из фидеров (№ 13, 14 или 16) выполнена оценка их загруженности по суммарному расходу электроэнергии за 2022 г. (рис. 4).

Итак, предположительно имеет смысл подключить посты электрической централизации станций МК и НХ к 14-му фидеру ЭЧЭ ГР. К дополнительным преимуществам выбора 14-го фидера можно отнести территориальное расположение, так как он находится вблизи станции НХ. Это

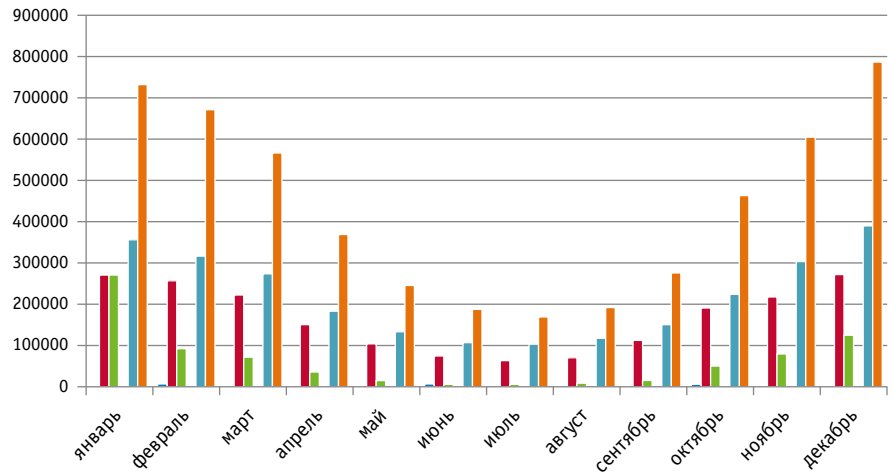


Рис. 3. Расход электроэнергии по фидерам ЭЧЭ ГР в 2022 г., кВт·ч:  
■ — 11; ■ — 13; ■ — 14; ■ — 15; ■ — 16; ■ — итого

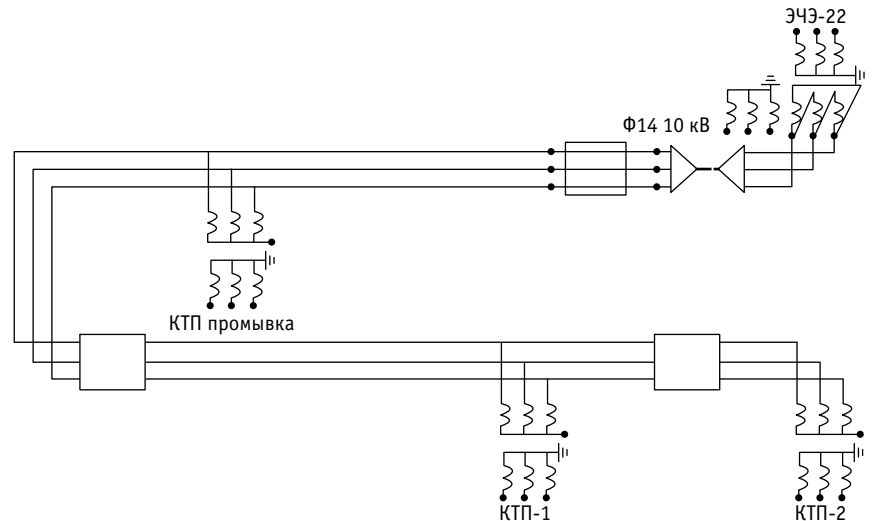


Рис. 5. Модель системы электроснабжения ПЭЦ МК и НХ от фидера 10 кВ № 14 ЭЧЭ ГР

способствует наиболее оптимальному варианту прокладки питающей линии к исследуемым постам электрической централизации.

Другой вариант железнодорожного электроснабжения ПЭЦ станций МК и НХ — их подключение к воздушной линии продольного электроснабжения ВЛ ПЭ 10 кВ. При выборе оптимального варианта электроснабжения широко используются методы компьютерного, имитационного моделирования [8–10]. В нашем исследовании моделирование вариантов систем электроснабжения выполнено в ПВК Fazopord, разработанном в Иркутском государственном университете путей сообщения (ИрГУПС) [11].

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ВАРИАНТОВ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПЭЦ НХ И МК ОТ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ИСТОЧНИКОВ

Модель системы электроснабжения рассматриваемых ПЭЦ от фидера 10 кВ № 14 ЭЧЭ ГР представлена на рис. 5, а от ВЛ ПЭ 10 кВ — на рис. 6. Анализ отклонений напряжений от номинального значения по расчетным схемам представлен в табл. 1 и 2.

По полученным значениям напряжения и их отклонению от номинального значения можно сделать вывод, что напряжения в точках подключения комплектных трансформаторных подстанций, от которых получают питание ПЭЦ

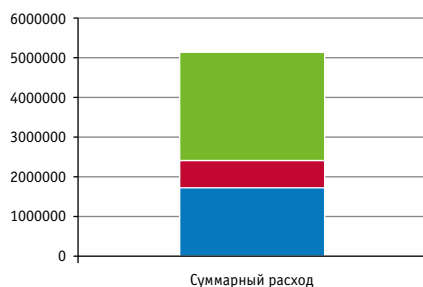


Рис. 4. Суммарный расход электроэнергии в 2022 г. по фидерам 13, 14, 16 ЭЧЭ ГР, кВт·ч:  
■ — 16; ■ — 14; ■ — 13

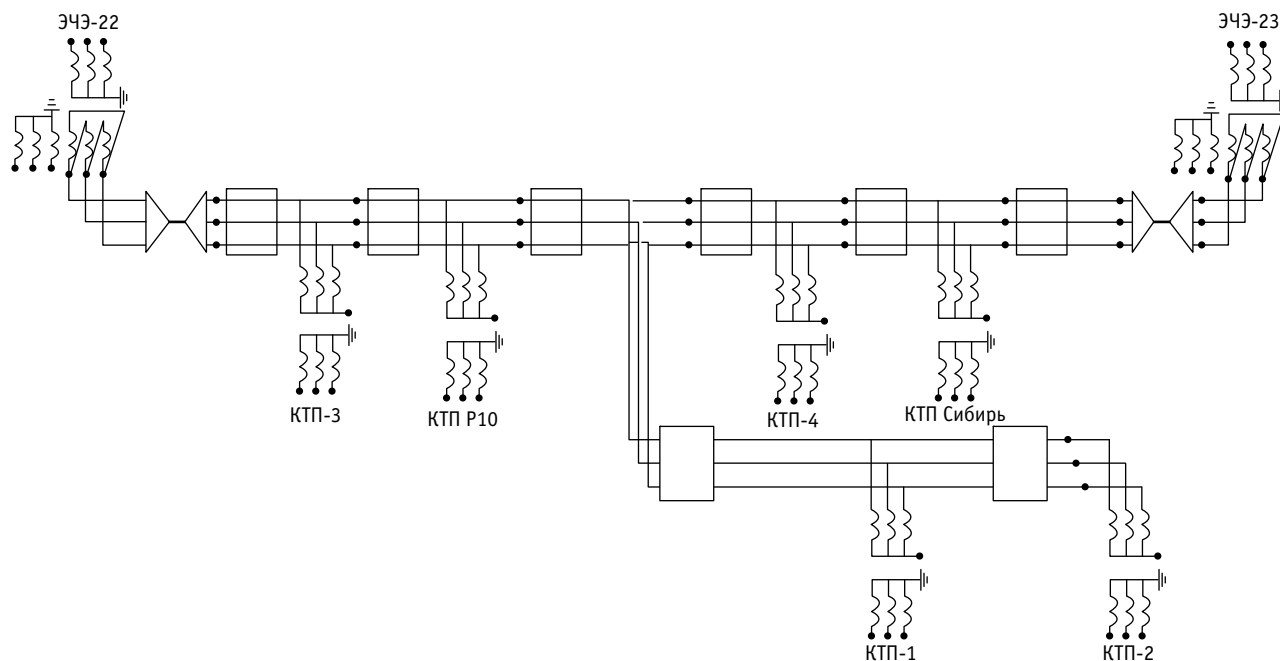


Рис. 6. Модель системы электроснабжения ПЭЦ МК и НХ от ВЛ ПЭ 10 кВ

Таблица 1

Таблица 2

Значения и отклонение напряжения при подключении к ВЛ-10 кВ Ф-14 ЭЧЭ ГР

Значения и отклонение напряжения при подключении к ВЛ-10 кВ ПЭ

Потребитель	Марка трансформатора	Напряжение, В	Отклонение напряжения, %
КТП-1 ПЭЦ НХ	ТМ-160/6-0,4	230,3	4,68
	ТМ-63/6-0,4	224,7	2,42
КТП-1 ПЭЦ МК	ТМ-100/6-0,4	223,9	2,05
	ТМ-25/6-0,4	224,4	2,28

Потребитель	Марка трансформатора	Напряжение, В	Отклонение напряжения, %
КТП-1 ПЭЦ НХ	ТМ-160/6-0,4	235,4	7,30
	ТМ-63/6-0,4	228,7	3,95
КТП-2 ПЭЦ МК	ТМ-100/6-0,4	230,9	4,95
	ТМ-25/6-0,4	228,4	3,82

Таблица 3

Таблица 4

Потери мощности в силовых трансформаторах при подключении к ВЛ-10 кВ ПЭ

Потери мощности в силовых трансформаторах при подключении к ВЛ-10 кВ Ф-14 ЭЧЭ ГР

Потребитель	Марка трансформатора	Потери мощности	
		активной, кВт	реактивной, кВАр
КТП-1 ПЭЦ НХ	ТМ-160-6/0,4	1,858	11,858
	ТМ-63-6/0,4	0,616	4,708
КТП-2 ПЭЦ МК	ТМ-100-6/0,4	0,867	6,682
	ТМ-25-6/0,4	0,406	2,843

Потребитель	Марка трансформатора	Потери мощности	
		активной, кВт	реактивной, кВАр
КТП-1 ПЭЦ НХ	ТМ-160-6/0,4	1,242	7,929
	ТМ-63-6/0,4	0,407	3,108
КТП-2 ПЭЦ МК	ТМ-100-6/0,4	0,564	4,343
	ТМ-25-6/0,4	0,263	1,843

МК и НХ, соответствуют ГОСТу [12]. При этом отклонение напряжения от номинального значения существенно меньше при подключению к фидеру 14 ЭЧЭ ГР: на 35,9–38,7 % на КТП ПЭЦ НХ и на 40,2–58,6 % на КТП ПЭЦ МК.

Анализ тока, протекающего в ВЛ ПЭ 10 кВ и по Ф-14 ЭЧЭ ГР, показал, что вариант, в котором питание постов ЭЦ осуществ-

ляется от ВЛ-10 кВ Ф-14 ЭЧЭ ГР, более оптимальный, так как эта линия электроснабжения имеет меньшую загруженность.

Потери мощности в трансформаторах КТП приведены в табл. 3 и 4.

В результате анализа потерь мощности в силовых трансформаторах установлено, что при подключении к ВЛ-10 кВ



Ф-14 ЭЧЭ ГР потери будут значительно меньше: на 33,3 % для КТП ПЭ НХ и на 35,0 % для КТП ПЭЦ МК.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенного исследования установлено, что оптимальным вариантом для повышения надежности работы исследуемой СЭС является электроснабжение постов ЭЦ от ВЛ-10 кВ Ф-14 ЭЧЭ ГР. Предварительный проект прокладки ответвлений от Ф-14 ЭЧЭ ГР к данным ПЭЦ показал, что с учетом затрат на новые отрезки линий экономический эффект от сокращения потерь электроэнергии, уменьшения ущерба от недоотпуска электроэнергии при повреждениях

линий существующей СЭС, уменьшения оплаты за электроэнергию вследствие разницы в тарифах при питании от городских и железнодорожных сетей может составить порядка 1,4 млн руб. в год.

Таким образом, анализ существующей системы электроснабжения ПЭЦ Восточного полигона выявил недостаточную степень ее надежности. При помощи моделирования в ПВК Fazonord выбран оптимальный вариант электроснабжения анализируемых объектов как с технической, так и с экономической точки зрения, который позволит повысить надежность устройств электрической централизации и безопасность перевозочного процесса в целом [13, 14].

### Сведения об авторе:

**Елена Юрьевна Пузина**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроэнергетика транспорта» Иркутского государственного университета путей сообщения

### Author's information:

**Elena Yu. Puzina**, PhD in Engineering, Associate Professor of Electrical Power Industry of Transport Department, Irkutsk State Transport University

### Литература

1. Третьяков Е. А., Галкин А. Г., Сидорова Е. А. Перспективные методы управления транспортом и распределением электроэнергии в электрических сетях железных дорог // Известия Транссиба. 2018. № 2 (34). С. 113–124. ISSN 2220-4245.
2. Аржанников Б. А., Сергеев Б. С., Набойченко И. О. Системы электроснабжения устройств СЦБ. Екатеринбург : УРГУПС, 2009. 101 с.
3. Лапшин В. Ф., Буйносов А. П., Умылин И. В. Элементы пассивной безопасности для защиты подвижного состава при столкновениях // Научно-технический вестник Поволжья. 2019. № 4. С. 65–68. ISSN 2079-5920.
4. Емелина Н. В., Аккерман Г. Л. Развитие тяжеловесного движения в России и мире: проблемы и перспективы // Инновационный транспорт. 2022. № 1 (43). С. 59–63. DOI:10.20291/2311-164X-2022-1-59-63.
5. Cherepanov A., Kutsiy A. Modeling of Tractive Power Supply Systems for Heavy-Tonnage Trains Operation // International Russian Automation Conference, (RusAutoCon), 2018. DOI: 10.1109/RUSAUTOCON.2018.8501734.
6. Пузина Е. Ю. Усиление системы тягового электроснабжения участка Чуро-Таксимо ВСЖД // Транспорт: наука, образование, производство: труды международной научно-практической конференции. Ростов-на-Дону : РГУПС, 2016. С. 306–310.
7. Каимов Е. В., Оленцевич В. А., Власова Н. В. Проблемы формирования, развития и реконструкции элементов инфраструктурного комплекса железных дорог // Образование — Наука — Производство: материалы VI Всероссийской научно-практической конференции (с международным участием). Т. 1. Чита, 2022. С. 288–296.
8. Исследование мультиэнергетического объекта методами имитационного моделирования / Н. И. Воропай, Е. В. Уколова, Д. О. Герасимов [и др.] // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 12 (143). С. 157–168. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-12-157-168.

### References

1. Tretyakov E. A., Galkin A. G., Sidorova E. A. Perspective methods of management of transport and distribution of electric energy in electric networks of railways [Perspektivnye metody upravleniya transportom i raspredeleniem elektroenergii v elektricheskikh setyakh zheleznykh dorog]. *Journal of Transib Railway Studies*. 2018. No. 2 (34). Pp. 113–124. ISSN 2220-4245.
2. Arzhannikov B. A., Sergeev B. S., Naboychenko I. O. Power supply systems for signalling arrangement [Sistemy elektrosnabzheniya ustroystv STsB]. Ekaterinburg : USURT, 2009. 101 p.
3. Lapshin V. F., Buynosov A. P., Umylin I. V. The passive safety elements for protection of electric rolling stock in collisions [Elementy passivnoy bezopasnosti dlya zashhity podvizhnogo sostava pri stolknoveniyakh]. *Scientific and Technical Volga region Bulletin*. 2019. No. 4. Pp. 65–68. ISSN 2079-5920.
4. Emelina N. V., Akkerman G. L. Development of heavyweight railway traffic in Russia and the world: challenges and prospects [Razvitie tyazhelovesnogo dvizheniya v Rossii i mire: problemy i perspektivy]. *Innotrans*. 2022. No. 1 (43). Pp. 59–63. DOI: 10.20291/2311-164X-2022-1-59-63.
5. Cherepanov A., Kutsiy A. Modeling of Tractive Power Supply Systems for Heavy-Tonnage Trains Operation. *International Russian Automation Conference, (RusAutoCon)*, 2018. DOI: 10.1109/RUSAUTOCON.2018.8501734.
6. Puzina E. Yu. Strengthening of the traction power supply system of the Churo-Taksim section of the East Siberian Railway [Usilenie sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya uchastka Churo-Taksim VSZHd]. *Transport: Science, Education, Production: Proceedings of International scientific and practical conference*. Rostov-on-Don : RSTU, 2016. Pp. 306–310.
7. Kaimov E. V., Olentsevich V. A., Vlasova N. V. Problems of formation, development and reconstruction of the railway infrastructure complex elements [Problemy formirovaniya, razvitiya i rekonstruktsii elementov infrastruktturnogo kompleksa zheleznykh dorog]. *Education — Science — Production: Proceedings of the 6th All-Russian scientific and practical conference (with international participation)*. Vol. 1. Chita, 2022. Pp. 288–296.
8. Voropai N. I., Ukolova E. V., Gerasimov D. O. [et al.]. Study of a multi-power facility by simulation modeling methods [Issledovanie mul'tienergeticheskogo ob'ekta metodami imitatsionnogo modelirovaniya]. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2018. Vol. 22. No. 12 (143). Pp. 157–168. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-12-157-168.
9. Aleksandrov A. E. On modeling for calculation and optimization of the railway transport systems [Ispolz'ovanie modeley pri raschete i optimi-

9. Александров А. Э. Использование моделей при расчете и оптимизации систем железнодорожного транспорта // Наука и техника транспорта. 2008. № 2. С. 54–56. ISSN 2074-9325.
10. Пузина Е. Ю. Моделирование ремонтных режимов работы системы электроснабжения участка Юрты — Нижнеудинск при реализации систем интервального регулирования // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2022. № 3 (75). С. 181–194. DOI: 10.26731/1813-9108.2022.3(75).181-194.
11. Закарюкин В. П., Крюков А. В. Методы совместного моделирования систем тягового и внешнего электроснабжения железных дорог переменного тока. Иркутск : Изд-во ИргУПС, 2011. 160 с.
12. ГОСТ 32144-2013. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Москва : Стандартинформ, 2014. 16 с.
13. Sekhar P. C., Deshpande R. A., Sankar V. Evaluation and improvement of reliability indices of electrical power distribution system // National Power Systems Conference (NPSC), 2016. DOI: 10.1109/NPSC.2016.7858838.
14. Пулятков А. В., Трофимов Ю. А., Скоробогатов М. Э. Комплексные решения по повышению устойчивости работы устройств автоматической локомотивной сигнализации на участках с электротягой переменного тока // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. 2015. Т. 1. С. 328–332.
- zatsii sistem zheleznodorozhnogo transporta]. *Science and technology in transport*. 2008. No. 2. Pp. 54–56. ISSN 2074-9325.
10. Puzina E. Yu. Modeling of repair operation modes of the power supply system of the Yurts — Nizhneudinsk section during the implementation of interval control systems [Modelirovanie remontnykh rezhimov raboty sistemy elektrosnabzheniya uchastka Yurty — Nizhneudinsk pri realizatsii sistem interval'nogo regulirovaniya]. *Modern technologies. System analysis. Modeling*. 2022. No. 3 (75). Pp. 181–194. DOI: 10.26731/1813-9108.2022.3(75).181-194.
11. Zakaryukin V. P., Kryukov A. V. Methods of joint modeling of traction and external power supply systems for AC railways [Metody sovmestnogo modelirovaniya sistem tyagovogo i vneshnego elektrosnabzheniya zheleznykh dorog peremennogo toka]. Irkutsk : Publishing House of IrGUPS, 2011. 160 p.
12. GOST 32144-2013. Power quality limits in the public power supply systems [Normy kachestva elektricheskoy energii v sistemakh elektrosnabzheniya obshhego naznacheniya]. Moscow : Standardinform, 2014. 16 p.
13. Sekhar P. C., Deshpande R. A., Sankar V. Evaluation and improvement of reliability indices of electrical power distribution system. *National Power Systems Conference (NPSC)*, 2016. DOI: 10.1109/NPSC.2016.7858838.
14. Pul'tyakov A. V., Trofimov Yu. A., Skorobogatov M. E. Comprehensive solutions to improve the stability of automatic locomotive signaling devices in areas with alternating current electric traction [Kompleksnye resheniya po povysheniyu ustoychivosti raboty ustroystv avtomaticheskoy lokomotivnoy signalizatsii na uchastkakh s elektrotiyagoy peremennogo toka]. *Transport infrastructure of the Siberian Region*. 2015. Vol. 1. Pp. 328–332.

Объем статьи 0,6 авторских листа

Научная статья  
УДК 629.423

## Управление электротяговыми нагрузками на основе взаимодействия с системой электроснабжения железных дорог

Евгений Александрович Третьяков<sup>1</sup>, Илья Николаевич Денисов<sup>1</sup>, Егор Геннадьевич Авдиенко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Омский государственный университет путей сообщения, Омск, Россия

## Management of electric traction loads in terms of interaction with the railway power supply system

Evgeniy A. Tretyakov<sup>1</sup>, Ilya N. Denisov<sup>1</sup>, Egor G. Avdienko<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Omsk State Transport University, Omsk, Russia

### Аннотация

В настоящее время принципы управления электроподвижным составом не предполагают учета мгновенной нагрузки тяговых подстанций и параметров режима работы других электротяговых нагрузок на межподстанционной зоне электрифицированного участка железных дорог. Межпоездные интервалы движения на участке задаются на основе предварительного программного расчета системы тягового электроснабжения для поездов с заданным диапазоном массы состава.

В статье обоснован подход к управлению электротяговыми нагрузками на основе их взаимодействия между собой и с системой электроснабжения железных дорог в реальном времени при мгновенных ограничениях энергетической инфраструктуры. Представлены результаты экспериментальных синхронизированных измерений с двумя поездами на межподстанционной зоне электрифицированного участка переменного тока. С использованием математической модели пилотного участка и данных измерений рассчитаны коэффициенты влияния электротяговых нагрузок на напряжение в произвольных узлах и на загрузку фидеров контактной сети.

**Ключевые слова:** управление, электротяговые нагрузки, мгновенный тяговый расчет, взаимодействие, координация, система электроснабжения железных дорог

### Abstract

Currently, the principles of electric rolling stock management do not involve consideration of the instantaneous load of traction substations and the operating mode parameters of other electric traction loads in the inter-substation zone of an electrified section of railways. The inter-train travel intervals on the section are set based on the preliminary software-based calculation of the traction power supply system for trains with a given range of train weight.

The article provides the reasonable approach to managing electric traction loads based on their interaction both with each other and the railway power supply system in real time with instantaneous limitations of the energy infrastructure. The results of experimental synchronized measurements with two trains in the substation area of an electrified AC section are presented. Using a mathematical model of the pilot site and measurement data, the coefficients of the influence of electric traction loads on the voltage in arbitrary nodes and on the loading of the feeders of the contact network are calculated.

**Keywords:** management, electric traction loads, instant traction calculation, interaction, coordination, railway power supply system

DOI: 10.20291/1815-9400-2024-1-116-123

К числу известных подходов, позволяющих повысить пропускную способность электросетевых объектов без их реконструкции и строительства, относится управление спросом, особенно при существенно неравномерном графике нагрузок по питающим центрам, как в случае с электрифицированными железными дорогами [1]. В частности, перспективным вариантом повышения пропускной способности является оптимизация ситуационного управления электротяговыми нагрузками в зависимости от их приоритета на основе определения мгновенной загрузки системы тягового электроснабжения. Технологии управления электротяговыми нагрузками, в отличие от активных потребителей электроэнергетических систем [2], имеют ряд особенностей, вызванных пространственным перемещением электроподвижного состава и ограничениями графика движения поездов.

Представленная проблематика актуальна и имеет потенциал для развития научных исследований, особенно в условиях цифровой трансформации и связанных с ней процессов повышения наблюдаемости и управляемости режимами нагрузок и системы электроснабжения железных дорог.

В работе [3] авторы предлагают идею согласования режимов электроподвижного состава на межподстанционной зоне для обеспечения более полного использования энергии рекуперации соседними поездами, следующими в режиме тяги, а также для исключения перегрузок системы тягового электроснабжения и превышения допустимых параметров отклонения напряжения на токоприемнике. Разработанных методов и способов реализации данного подхода авторами не представлено.

Известные подходы [4–6] к управлению электротяговыми нагрузками в контексте рассматриваемой проблематики содержат следующие принципы:

контроль загрузки системы тягового электроснабжения осуществляется по мощности или электроэнергии по питающим линиям от системы внешнего электроснабжения;

управление электроподвижным составом выполняется путем выдачи управляющих воздействий на режим работы электровоза, связанный со значением потребляемой мощности (режим, позиция, скорость).

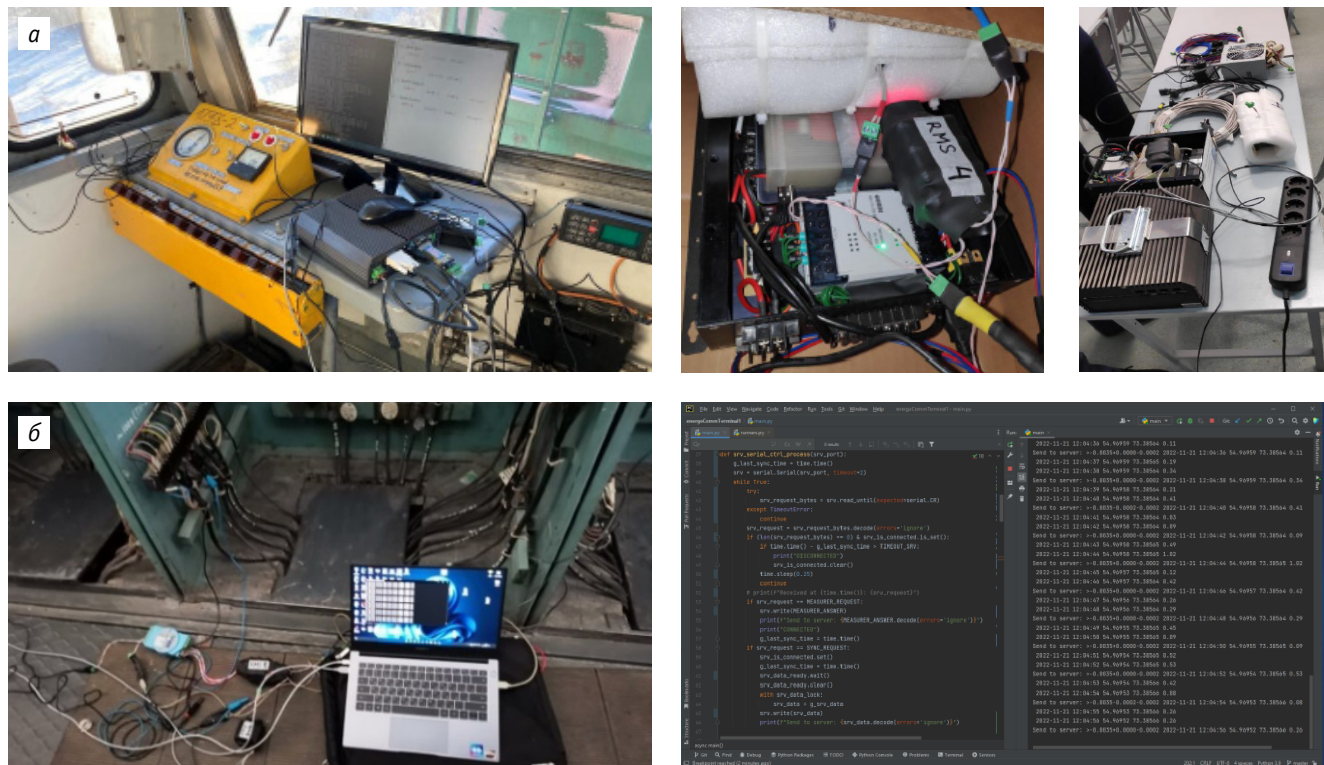


Рис. 1. Измерительное оборудование на электровозе (а) и на тяговой подстанции (б)

Основные недостатки представленных подходов: в системе тягового электроснабжения электрифицированных железных дорог не регулируются параметры режима по напряжению и потокам мощности с учетом интересов электроподвижного состава (например, при рекуперации, при преодолении лимитирующего подъема поездом), стабилизация напряжения осуществляется только устройствами компенсации реактивной мощности, быстродействующими регуляторами и прочими техническими средствами, при этом сигналы с электротяговых нагрузок не учитываются; работа устройств электроснабжения и электротяговых нагрузок не координируется, что существенно снижает эффективность известных подходов к управлению электротяговыми нагрузками.

Целью данного исследования является изучение принципов управления электроподвижным составом на основе мгновенных тяговых расчетов с учетом режимов работы системы электроснабжения железных дорог в условиях ограничений энергетической инфраструктуры на экспериментальном электрифицированном участке переменного тока Западно-Сибирской железной дороги.

Основные задачи:

- получение экспериментальных результатов движения грузовых электровозов с установленным измерительным оборудованием на электроподвижном составе и на двух тяговых подстанциях электрифицированного участка переменного тока;
- оценка влияния электротяговых нагрузок на напряжения в произвольных узлах контактной сети, шин фидеров тяговых

- подстанций, а также на загрузку питающих фидеров на основе схемы замещения;
- уточнение принципов мгновенного тягового расчета движения поезда (позиция, скорость, мощность) с учетом результатов измерений с бортовых систем электровоза;
- определение предельной потребляемой мощности электровоза в каждый момент времени на основе данных местоположения поездов на межподстанционной зоне и измеренных (рассчитанных) параметров режимов системы тягового электроснабжения (напряжение на токоприемнике, загрузка фидеров контактной сети и линий внешнего электроснабжения тяговых подстанций);
- реализация технологии управления электротяговыми нагрузками на межподстанционной зоне двухпутного участка переменного тока путем корректировки графика движения, а также параметров режимов электроподвижного состава и системы тягового электроснабжения (при наличии устройств регулирования).

В ходе экспериментальных испытаний на два электровоза ВЛ80с № 1738 и № 1831 в составе поезда и на четыре фидера контактной сети двух смежных тяговых подстанций электрифицированного участка переменного тока устанавливалось измерительное и коммуникационное оборудование (рис. 1), обеспечивающее измерение, хранение и передачу на удаленный сервер данных о токах, напряжениях, мощностях. Измерения осуществлялись с синхронизацией по GPS в течение 12 ч. В процессе поездки данные снимались непосредственно с тяговых подстанций Ш и С, а также с двух электровозов,

движущихся в попутном направлении, фиксировались и записывались в память портативного компьютера каждую секунду с синхронизацией времени через GPS, отправлялись на сервер и обратно на электровагоны для визуального отображения тока, напряжения электровагонов и подстанций. Это позволяло в реальном времени визуализировать нагрузку электровагонов в зависимости от загруженности подстанций.

При экспериментальных работах на подстанциях и электровагонах использовано следующее измерительное и коммуникационное оборудование: модуль ввода ADAM-4017-D 2E, 8 каналов аналогового ввода; Modbus ASCII Advantech; преобразователь интерфейса USB-RS 485; GPRS-терминал TELEOFIS WRX768-L4; модуль преобразования среднеквадратичного значения AD 637; датчик постоянного тока АНКС-КАА ACREL; GPS-трекер SMART S-2412; измерительные клещи CPR-1000 CIRCUTOR.

Измерения осуществлялись согласно утвержденной программе по действующим значениям с дискретностью 10 точек в секунду и синхронизацией с помощью GPS.

Данные принимались и обрабатывались на промышленные компьютеры и ноутбуки.

Ведение экспериментальных поездов массой по 4000 т осуществлялось с установленным межпоездным интервалом 12 мин. Примеры полученных результатов измерений представлены на рис. 2.

В рамках решения поставленных задач выполнена оценка влияния электротяговых нагрузок на напряжения в произвольных узлах контактной сети, шин фидеров тяговых подстанций на основе схемы замещения путем вычисления коэффициентов чувствительности напряжения на токоприемниках к изменению потребляемых токов посредством теории сенсорного анализа [3].

Указанные коэффициенты чувствительности являются обратными коэффициентами матрицы вида

$$J = \begin{pmatrix} \frac{\partial P}{\partial \delta} & \frac{\partial P}{\partial U} \\ \frac{\partial Q}{\partial \delta} & \frac{\partial Q}{\partial U} \end{pmatrix}. \quad (1)$$

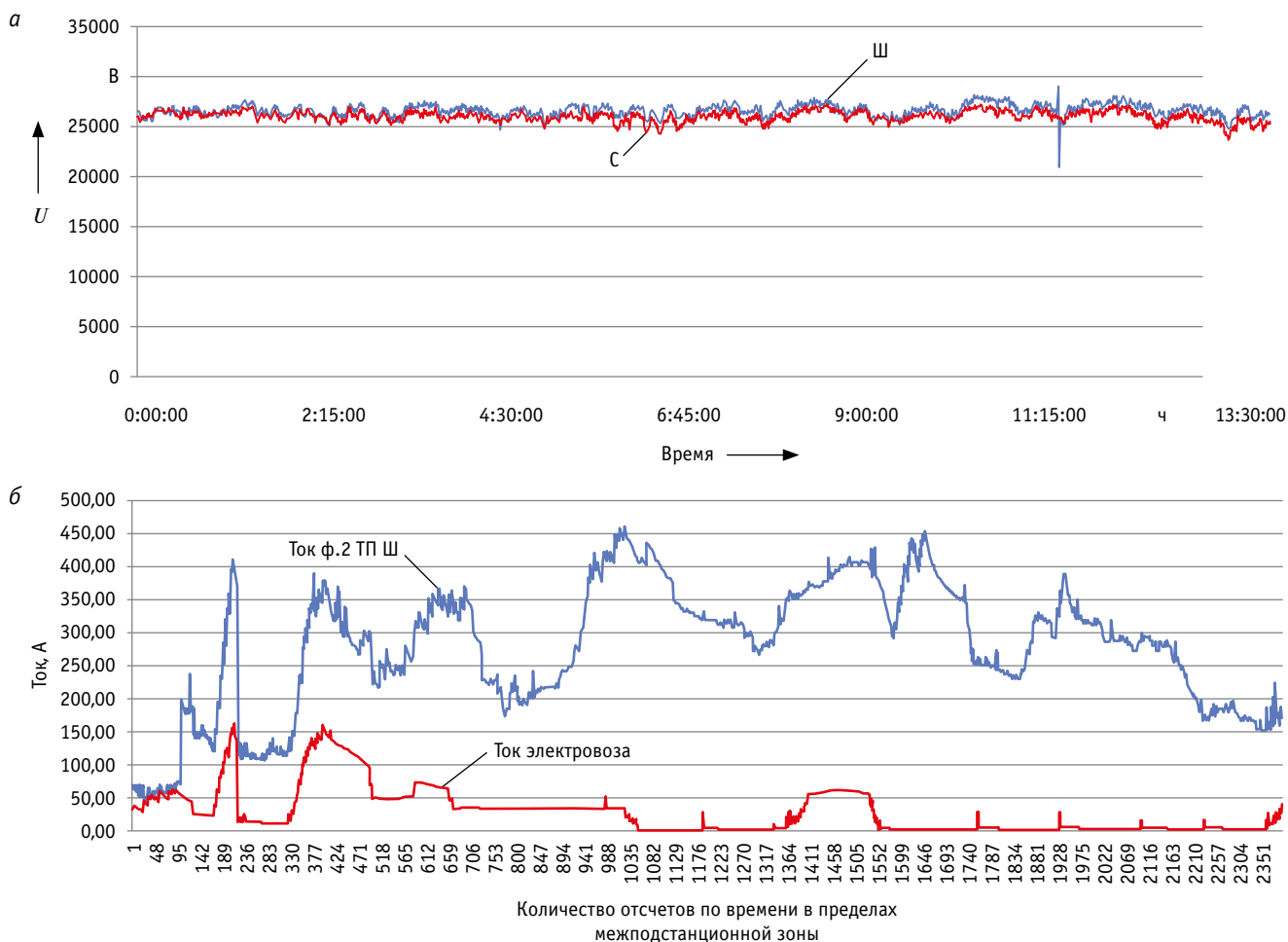


Рис. 2. Примеры результатов измерений:

а — напряжения на шинах ТП Ш, ТП С; б — ток электровагона № 1831 и ф. 2 ТП Ш (фрагмент)

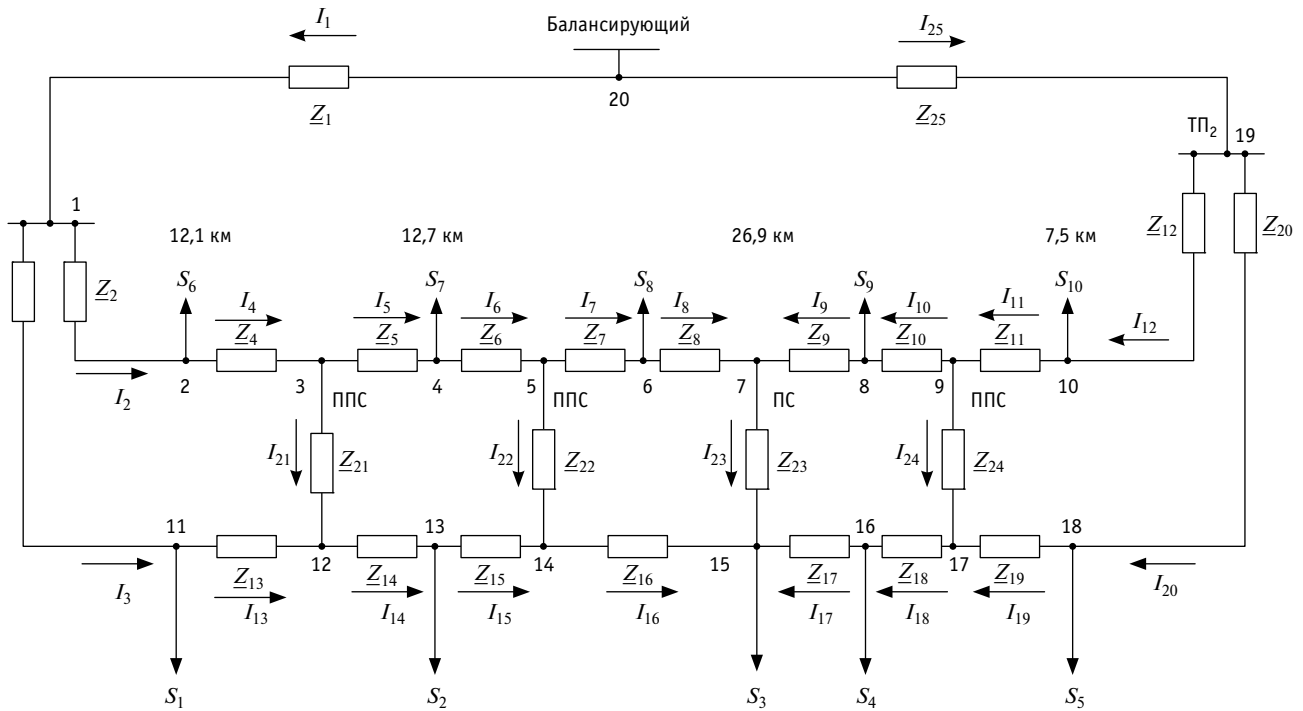


Рис. 3. Схема замещения межподстанционной зоны двухпутного участка

Изменение параметров режима системы электроснабжения железных дорог, которые чувствительны к изменению активных  $\Delta P$  и реактивных  $\Delta Q$  тяговых нагрузок, можно рассчитать в малых приращениях на основе линеаризованного уравнения

$$\begin{pmatrix} \Delta \delta \\ \Delta U \end{pmatrix} = J^{-1} \begin{pmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где  $\Delta \delta$ ,  $\Delta U$  — изменения фаз и модулей напряжения.

Электровазы последних серий оснащены микропроцессорной системой управления и полупроводниковыми тяговыми преобразователями, и линейная зависимость потребляемого тока ЭПС от напряжения не поддерживается, как на контакторно-релейных силовых схемах электровазов старых серий. Поэтому задание тяговых нагрузок в виде мощностей предпочтительнее, чем в виде источников тока. Недостатком известного подхода [5] является линейность источников тока (тяговых нагрузок) от приложенного напряжения, что вносит существенную погрешность в расчеты системы тягового электроснабжения, так как тяговым нагрузкам свойственна постоянная мощность при изменении напряжения и (или) изменении с заданным законом управления.

Взаимосвязь электротяговых нагрузок с параметрами напряжения в тяговой сети определяется на основе схемы замещения и системы уравнений в узловой матричной форме

$$[\hat{U}_d][Y_y] \cdot [\dot{U}] + [Y_6] \cdot [\dot{U}_6] = [\hat{S}_y], \quad (3)$$

где  $[\hat{U}_d]$  — диагональная матрица сопряженных комплексов напряжений узлов;  $[\hat{S}_y]$  — вектор-столбец сопряженных мощностей в узлах;  $Y_y$  — матрица узловых проводимостей,

$$Y_y = M \cdot Y_b \cdot M^T, \quad (4)$$

где  $M$  — матрица инцидентности;  $Y_b$  — матрица проводимости ветвей.

Мгновенная схема замещения двухпутного участка системы тягового электроснабжения переменного тока представлена на рис. 3.

Параметры элементов схемы замещения (см. рис. 3) основаны на следующих исходных данных. Активное сопротивление рельсовой нити принимается для Р65 равным 0,20 Ом/км; индуктивное сопротивление рельсовой нити принимается для Р65 равным 0,15 Ом/км; индуктивное сопротивление для ПБСМ принимается по ГОСТу 4775-91; индуктивное сопротивление для остальных проводов принимается 0,0157 Ом/км. На схеме замещения полное сопротивление взаимоиנדуктивности между контактными сетями путей учтено, но не показано.

Частные производные небалансов мощности для определения степени влияния узлов с тяговой нагрузкой на напряжения в произвольном узле представленной мгновенной схемы замещения могут быть записаны в виде (на примере составляющей  $\frac{\partial Q}{\partial U}$ )

$$J_{QU} := \begin{pmatrix}
 J_{KKQU_{1,1}} & J_{QU_{1,2}} & J_{QU_{1,3}} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & J_{QU_{1,19}} \\
 J_{QU_{2,1}} & J_{KKQU_{2,2}} & J_{QU_{2,3}} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & J_{QU_{2,19}} \\
 J_{QU_{3,1}} & J_{QU_{3,2}} & J_{KKQU_{3,3}} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & J_{QU_{3,19}} \\
 J_{QU_{4,1}} & J_{QU_{4,2}} & J_{QU_{4,3}} & J_{KKQU_{4,4}} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & J_{QU_{4,19}} \\
 \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & J_{KKQU_{k,j}} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\
 \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & J_{KKQU_{k,j}} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\
 \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & J_{KKQU_{k,j}} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\
 J_{QU_{17,1}} & J_{QU_{17,2}} & J_{QU_{17,3}} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & J_{KKQU_{17,17}} & \cdot & \cdot & J_{QU_{17,19}} \\
 J_{QU_{18,1}} & J_{QU_{18,2}} & J_{QU_{18,3}} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & J_{KKQU_{18,18}} & \cdot & J_{QU_{18,19}} \\
 J_{QU_{19,1}} & J_{QU_{19,2}} & J_{QU_{19,3}} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & J_{KKQU_{19,19}}
 \end{pmatrix}$$

Расчетные выражения для определения элементов  $J_{QU}$ ,  $J_{P\delta}$ ,  $J_{PU}$ ,  $J_{Q\delta}$  представлены в работе [7].

Если пренебречь фазовым углом, то полный дифференциал функции напряжения можно записать в виде

$$dU_i = \sum_{j=1}^N \frac{\partial U_i}{\partial P_j} \cdot dP_j + \sum_{j=1}^N \frac{\partial U_i}{\partial Q_j} \cdot dQ_j, \quad (5)$$

или упрощенно

$$dU_i = \sum_{j=1} k_i \cdot dS_j.$$

Под коэффициентом  $k_i$  (В/В·А) понимается степень влияния мощности нагрузки  $S_j$  в  $j$ -м узле на напряжение в  $i$ -м и определяется на основе представленных выше частных производных.

Матрица инцидентности для схемы замещения имеет вид:

$$M := \begin{pmatrix}
 -1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1
 \end{pmatrix}.$$

Результаты расчета значений коэффициентов чувствительности  $k_i$  по напряжению (В/В·А) к изменению нагрузки в некоторых узлах представлены на рис. 4.

Таким образом, степень влияния электровозов на параметры режимов системы тягового электроснабжения оценивается по коэффициентам, полученным на основе частных производных (элементов матрицы Якоби). Вклад отдельных электровозов в изменение напряжения в произвольном узле тяговой сети рассчитывается по выражению (5). Вклад мощности  $k$ -х тяговых нагрузок в загрузку фидеров тяговых подстанций  $\Delta\omega_k$  определяется на основе мгновенных схем замещения с оценкой состояния по данным измерений методом наименьших квадратов.

Наличие синхронизированных измерительных систем, расположенных на электровозе и на тяговых подстанциях, позволяет определить влияние мощности электроподвижного состава



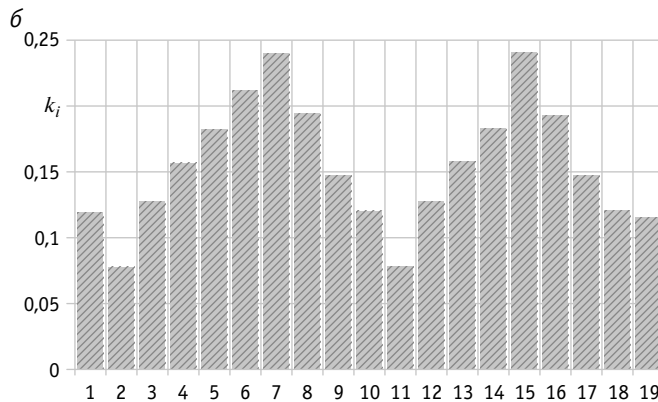
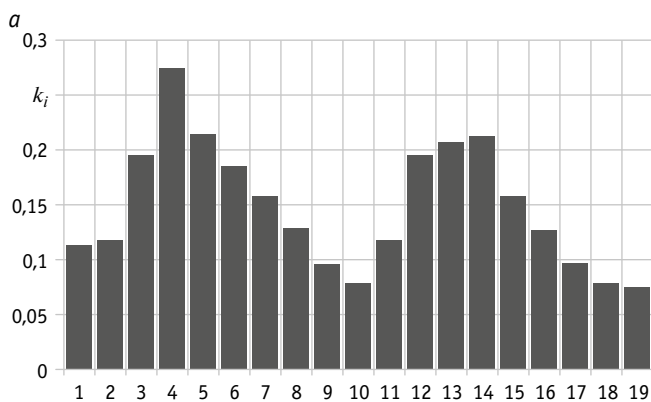


Рис. 4. Значения коэффициентов чувствительности  $k_i$  по напряжению к изменению нагрузки по узлам схемы замещения: а — увеличение нагрузки  $S_4$  на 100 %; б — увеличение нагрузки  $S_8$  на 50 % и  $S_4$  на 100 %

на загрузку тяговых подстанций и параметры режима системы тягового электроснабжения (прежде всего по напряжению).

Управление электротяговыми нагрузками целесообразно осуществлять исходя из следующих условий:

ограничений мощности системы тягового электроснабжения (снижение/смещение пиков нагрузки);

ограничений напряжений на лимитирующем участке межподстанционной зоны;

минимизации потерь мощности/электроэнергии в системе тягового электроснабжения;

минимизации расхода электроэнергии и оптимизации эксплуатационных показателей при соблюдении графика движения поездов;

повышения доли рекуперированной электроэнергии электроподвижным составом;

повышения пропускной способности участка за счет изменения ограничений системы тягового электроснабжения.

В рамках решаемых задач рассмотрим управление электротяговыми нагрузками в условиях ограничений мощности энергетической инфраструктуры на исследуемом участке.

На участке перегона Ш–С отсутствует движение электровазов, оборудованных рекуперативным торможением. Математическая постановка реализации режимов работы электроподвижного состава применительно к этому участку может быть выполнена на основе оптимального приращения мощности электровазов при обеспечении заданного (или корректированного) графика движения поездов.

Технологию управления электротяговыми нагрузками на межподстанционной зоне двухпутного участка переменного тока путем корректировки графика движения и параметров режимов электроподвижного состава (режим, позиция, скорость, мощность) и системы тягового электроснабжения (при наличии устройств регулирования) целесообразно реализовать на основе самоорганизующейся мультиагентной системы [8, 9].

В качестве модели управления электротяговыми нагрузками системы электроснабжения железных дорог при заданных ограничениях мощности (напряжения) в заданный период времени предлагается подход, который заключается в максимизации мощности подключенных тяговых нагрузок с учетом чувствительности нагрузки фидера тяговой подстанции к из-

менению нагрузки электровазов, ценовой характеристики нагрузки, приоритета нагрузки:

$$F(y_k) = \sum_{k=1}^m P_k \cdot v_k \cdot \Delta\omega_k \cdot y_k \rightarrow \max \quad (6)$$

при ограничениях:

$$y_{k \min}, y_{k \max} \in (0-1); v_k, \Delta\omega_k \in (0-1);$$

$$\sum_{k=1}^m P_k \cdot y_k \leq P_{\text{оп}};$$

$$U_{k \min} \leq U_k < U_{k \max}; P_{k \min} \leq P_k < P_{k \max};$$

$$y_{k \min} \leq y_k < y_{k \max};$$

$$P_k \in B; G,$$

где  $v_k$  — приоритет нагрузки (в диапазоне 0–1);  $\Delta\omega_k$  — коэффициент чувствительности мощности фидера тяговой подстанции к изменению мощности  $k$ -го электроваза (в диапазоне 0–1);  $y_k$  — коэффициент загрузки (в диапазоне 0–1);  $m$  — число тяговых нагрузок на межподстанционной зоне;  $P_k$  — мощность  $k$ -й тяговой нагрузки (тяга, рекуперация) без управления спросом;  $P_{\text{оп}}$  — опорная мощность по фидеру тяговой подстанции (учитывает степень загрузки и потери мощности в тяговой сети);  $U_k$  — напряжение на токоприемнике  $k$ -го электроваза;  $B$  — допустимый набор электровазов в соответствии с графиком движения, прочих логических условий, соответствующих спискам смежности;  $G$  — список смежности, описывающий связи тяговых нагрузок, входящих в технологическую операцию процесса движения поездов.

Коэффициент чувствительности нагрузки фидера тяговой подстанции к изменению нагрузки  $k$ -го электроваза  $\Delta\omega_k$  рассчитывается на основе выражения (5) по заданной мгновенной схеме замещения тяговой сети.

Предельная потребляемая мощность электроваза в каждый момент времени по данным местоположения поездов на межподстанционной зоне и измеренным (рассчитанным)

параметрам режимов системы тягового электроснабжения (напряжение на токоприемнике, нагрузка фидеров контактной сети и линий внешнего электроснабжения тяговых подстанций) (корректировка графика движения) определяется с использованием приращений мощности электровозов

$$\Delta P_k \pm P_k \cdot y_k. \quad (7)$$

На основе допустимых мгновенных приращений потребляемой и генерируемой (в режиме рекуперации) мощности электровозов выполняется мгновенный тяговый расчет с определением тягово-энергетических параметров движения поезда, обеспечивающих заданную тяговую нагрузку на участке.

Представленный подход к управлению тяговыми нагрузками в условиях ограничений мощности энергетической инфраструктуры может быть реализован при условии прогнозирования параметров поезда до 1 ч. Прогнозирование может выполняться встроенными функциями на основе статистических моделей.

Рассмотрим реализацию предлагаемого подхода на примере исследуемой схемы замещения для одного момента времени. Основные данные и результаты расчетов приведены в табл. 1.

Результатом решения задачи (6) является множество  $y_k = \{y_1, y_2, y_3, \dots, y_k\}$ ,  $y_k \in (0 - 1)$ , в соответствии с которым определяются управляющие воздействия через мгновенный тяговый расчет по значениям  $\Delta P_k$ . Если мощность тяговых нагрузок превышает заданную величину, то  $\Delta P_k$  рассчитываются для  $k$ -го электровоза, при этом учитываются приоритет нагрузки и чувствительность нагрузки фидера тяговой подстанции к изменению нагрузки  $k$ -го электровоза. Мгновенный тяговый расчет движения поезда по данным измерений в реальном времени дает возможность контролировать энергетические параметры локомотивов в межподстанционной зоне (потребляемый ток, мощность, коэффициент мощности, напряжение на токоприемнике) и связывать их со скоростью движения, позицией, режимом работы при учете местоположения, профиля пути.

Управление электротяговыми нагрузками на основе взаимодействия с системой электроснабжения железных дорог позволяет, во-первых, перейти от межпоездных интервалов, полученных по данным тягового расчета, к интервалам, определяемым при помощи фактических параметров режима системы тягового электроснабжения и фактических электротяговых нагрузок в реальном времени, во-вторых, обеспечить снижение пиковых мощностей электротяговых нагрузок за счет согласования их взаимных режимов, включая тягу и рекуперацию, и повысить пропускную способность участка.

Представленный метод координированного управления электроподвижным составом с учетом мгновенной загрузки и параметров режимов работы системы электроснабжения в реальном времени может служить основой для корректировки индивидуальных энергооптимальных графиков движения поездов, что будет предметом дальнейших исследований авторов.

Таблица 1

Основные данные и результаты расчетов

Показатель	Значение для тяговых нагрузок (см. рис. 3)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$v_k$	–	1	0,9	–	1	–	0,6	0,8	–	0,7
$\Delta\omega_{k1}$	0,94	0,82	0,71	0,62	0,43	0,35	0,25	0,19	0,11	0,07
$\Delta\omega_{k25}$	0,05	0,17	0,28	0,37	0,51	0,6	0,69	0,74	0,85	0,91
$P_{оп} = 15,9 \text{ МВт}, \sum_{k=1}^m P_k = 15,9 \text{ МВт}$										
$S_k = P_k + iQ_k, \text{ МВт}$	–	$4 + i3,28$	$3 + i2,46$	–	–	–	$3,1 + i2,7$	$3,3 + i2,8$	–	$2,5 + i2,05$
$U_k, \text{ кВ}$	26,87	24,56	24,52	25,0	26,63	26,79	24,71	24,46	25,24	26,64
$y_k$	–	1	1	–	–	–	1	1	–	1
$P_{оп} = 15,9 \text{ МВт}, \sum_{k=1}^m P_k = 17,8 \text{ МВт}$										
$y_k$	–	1	0,89	–	–	–	0,75	0,75	–	–
$U_k, \text{ кВ}$	26,15	24,59	24,55	24,98	25,81	26,15	24,66	24,58	24,73	25,81
$S_k = P_k + iQ_k, \text{ МВт}$	–	$4 + i3,28$	$3 + i2,46$	–	$1,9 + i2,0$	–	$3,1 + i2,7$	$3,3 + i2,8$	–	$2,5 + i2,05$
$\Delta P_k = \pm P_k \cdot y_k, \text{ МВт}$	–	0	–0,32	–	–	–	–0,17	–0,31	–	1,1

**Сведения об авторах:**

**Евгений Александрович Третьяков**, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Подвижной состав электрических железных дорог» Омского государственного университета путей сообщения

**Илья Николаевич Денисов**, заведующий лабораторией кафедры «Подвижной состав электрических железных дорог» Омского государственного университета путей сообщения

**Егор Геннадьевич Авдиенко**, аспирант кафедры «Подвижной состав электрических железных дорог» Омского государственного университета путей сообщения

**Authors information:**

**Evgeniy A. Tretyakov**, DSc in Engineering, Associate Professor, Professor of Electric Rolling Stock Department, Omsk State Transport University

**Ilya N. Denisov**, Head of Laboratory of Electric Rolling Stock Department, Omsk State Transport University

**Egor G. Avdienko**, postgraduate student of Electric Rolling Stock Department, Omsk State Transport University

**Литература**

1. Стратегия научно-технологического развития холдинга «РЖД» на период до 2025 года и на перспективу до 2030 года (Белая книга). Москва; Санкт-Петербург, 2018. 128 с.
2. Третьяков Е. А., Малышева Н. Н. Управление спросом со стороны активных потребителей в интеллектуальных электроэнергетических системах // Труды НГТУ им. Р. Е. Алексеева. 2020. № 1 (128). С. 75–85. DOI: 10.46960/1816-210X\_2020\_1\_75.
3. Khayyam S., Berr N., Fleck M. [и др.]. Railway System Energy Management Optimization Demonstrated at Offline and Online Case Studies // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 2018. Vol. 19. No. 11. Pp. 3570–3583. DOI: 10.1109/TITS.2018.2855748.
4. Гаранин М. А., Блинкова С. А. Расчет энергообеспеченности перевозочного процесса и усиление системы тягового электроснабжения // Транспорт Урала. 2014. № 3. С. 109–114. ISSN 1815-9400.
5. Саблин О. И., Бондарь О. И. Рациональное регулирование установленной мощности тягового средства в процессе движения // Электрификация транспорта. 2011. № 2. С. 68–71. ISSN 2307-4221.
6. Полянов В. В. Методика моделирования электромагнитной совместимости на участках тяжеловесного движения поездов // Вестник УрГУПС. 2016. № 2. С. 119–127. DOI:10.20291/2079-0392-2016-2-119-127.
7. Yassami H., Bayat F., Jalilvand A., Rabiee A. Coordinated voltage control of wind-penetrated power systems via state feedback control // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2017. No. 93. Pp. 384–394.
8. Нехороших И. Н. Инновационные механизмы управления спросом на электрическую энергию: обзор мирового опыта и оценка перспектив его применения в России // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Экономика. Социология. Менеджмент. 2019. Т. 9. № 2. С. 17–25. ISSN 2223-1552.
9. Баранов Л. А., Сафронов А. И., Сидоренко В. Г. Планирование движения поездов в интеллектуальных транспортных системах // Надежность. 2022. № 22 (3). С. 35–43. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2022-22-3-35-43>.

**References**

1. The strategy of scientific and technological development of the Russian Railways holding for the period up to 2025 and for the future up to 2030 (White Book) [Strategiya nauchno-tekhnologicheskogo razvitiya kholdinga «RZhD» na period do 2025 goda i na perspektivu do 2030 goda (Belaya kniga)]. Moscow; St. Petersburg, 2018. 128 p.
2. Tretyakov E. A., Malysheva N. N. Managing demand from active consumers in smart power systems [Upravlenie sprosom so storony aktivnykh potrebitel'ey v intellektual'nykh elektroenergeticheskikh sistemakh]. *Proceedings of NNSTU named after R. E. Alekseev*. 2020. No. 1 (128). Pp. 75–85. DOI: 10.46960/1816-210X\_2020\_1\_75.
3. Khayyam S., Berr N., Fleck M. [et al.]. Railway System Energy Management Optimization Demonstrated at Offline and Online Case Studies. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2018. Vol. 19. No. 11. Pp. 3570–3583. DOI: 10.1109/TITS.2018.2855748.
4. Garaniin M. A., Blinkova S. A. Analysis of power supply status of transportation process and improvement of traction power system [Raschet energoobespechennosti perevoznogo protsessa i usilenie sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya]. *Transport of the Urals*. 2014. No. 3. Pp. 109–114. ISSN 1815-9400.
5. Sablin O. I., Bondar' O. I. Rational regulation of the installed power of the traction device during movement [Ratsional'noe regulirovanie ustanovlennoy moshhnosti tyagovogo sredstva v protsesse dvizheniya]. *Electrication of transport*. 2011. No. 2. Pp. 68–71. ISSN 2307-4221.
6. Polyanov V. V. Method for simulating of electromagnetic compatibility on heavy-weight railway traffic sections [Metodika modelirovaniya elektromagnitnoy sovmestimosti na uchastkakh tyazhelovesnogo dvizheniya poezdov]. *Herald of USURT*. 2016. No. 2 (30). Pp. 119–127. DOI:10.20291/2079-0392-2016-2-119-127.
7. Yassami H., Bayat F., Jalilvand A., Rabiee A. Coordinated voltage control of wind-penetrated power systems via state feedback control. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2017. No. 93. Pp. 384–394.
8. Nehoroshih I. N. Innovative mechanisms of control demand for electric power: a review of international experience and assessment of the prospects of its application in Russia [Innovatsionnye mekhanizmy upravleniya sprosom na elektricheskuyu energiyu: obzor mirovogo opyta i otsenka perspektiv ego primeneniya v Rossii]. *Proceedings of the Southwest State University. Series: Economy. Sociology. Management*. 2019. Vol. 9. No. 2. Pp. 17–25. ISSN 2223-1552.
9. Baranov L. A., Safronov A. I., Sidorenko V. G. Train traffic planning in intelligent transportation systems [Planirovanie dvizheniya poezdov v intellektual'nykh transportnykh sistemakh]. *Dependability*. 2022. No. 22 (3). Pp. 35–43. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2022-22-3-35-43>.

Объем статьи 0,8 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
X	X	X	X	X	X						

**Куда**

(почтовый индекс)

(адрес)

**Кому**

(фамилия, инициалы)

**ДОСТАВОЧНАЯ КАРТОЧКА**

на ~~газету~~  
журнал

**46463**

(индекс издания)

ПВ	место	литер

**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
X	X	X	X	X	X						

**Куда**

(почтовый индекс)

(адрес)

**Кому**

(фамилия, инициалы)

Научно-технический журнал «Транспорт Урала»

DOI:10.20291/1815-9400

№ 1 (80), 2024 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) 221-23-90

<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) 221-23-90, 8-912-61-07-229,

e-mail: [EPupova@usurt.ru](mailto:EPupova@usurt.ru)

Верстка и дизайн:

Андрей Викторович Трубин

Автор фотографии на обложке:

Дмитрий Васильевич Поморцев

Журнал включен ВАК в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук

Подписано в печать 29.03.2024

Выход в свет 13.05.2024

Тираж 250 экз. (1-й з-д 1–40)

Формат 60×90/8

Цена 663,76 руб.

Изготовлено в ИБК УрГУПС,

620034, Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66

Заказ № 25

© ФГБОУ ВО «Уральский государственный университет путей сообщения», 2024