

# ТРАНСПОРТ

НАУЧНО - ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

## УРАЛ

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИПОРТОВОГО  
ТРАНСПОРТНОГО УЗЛА**

**РЕГУЛИРУЮЩАЯ РОЛЬ УПРАВЛЯЮЩЕЙ КОМПАНИИ  
В ТРАНСПОРТНОМ ХОЛДИНГЕ**

**КОНЦЕПЦИЯ АРХИТЕКТУРЫ ПЛАТФОРМЫ  
ЦИФРОВОЙ ЭКОСИСТЕМЫ ЛОГИСТИЧЕСКОЙ СРЕДЫ  
ЦЕПЕЙ ПОСТАВОК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОНТЕЙНЕРНЫХ ПЕРЕВОЗОК**

**МЕТОДИКА ФОРМИРОВАНИЯ  
ИНДИВИДУАЛЬНОГО РЕЙТИНГА ГРУЗОТПРАВИТЕЛЕЙ**

**ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ АНДЕРВУДА  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ  
РАДИОЛОКАЦИОННОГО ДЕТЕКТОРА ТРАНСПОРТА**







### 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. Колокольников Виталий Сергеевич, д-р техн. наук, доцент, Екатеринбург
6. Куренков Петр Владимирович, д-р экон. наук, профессор, Москва
7. Лапшин Василий Федорович, д-р техн. наук, профессор, Екатеринбург
8. Ларин Олег Николаевич, д-р техн. наук, профессор, Москва
9. Ледяев Александр Петрович, д-р техн. наук, профессор, Санкт-Петербург
10. Локтев Алексей Алексеевич, д-р физ.-мат. наук, профессор, Москва
11. Мартыненко Александр Валериевич, канд. физ.-мат. наук, доцент, Екатеринбург
12. Неволин Дмитрий Германович, д-р техн. наук, доцент, Екатеринбург
13. Сай Василий Михайлович, д-р техн. наук, профессор, зам. главного редактора, Екатеринбург
14. Сирина Нина Фридриховна, д-р техн. наук, профессор, Екатеринбург
15. Смольянинов Александр Васильевич, д-р техн. наук, профессор, Екатеринбург
16. Тушин Николай Андреевич, д-р техн. наук, доцент, Екатеринбург
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. Kolokolnikov Vitaliy Sergeevich, DSc, associate professor, Ekaterinburg
6. Kurenkov Petr Vladimirovich, DSc, professor, Moscow
7. Lapshin Vasilii Fedorovich, DSc, professor, Ekaterinburg
8. Larin Oleg Nikolaevich, DSc, professor, Moscow
9. Ledyayev Alexander Petrovich, DSc, professor, St. Petersburg
10. Loktev Alexey Alexeevich, DSc, professor, Moscow
11. Martynenko Alexander Valerievich, PhD, associate professor, Ekaterinburg
12. Nevolin Dmitriy Germanovich, DSc, associate professor, Ekaterinburg
13. Say Vasilii Mikhaylovich, DSc, professor, deputy editor-in-chief, Ekaterinburg
14. Sirina Nina Fridrikhovna, DSc, professor, Ekaterinburg
15. Smolyaninov Alexander Vasilyevich, DSc, professor, Ekaterinburg
16. Tushin Nikolay Andreevich, DSc, associate professor, Ekaterinburg
17. Yakunin Nikolay Nikolaevich, DSc, professor, Orenburg

**ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ТРАНСПОРТА**

<i>О. В. Осакин, В. С. Колокольников, А. А. Муравьев.</i> Моделирование припортового транспортного узла.....	3
<i>П. А. Козлов, В. П. Козлова, Т. И. Бушуева.</i> Регулирующая роль управляющей компании в транспортном холдинге.....	10
<i>А. В. Ахромешин.</i> Методика формирования устойчивых паттернов транспортного поведения индивидов на основе предыдущего опыта и информирования о текущем состоянии транспортной системы .....	14

**ПОДВИЖНОЙ СОСТАВ И ТЯГА**

<i>С. М. Овчаренко, А. С. Анисимов.</i> Исследование параметров работы систем охлаждения на тепловозах при различных условиях эксплуатации .....	22
<i>Е. Е. Мирошниченко.</i> Исследование неравномерности воздушного зазора в вентильно-индукторной машине тягового исполнения .....	28

**ВАГОНЫ И ВАГОННОЕ ХОЗЯЙСТВО**

<i>А. Е. Афанасьев, А. А. Богданович, Н. В. Пекин.</i> Разработка методики для оценки ресурса шкворневых узлов вагонов-хопперов.....	34
--	----

**ГРУЗОВЫЕ И ПАССАЖИРСКИЕ ПЕРЕВОЗКИ**

<i>А. О. Шмидт, Н. А. Тушин.</i> Организация пригородных пассажирских перевозок на основе сбалансированной оптимизационной модели .....	39
<i>К. Е. Ковалев, А. В. Новичikhin.</i> Методика распределения зон управления оперативного персонала на станциях малоинтенсивных железнодорожных линий.....	45

**ТРАНСПОРТНО-ЛОГИСТИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ**

<i>С. Н. Глазов, А. С. Трошин, Е. В. Мирошников, И. А. Новиков.</i> Концепция архитектуры платформы цифровой экосистемы логистической среды цепей поставок с использованием контейнерных перевозок .....	50
<i>Е. Д. Псеровская, Д. А. Багманов.</i> Повышение уровня маршрутизации угля за счет организации маршрутообразования на опорных станциях.....	57
<i>Д. С. Завалишин, А. Д. Хазимуллин, Г. А. Тимофеева.</i> Методика формирования индивидуального рейтинга грузоотправителей.....	62
<i>А. Т. Попов, О. А. Суслова, М. А. Чехов, А. И. Малахов.</i> Технология железнодорожных перевозок собственными локомотивами на примере перевозок железорудного сырья.....	68
<i>Д. В. Ушаков.</i> Многофакторность задач логистического оператора в логистической транспортной системе по обработке скоропортящихся грузов.....	74

**АВТОМОБИЛЬНЫЙ ТРАНСПОРТ**

<i>И. И. Таракховский, А. Ю. Михайлов.</i> Оценка параметров модели Андервуда с использованием данных радиолокационного детектора транспорта .....	79
<i>Н. И. Григоренко.</i> Сравнение систем адаптивного круиз-контроля для автономных и управляемых человеком транспортных средств.....	85

**ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ**

<i>Е. Ю. Тряпкин, Н. К. Шутова.</i> Снижение гальванического влияния обратной рельсовой сети на устройства СЦБ .....	92
--	----

**GENERAL TRANSPORT PROBLEMS**

<i>O. V. Osokin, V. S. Kolokolnikov, A. A. Muravov.</i> Simulation of a portside transport hub.....	3
<i>P. A. Kozlov, V. P. Kozlova, T. I. Bushueva.</i> Management company's regulatory role in transport holding.....	10
<i>A. V. Akhromeshin.</i> Methodology of forming stable patterns of transport behavior of individuals based on previous experience and information about current state of transport system .....	14

**ROLLING STOCK AND TRACTION**

<i>S. M. Ovcharenko, A. S. Anisimov.</i> Investigation of parameters for cooling systems on diesel locomotives under various operating conditions.....	22
<i>E. E. Mirashnichenko.</i> Investigation for unevenness of air gap in a valve-inductor traction machine.....	28

**RAILWAY CARS AND CARRIAGE EQUIPMENT**

<i>A. E. Afanasyev, A. A. Bogdanovich, N. V. Pekin.</i> Development of methodology for estimating the resource of pivot assemblies for hopper cars.....	34
---	----

**CARGO AND PASSENGER TRANSPORTATION**

<i>A. O. Shmidt, N. A. Tushin.</i> Organization of suburban passenger transportation based on a balanced optimization model.....	39
<i>K. E. Kovalev, A. V. Novichikhin.</i> Methodology of distributing zones of operational staff control at stations of low-intensive railway lines .....	45

**TRANSPORT AND LOGISTICS PROCESSES**

<i>S. N. Glagolev, A. S. Troshin, E. V. Mirashnikov, I. A. Novikov.</i> Concept of digital ecosystem platform architecture for supply chain logistics environment using container transportation .....	50
<i>E. D. Pserovskaya, D. A. Bagmanov.</i> Increasing the level of coal routing through the organization of route formation at combination stations.....	57
<i>D. S. Zavalishchin, A. D. Khazimullin, G. A. Timofeeva.</i> Methodology for forming an individual rating of shippers.....	62
<i>A. T. Popov, O. A. Suslova, M. A. Chekhov, A. I. Malakhov.</i> Technology of railway transportation by own locomotives on example of transportation of iron ore raw materials .....	68
<i>D. V. Ushakov.</i> Multifactorial tasks of a logistics operator in a logistics transport system for handling perishable goods.....	74

**MOTOR TRANSPORT**

<i>I. I. Tarakhovsky, A. Yu. Mikhailov.</i> Assessing the parameters of the Underwood model using transport radar data .....	79
<i>N. I. Grigorenko.</i> Comparison of adaptive cruise control systems for autonomous and human-controlled vehicles.....	85

**ELECTRIC SUPPLY**

<i>E. Yu. Tryapkin, N. K. Shurova.</i> Reducing the galvanic influence of the return rail network on the signaling and circuit devices .....	92
--	----



Научная статья  
УДК 656.213

## Моделирование припортового транспортного узла

Олег Викторович Осокин<sup>1</sup>, Виталий Сергеевич Колокольников<sup>2</sup>, Андрей Алексеевич Муравьев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ООО «Аналитические и управляющие системы на транспорте «Транспортный алгоритм»», Москва, Россия

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

## Simulation of a portside transport hub

Oleg V. Osokin<sup>1</sup>, Vitaliy S. Kolokolnikov<sup>2</sup>, Andrey A. Muravyov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Analytical and controlling systems in transport «Transport algorithm» LLC, Moscow, Russia

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

### Аннотация

В статье рассматривается применение метода имитационного моделирования при оценке вариантов развития припортового транспортного узла. Анализируются возможные сценарии развития инфраструктуры и технологии работы путей необщего пользования и станций примыкания. Приводятся результаты экспериментов по выбору рационального варианта, выполненные с использованием системы имитационного моделирования ИСТРА, и делается их сравнение. Подчеркивается важность применения имитационного моделирования для корректного расчета транспортных объектов и обеспечения их рационального развития.

**Ключевые слова:** транспортный узел, станция, имитационное моделирование, пути необщего пользования, развитие транспортной инфраструктуры

### Abstract

The article considers the application of the simulation modeling method in assessing the development options for a portside transport hub. Possible scenarios for the development of infrastructure and technology for the operation of non-public tracks and junction stations are analyzed. The results of experiments on choosing a rational option, performed using the ISTRA simulation modeling system, are presented and compared. The importance of using simulation modeling for the correct calculation of transport facilities and ensuring their rational development is emphasized.

**Keywords:** transport hub, station, simulation modeling, non-public ways, development of transport infrastructure

DOI: 10.20291/1815-9400-2025-4-3-9

### ВВЕДЕНИЕ

Припортовые транспортные узлы, представляющие собой место стыка различных видов транспорта — морского, железнодорожного, автомобильного, трубопроводного, относятся к числу наиболее сложных объектов для расчета. Мероприятия по их развитию, как правило, требуют существенных затрат и сопряжены с высокими инвестиционными рисками [1]. Поэтому корректность методов расчета таких объектов приобретает исключительно важное значение.

В последнее время все более широкое распространение получает метод имитационного моделирования, что находит отражение в нормативных документах [2, 3]. Имитационные модели позволяют подробно отображать структуру и технологию работы транспортных объектов, учитывать диспетчерское управление, влияние случайных факторов и неравномерностей в обслуживании, а также проводить большое количество экспериментов для разных вариантов и условий работы [4–7].

### ИССЛЕДОВАНИЕ ВАРИАНТОВ РАЗВИТИЯ НА МОДЕЛИ

В условиях роста перспективных размеров перевозок и необходимости их освоения перед авторами статьи была поставлена задача определить оптимальные технические и технологические мероприятия по развитию портовых путей необщего пользования и станции примыкания ОАО «РЖД».

Работа выполнялась с использованием системы ИСТРА-САПР компании «Транспортный алгоритм» в соответствии с методикой [3], утвержденной ОАО «РЖД».

В созданной имитационной модели детально задана инфраструктура станции примыкания А и путей необщего пользования (рис. 1), отображена существующая и планируемая технология работы узла, учтены средние и максимальные размеры поездопотоков, а также фактические и перспективные объемы грузовых работ.

При моделировании в различных комбинациях изменялись инфраструктура станций, грузопотоки, ритмичность подхода поездов, количество локомотивов. Всего было рассмотрено около 40 сценариев работы железнодорожного узла (табл. 1). В одном из вариантов развития в модель дополнительно добавлена инфраструктура станции Н сети РЖД.

Таблица 1

Сценарии моделирования

Железнодорожная инфраструктура	Поездотоки по станции А	Количество поездов в сутки		
		6	7	8 и более
Существующая на текущий год	Максимальные на текущий год	1А	1Б	1В
Существующая на текущий год	Только поезда грузополучателя	—	—	2 и 2А
Удлинение двух путей на станции А	Максимальные на текущий год	3А	4	4А, 4Б, 4В
Удлинение двух путей на станции А и устройство вытяжного пути грузополучателя	Максимальные на текущий год	—	—	4Г, 4Д
Удлинение четырех путей на станции А	Максимальные на текущий год	—	—	5, 5А
Технология с парком Н и удлинением двух путей станции Н	Максимальные на текущий год	6	6А	6Б
Удлинение путей грузополучателя до 71 усл. ваг.	Максимальные на текущий год	7А	7Б	7В
Удлинение двух путей на станции А, устройство вытяжного пути грузополучателя и удлинение путей грузополучателя до 71 усл. ваг.	Максимальные на текущий год	—	—	9А, 9Б
Электрификация путей грузополучателя и полная маршрутизация с удлинением путей грузополучателя до 71 усл. ваг.	Максимальные на текущий год	10	10А	10Б, 10В
Уменьшение длины поезда по отправлению до 62 усл. ваг.	Максимальные на текущий год	—	—	11

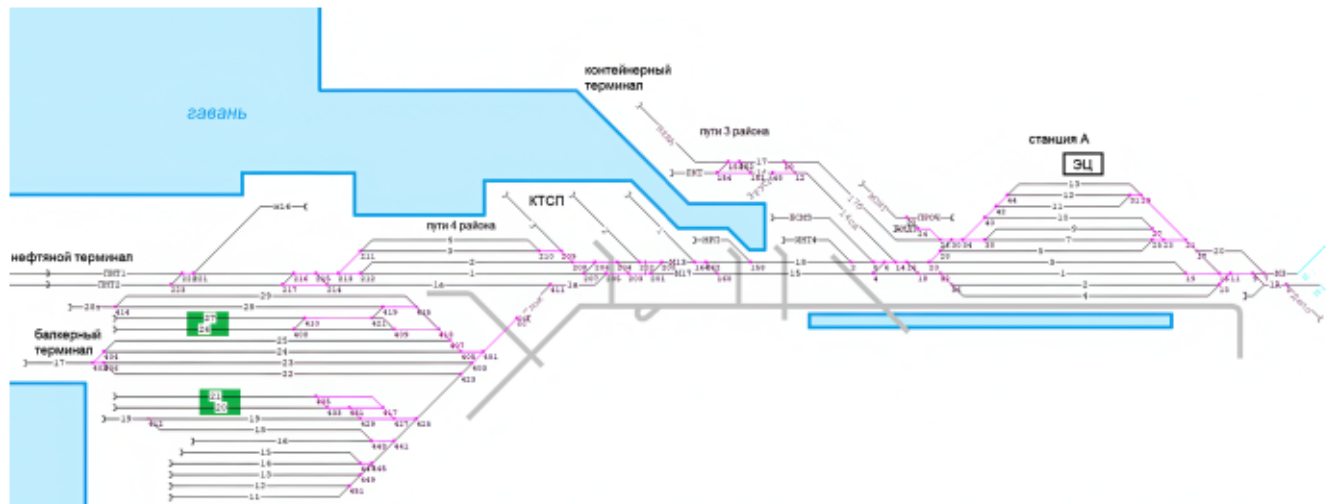


Рис. 1. Схема узла в модели

В первую очередь на модели были проверены возможности существующей инфраструктуры. В базовом варианте задано прибытие в адрес грузополучателя 6 поездов ежедневно. Экспериментально подтверждено, что этот поток уверенно перерабатывается.

В последующих расчетах количество поездов увеличивали. При добавлении седьмого поезда значительно возросла нагрузка путей, стрелочных горловин и локомотивов. Критично увеличились задержки из-за стрелок четной горловины станции А, что не позволило переработать восьмой поезд в адрес грузополучателя.

На графике выполненной работы по результатам эксперимента (рис. 2) видна неравномерная загрузка путей станции А: в пиковые периоды имеющихся путей недостаточно; в ряде случаев свободные пути есть, но их не удается использовать

из-за занятых стоящими вагонами и локомотивами стрелочных горловин.

При этом модель показала, что в работе инфраструктуры грузополучателя имеются резервы: загрузка его путей и фронтов позволяет переработать больший вагонопоток.

В соответствии с полученными результатами проводились эксперименты по определению максимальной перерабатывающей способности инфраструктуры грузополучателя. Из модели были исключены потоки других клиентов станции А — оставлены только поезда, прибывающие в адрес грузополучателя.

Расчеты показали, что среднесуточно при подходе 8 поездов уверенно перерабатываются 473 вагона. При дальнейшем увеличении поездотока узким местом становятся маневровые локомотивы грузополучателя. Добавление дополнительного локомотива позволит переработать поток в 9 поездов (531



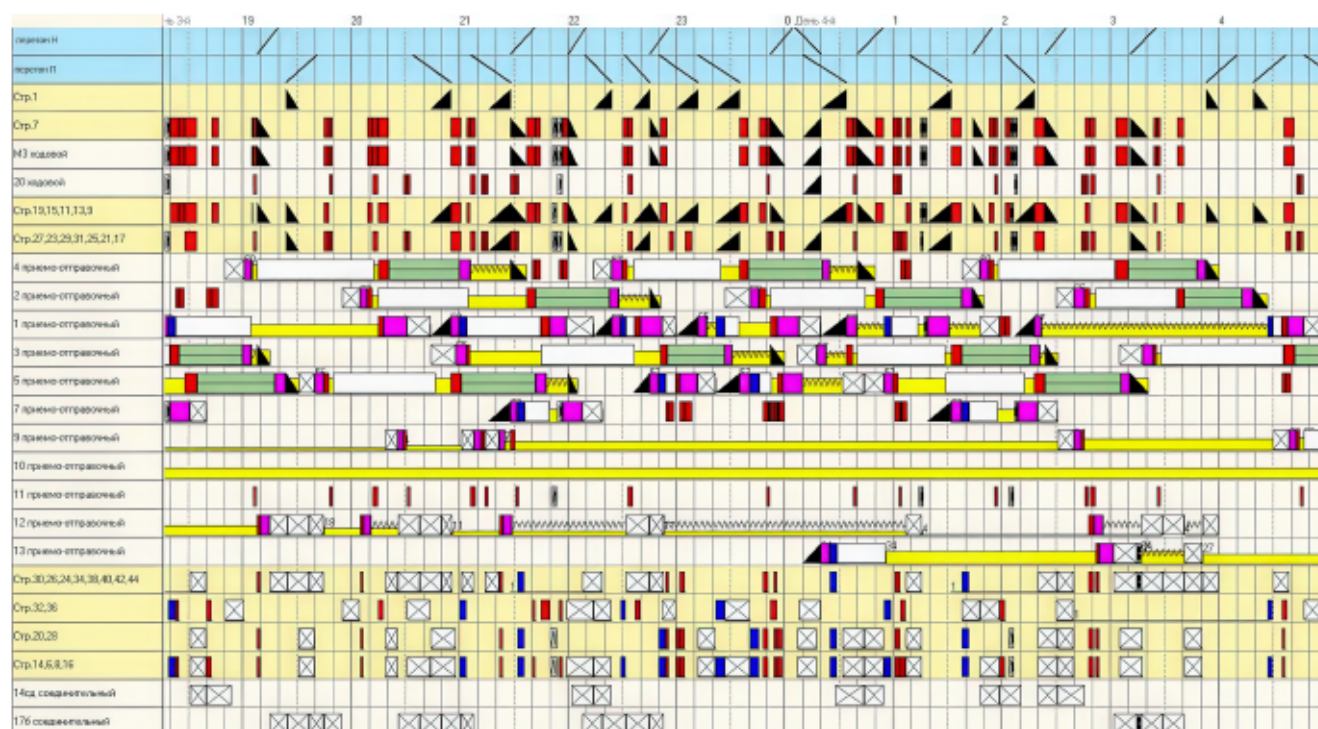


Рис. 2. Фрагмент графика исполненной работы станции А

вагон в сутки). Дальнейший рост потока ограничен высокой занятостью стрелочной горловины грузополучателя.

Последующие сценарии расчетов были связаны с вариантами развития станции примыкания ОАО «РЖД» — удлинением ее приемо-отправочных путей. Это мероприятие позволяет сократить занятость горловины станции А в операциях приема и особенно отправления поездов.

Эксперимент на модели с удлинением двух путей станции А показал эффективность. Однако при этом критически увеличиваются задержки из-за стрелочной горловины грузополучателя. Для дальнейшего роста грузопотока необходимо строительство дополнительного вытяжного пути грузополучателя со стороны станции примыкания А. Расчеты по данному сценарию подтвердили целесообразность такого мероприятия. Устройство вытяжного пути позволит увеличить грузопоток и освоить запланированные объемы перевозок. При этом задержки из-за горловины грузополучателя снизятся почти в 2 раза.

Авторами был проверен вариант реконструкции станции Н, расположенной рядом со станцией примыкания А. Чтобы использовать ее для обработки поездов, необходимы удлинение путей, реконструкция двух горловин станции Н. Однако расчеты показали, что развитие станции Н не даст эффекта, поскольку при этом сохраняется узкое место по станции А. Привлечение дополнительного локомотива станции А также не целесообразно.

Следующие сценарии расчетов были связаны с удлинением приемо-отправочных путей у грузополучателя. Этот вариант без выполнения других мероприятий оказался неэффективным. Его комбинация с устройством дополнительного вытяжного пути грузополучателя также не позволит достичь нужных

объемов выгрузки, поскольку лимитирующим местом остается станция А с недостаточной длиной и количеством приемо-отправочных путей.

Таким образом, был сделан вывод: реконструкция путевого развития грузополучателя без развития станции А не дает возможности обеспечить нужный результат.

Дальнейшие эксперименты подтвердили, что при комплексном варианте удлинения путей и строительства вытяжного пути грузополучателя с одновременным удлинением путей станции А можно значительно увеличить перерабатывающую способность рассматриваемого узла. При работе четырех локомотивов грузополучателя среднесуточный объем выгрузки составит 532 вагона (рис. 3). По перерабатывающей способности это лучший вариант из всех рассмотренных.

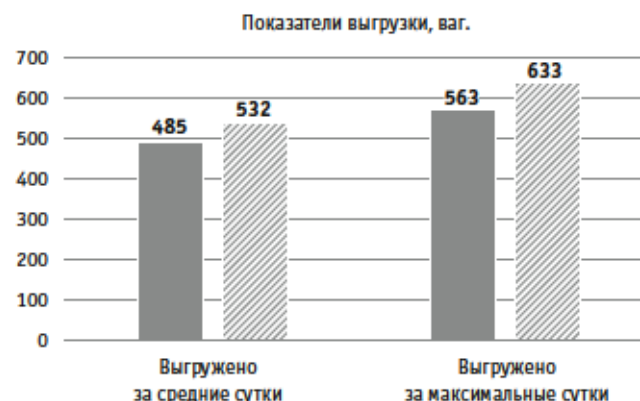


Рис. 3. Объемы переработки при комплексном варианте развития:  
■ — 8 поездов; ▨ — 9 поездов

При моделировании был проверен сценарий, согласно которому планировалась электрификация путей грузополучателя и прием/отправление маршрутов без обработки на станции примыкания А. Указанные мероприятия требуют обязательно удлинения путей грузополучателя и организации на них работы вагонников и приемосдатчиков. Преимуществом такого варианта является почти полная независимость грузополучателя от потоков других клиентов станции примыкания. Из-за увеличения времени обработки каждого поезда по прибытию и отправлению загрузка путей грузополучателя вырастет с 58 до 74 %. Среднесуточный объем выгрузки составит 467 вагонов, что достаточно для освоения перспективных грузопотоков.

На модели дополнительно был проверен вариант без инфраструктурных изменений, предусматривающий уменьшение длины поезда по отправлению до 62 условных вагонов. Это позволит снизить занятость путей и горловин как у грузополучателя, так и на станции примыкания, но потребует периодического использования вывозного локомотива резервом вследствие возникновения непарности поездов по прибытию и отправлению. Данное технологическое мероприятие может быть использовано как временное в период реконструкции.

Помимо перечисленных сценариев, были проведены расчеты по проверке возможности сокращения количества маневровых локомотивов. Для уменьшения загрузки маневровых локомотивов на складских путях грузополучателя может применяться электрическая маневровая лебедка, которая обеспечивает плавное перемещение вагонов в процессе выгрузки, исключая использование локомотива. Это мероприятие показало значительное уменьшение времени полной занятости — с 75,4 %

у четырех локомотивов до 66,4 % у трех локомотивов при сохранении межоперационных простоев на прежнем уровне. Результаты эксперимента позволили сделать вывод, что устройство электрической маневровой лебедки имеет чуть меньшую эффективность для обеспечения объемов выгрузки по сравнению с дополнительным локомотивом, но позволяет сократить потребное количество локомотивов на 1 единицу, обеспечивая выгрузку на уровне 460 вагонов в сутки.

Последовательность выполненных экспериментов показана на рис. 4.

Расчеты проводились в указанном порядке с постепенным увеличением размеров движения и добавлением новых мероприятий или их комбинаций. Критерием было количество выгружаемых вагонов. Такая технология проведения расчетов (имитационный спуск) позволяет сократить количество экспериментов, избегая полного перебора вариантов [8].

Результаты расчетов по всем вариантам приведены в табл. 2, где представлены основные рассмотренные сценарии, достигаемые объемы выгрузки и годовой грузооборот.

На основании полученных результатов были сделаны следующие выводы.

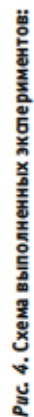
1. Реконструкция станции Н без выполнения реконструкции станции А не дает технологического эффекта.
2. Удлинение двух путей станции А существенно снижает задержки, позволяет увеличить длину поездов и повысить объемы переработки. Мероприятие эффективно.
3. Устройство вытяжного пути грузополучателя необходимо при достижении объемов выгрузки более 450 вагонов в сутки в совокупности с добавлением четвертого локомотива.

Таблица 2

Результаты расчетов по вариантам развития

Варианты мероприятий	Показатели		
	Среднесуточная выгрузка, ваг.	Максимальная выгрузка, ваг./сут	Грузооборот, млн т/год
Без инфраструктурных изменений	394	479	10,07
Технология и реконструкция парка Н	430	497	10,98
Удлинение двух путей станции А + четвертый локомотив грузополучателя	<b>453</b>	<b>515</b>	<b>11,57</b>
Удлинение двух путей станции А и устройство вытяжки + четвертый локомотив грузополучателя	<b>468</b>	<b>559</b>	<b>11,96</b>
Удлинение путей грузополучателя + четвертый локомотив грузополучателя	400	537	10,22
Удлинение путей грузополучателя и устройство вытяжки + четвертый локомотив грузополучателя	412	536	10,53
Удлинение путей грузополучателя, устройство вытяжки, удлинение двух путей станции А + четвертый локомотив грузополучателя	<b>550</b>	<b>633</b>	<b>14,05</b>
Электрификация и полная маршрутизация с удлинением путей	427	532	10,91
Электрификация и полная маршрутизация с удлинением путей, вытяжка + четвертый локомотив грузополучателя	<b>467</b>	<b>549</b>	<b>11,93</b>
Уменьшение длины поезда по отправлению до 62 вагонов + четвертый локомотив грузополучателя	<b>450</b>	<b>541</b>	<b>11,50</b>





слева — порядковый номер эксперимента, далее перечень мероприятий; справа — в числителе максимальное, в знаменателе среднесуточное количество выгружаемых вагонов

4. Удлинение путей грузополучателя при сохранении технологии обработки поездов по станции А позволяет выгружать более 500 вагонов ежесуточно. Увеличивается емкость путевого развития, снижаются задержки при формировании поездов. Это самый эффективный вариант по перерабатывающей способности.

5. Электрификация путей грузополучателя совместно с их удлинением снимает зависимость от работы других клиентов станции и гарантирует освоение перспективных объемов. Однако при этом увеличивается загрузка путей грузополучателя, что не позволяет достичь такого же объема выгрузки, как при удлинении путей грузополучателя, но без электрификации.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам выполненной работы владелец инфраструктуры и проектная организация получили исчерпывающую информацию о перерабатывающей способности узла по всем вариантам развития, а также их комбинациям. Выполненные эксперименты позволяют выбрать не только наиболее эффективный

вариант, но и этапность проведения различных мероприятий при постепенном росте грузопотоков. Это поможет исключить технологические и инвестиционные риски, а также избежать нерационального расходования средств.

Количество и направленность экспериментов на моделях целесообразно регулировать и проводить в соответствии с задачами исследований и промежуточными результатами.

Использование метода имитационного моделирования, особенно систем автоматизированного моделирования, дает возможность выполнить всестороннюю и детальную оценку сложных транспортных объектов, которую нельзя корректно получить с помощью других аналитических и графических методов. В частности, имитационная модель учитывает структуру, технологию, вероятностные факторы и диспетчерское управление, позволяет проводить огромное количество расчетов для совершенно различных условий работы, меняя расписание, объемы перевозок, производительность устройств, продолжительность операций, а также число локомотивов, путей, бригад обслуживания и др.

## Сведения об авторах:

**Олег Викторович Осокин**,  
доктор технических наук, директор ООО «Аналитические и управляющие системы на транспорте «Транспортный алгоритм»»

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

**Андрей Алексеевич Муравьев**,  
аспирант кафедры «Управление эксплуатационной работой» Уральского государственного университета путей сообщения

## Authors Information:

**Oleg V. Osokin**,  
DSc in Engineering, Head of Analytical and controlling systems in transport «Transport algorithm» LLC

**Vitaliy S. Kolokolnikov**,  
DSc in Engineering,  
Professor of Operations Management Department,  
Ural State University of Railway Transport

**Andrey A. Muravyov**,  
postgraduate student of Operations Management Department,  
Ural State University of Railway Transport

## Литература

1. Козлов П. А., Владимирская И. П., Козлова В. П. Экономико-технологические риски в проектах развития транспортной инфраструктуры // Транспорт Российской Федерации. 2009. № 2 (21). С. 24–27. ISSN 1994-831X.
2. Инструкция по расчету пропускной и провозной способностей железных дорог ОАО «РЖД»: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 04.03.2022 г. № 545/р (в ред. распоряжений ОАО «РЖД» от 16.12.2022 г. № 3340/р и от 14.02.2023 г. № 324/р).
3. Методика проведения исследований проектов развития железнодорожных станций и линий с определением «узких мест», влияния на пропускные и перерабатывающие способности, рациональной технологии и прогнозируемых эксплуатационных показателей с использованием аппарата математического моделирования: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 09.01.2018 г. № 2/р.
4. Имитационная экспертиза проекта развития транспортного узла Усть-Луга / П. А. Козлов, И. П. Владимирская, И. В. Иванов, О. В. Осокин // Транспорт Российской Федерации. 2009. № 6 (25). С. 18–21. ISSN 1994-831X.
5. Козлов П. А., Осокин О. В., Колокольников В. С. Исследование проектов развития железнодорожных станций и полигонов

## References

1. Kozlov P. A., Vladimirskaia I. P., Kozlova V. P. Economic and technological risks in projects for development of the transport infrastructure. *Transport of the Russian Federation*. 2009. No. 2 (21). Pp. 24–27. ISSN 1994-831X. (In Russian).
2. Instructions for calculating the carrying capacity of railways of JSC Russian Railways: approved by the Order of JSC Russian Railways dated 04.03.2022 No. 545/r (as amended by Orders of JSC Russian Railways dated 16.12.2022 No. 3340/r and dated 14.02.2023 No. 324/r). (In Russian).
3. Methodology for conducting research on projects for the development of railway stations and lines with the identification of «bottlenecks», the impact on throughput and processing capacities, rational technology and predicted operational performance using mathematical modeling apparatus: approved by the Order of JSC Russian Railways dated 09.01.2018 No. 2/r. (In Russian).
4. Kozlov P. A., Vladimirskaia I. P., Ivanov I. V., Osokin O. V. Simulation expert evaluation of the Ust-Luga transport hub development project. *Transport of the Russian Federation*. 2009. No. 6 (25). Pp. 18–21. ISSN 1994-831X. (In Russian).
5. Kozlov P. A., Osokin O. V., Kolokolnikov V. S. Investigation of railway stations and polygons development projects using sim-



- нов с помощью имитационного моделирования // Железнодорожный транспорт. 2018. № 6. С. 12–16. ISSN 0044-4448.
6. Пархоменко А. А., Осокин О. В., Козлов П. А. Имитационная экспертиза инфраструктурных проектов на транспорте // Транспорт Российской Федерации. 2022. № 6 (103). С. 19–23. ISSN 1994-831X.
7. Колокольников В. С., Осокин О. В., Шипулин А. С. Моделирование монгольских железных дорог: задачи и результаты // Транспорт Урала. 2024. № 4 (83). С. 51–55. DOI: 10.20291/2024-4-51-55.
8. Козлов П. А. Оптимизация развития транспортных узлов и полигонов на основе имитационного моделирования // Бюллетень ученого совета АО «ИЭРТ». 2023. № 8-2. С. 30–40. ISSN 2500-3283.
6. Parkhomenko A. A., Osokin O. V., Kozlov P. A. Simulation examination of infrastructure projects in transport. *Transport of the Russian Federation*. 2022. No. 6 (103). Pp. 19–23. ISSN 1994-831X. (In Russian).
7. Kolokolnikov V. S., Osokin O. V., Shipulin A. S. Modeling of Mongolian railways: tasks and results. *Transport of the Urals*. 2024. No. 4 (83). Pp. 51–55. DOI: 10.20291/2024-4-51-55. (In Russian).
8. Kozlov P. A. Development optimization of transport hubs and polygons based on simulation modeling. *Bulletin of the Academic Board of IEDT JSC*. 2023. № 8-2. Pp. 30–40. ISSN 2500-3283. (In Russian).

Научная статья  
УДК 65.012:656.2

## Регулирующая роль управляющей компании в транспортном холдинге

Петр Алексеевич Козлов<sup>1</sup>, Виктория Павловна Козлова<sup>2</sup>, Татьяна Ивановна Бушуева<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Научно-производственный холдинг «СТРАТЕГ», Москва, Россия

<sup>2</sup>Российский университет транспорта (МИИТ), Москва, Россия

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

## Management company's regulatory role in transport holding

Petr A. Kozlov<sup>1</sup>, Valeriya P. Kozlova<sup>2</sup>, Tatyana I. Bushueva<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Research & Production Holding STRATEG, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia

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

### Аннотация

В статье рассмотрена регулирующая роль управляющей компании в транспортном холдинге. Приведена расчетная схема оптимизационной модели холдинга. Показаны примеры использования управляющей компанией регулирующих ограничений, позволяющих согласовывать интересы и отдельных фирм, и транспортного холдинга в целом в инвестиционных процессах. Построенная модель может отображать регулирующие мероприятия управляющей компании, способные обеспечить устойчивое и рациональное развитие холдинга.

**Ключевые слова:** транспорт, система, транспортный холдинг, управляющая компания

### Abstract

The article examines the regulatory role of a management company in transport holding company. The calculated scheme for optimization model of the holding is given. Examples of use for regulatory restrictions by the management company are given, allowing to coordinate the interests of both individual firms and the transport holding company as a whole in investment processes. The constructed model can reflect the regulatory measures of management company that can ensure the sustainable and rational development of the holding.

**Keywords:** transport, system, transport holding, management company

DOI: 10.20291/1815-9400-2025-4-10-13

С теоретической точки зрения транспортный холдинг целесообразно рассматривать как *систему*. Однако элементы системы тоже являются системами [1–3]. Это значит, что как системы они имеют собственные цели и механизмы активного самоподдержания, а как элементы — участвуют в реализации активного самоподдержания холдинга в целом. Элементы как системы, естественно, хотят добиваться наилучших результатов для себя. Управляющая компания анализирует показатели всего холдинга и стремится устранять перекосы между фирмами, входящими в его состав.

Рассмотрим холдинг, включающий три транспортных фирмы и управляющую компанию — это некоторый аналог реального холдинга в несколько упрощенном представлении. В перевозках участвуют три относительно взаимозаменяемых вида транспорта — контейнеры, крытые вагоны и автомобили-фуры.

Задана структура увеличивающегося транспортного потока. Следовательно, фирмам холдинга необходимо приобретать транспортные средства. Причем виды транспортных средств должны соответствовать структуре потока (рис. 1).

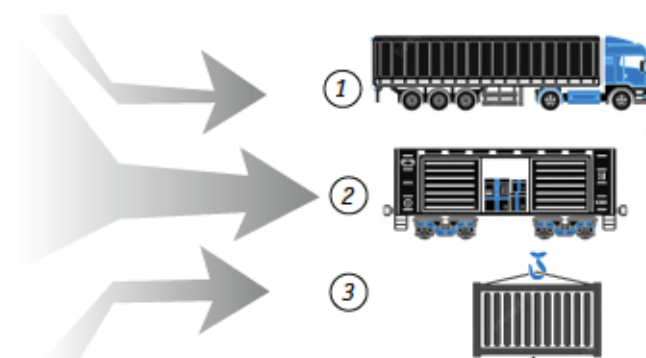


Рис. 1. Соответствие видов транспортных средств структуре транспортного потока:

1 — автомобили; 2 — крытые вагоны; 3 — контейнеры



Существуют следующие естественные ограничения:

наличие в продаже транспортных средств;

объемы перевозок, прикрепленные к определенному виду транспорта.

Вариантов нового построения холдинга — многие тысячи, и для решения такой задачи необходимо использовать оптимизационную модель. Более всего для этого подходит метод оптимизации АЛГОРА [4]. Расчетная схема модели представлена на рис. 2.

Естественный критерий оптимизации — *максимум суммарного дохода* холдинга. Но может существовать и другой, заданный внешними условиями, — *максимум освоенных потоков*. Модель способна работать в обоих вариантах.

Расчеты показывают, что, если существуют только вышеприведенные ограничения, возникает большое множество содержательно различных, но формально одинаковых по значению критерия вариантов. Рассмотрим вполне возможный пример, представленный на рис. 3: регулирующих ограничений нет, суммарный доход в обоих случаях одинаковый. Но содержательно решения отличаются: есть соответствие по регионам (рис. 3а), однако остается несбалансированное распределение по видам транспорта — используются только крытые вагоны (рис. 3б).

Значит, управляющей компании необходимо ввести регулирующие ограничения (рис. 4).

После введения дополнительных ограничений на количество приобретаемых крытых вагонов в перевозках стали использоваться и другие виды транспорта (автомобили и контейнеры), но возникло несоответствие по регионам (рис. 5).

То есть требуется дальнейшая работа, чтобы обеспечить баланс и по фирмам холдинга, и по видам транспорта.

Необходимо отметить: для активного самоподдержания и устойчивости работы управляющая компания использует адаптивные механизмы. При этом вводятся связи активной взаимопомощи между фирмами (рис. 6).

Связи означают, что транспортные средства одного региона могут по решению управляющей компании работать в другом — смежном — регионе. Модель

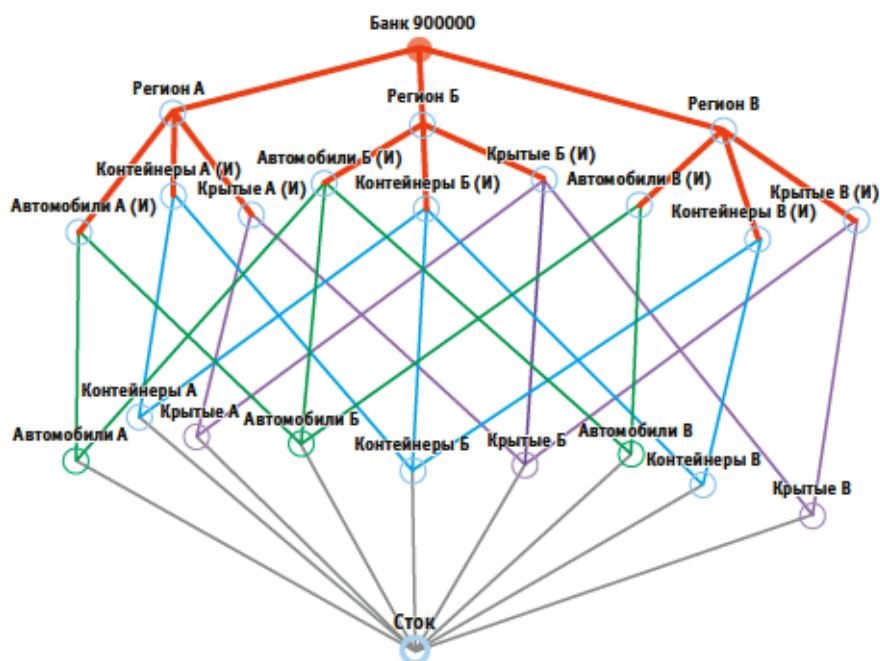


Рис. 2. Расчетная схема транспортного холдинга для оптимизационной модели

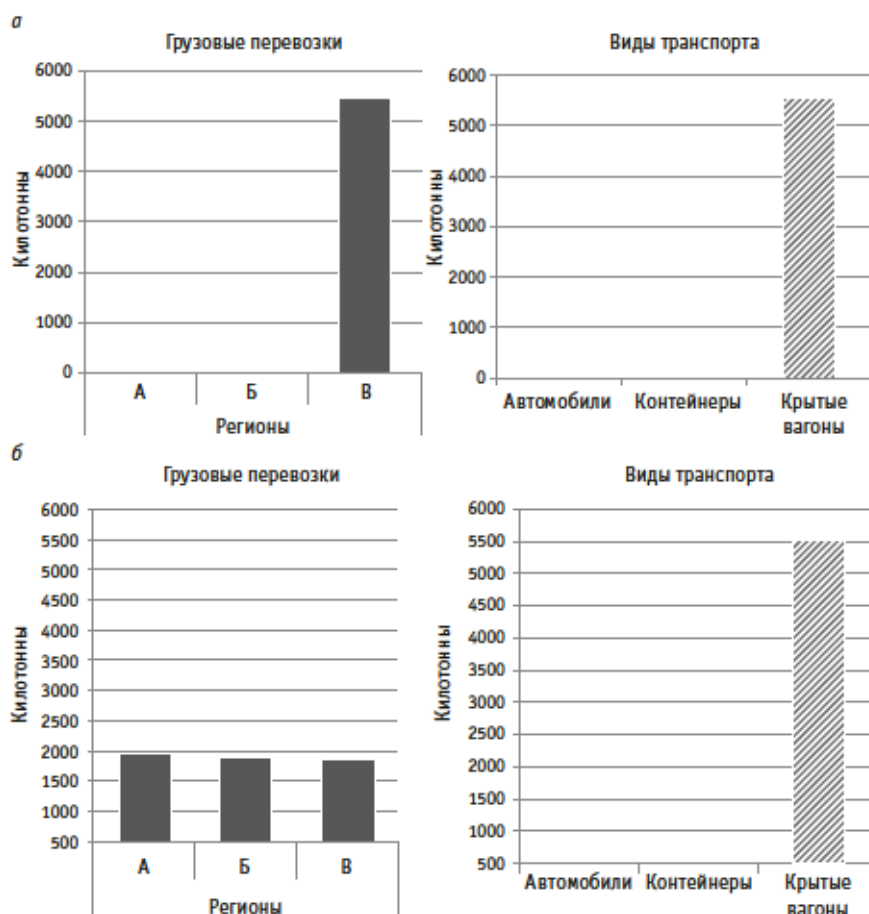


Рис. 3. Структура транспортных средств без регулирующих ограничений:  
а — вариант 1; б — вариант 2



Рис. 4. Регулирующая роль управляющей компании

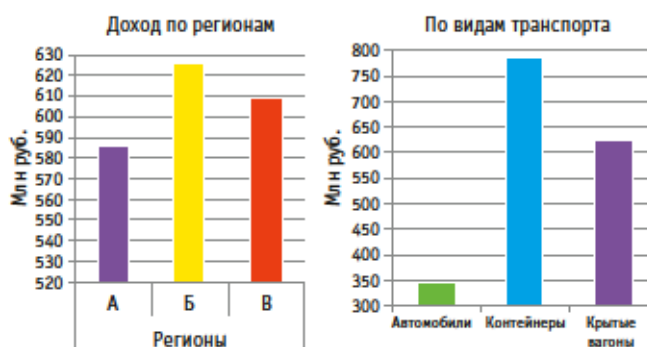


Рис. 5. Структура транспортных средств при ограничении количества используемых крытых вагонов

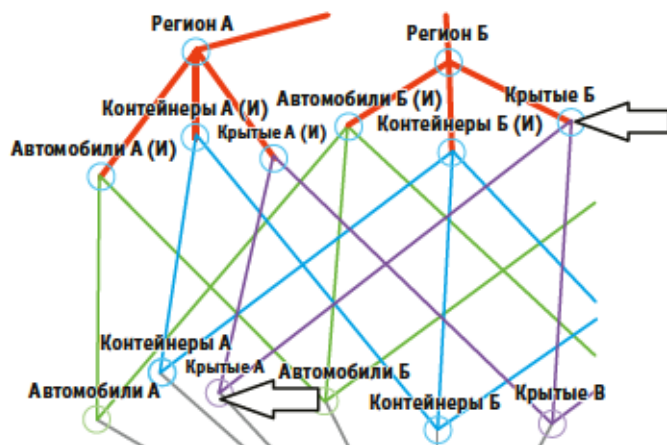


Рис. 6. Пример межрегиональной связи в расчетной схеме

#### Сведения об авторах:

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

**Валерия Петровна Козлова**,  
доктор экономических наук, профессор,  
профессор кафедры «Системы управления транспортной инфраструктурой» Российского университета транспорта (МИИТ)

**Татьяна Ивановна Бушуева**,  
старший преподаватель кафедры «Управление в социальных и экономических системах, философия и история»  
Уральского государственного университета путей сообщения

показывает, что эффективность использования по таким связям будет ниже: возникнут дополнительные затраты на перевозку. Это отображается в результатах работы (рис. 7).

В модели отображаются также и ущербы от невыполнения заданных индивидуальных перевозок (рис. 8).

Таким образом, рассмотренные примеры показывают, как построенная модель отображает регулирующие мероприятия управляющей компании холдинга. Эффективные регулирующие действия управляющей компании позволяют согласовывать интересы отдельных фирм и холдинга в целом. Как следствие, это повышает общую управляемость холдингом, оптимизирует процессы, минимизирует риски и в итоге обеспечивает устойчивое развитие транспортного холдинга.

Перевезено по видам транспорта средствами из других регионов

Транспорт	Перевезено (кт)	Доход (млн руб.)	Инвестиции (млн руб.)
А - Б			
Автомобили	10,0	26,7	17,3
Контейнеры	0,0	0,0	0,0
Крытые	0,0	0,0	0,0
В - Б			
Автомобили	15,0	40,0	26,0
Контейнеры	0,0	0,0	0,0
Крытые	0,0	0,0	0,0

Рис. 7. Перевозки по адаптивным межрегиональным связям

Не перевезено всего		
Регион	Не перевезено (кт)	Ущерб (млн руб.)
А	0,0	0,0
Б	23,9	119,7
В	0,0	0,0
Не перевезено по видам транспорта		
Транспорт	Не перевезено (кт)	Ущерб (млн руб.)
Автомобили Б	23,9	119,7

Рис. 8. Ущерб от невыполненных перевозок

#### Authors information:

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

**Valeriya P. Kozlova**,  
DSc in Economics, Professor,  
Professor of Transport Infrastructure Management Systems Department,  
Russian University of Transport (MIIT)

**Tatyana I. Bushueva**,  
Senior Lecturer of Management in Social and Economic Systems,  
Philosophy and History Department,  
Ural State University of Railway Transport



## Литература

1. Козлов П. А. О системах и системности на транспорте // Транспорт Урала. 2016. № 2 (49). С. 3–8. DOI: 10.20291/1815-9400-2016-2-3-8.
2. Козлов П. А. Системные исследования — новый подход // Наука и техника транспорта. 2014. № 1. С. 46–50. ISSN 2074-9325.
3. Козлов П. А., Козлова В. П., Бушуева Т. И. Системное построение транспортных холдингов // Транспорт Урала. 2025. № 3 (86). С. 11–14. DOI: 10.20291/1815-9400-2025-3-11-14.
4. Технология выбора эффективных транспортных средств при различной структуре грузопотоков / П. А. Козлов, В. П. Козлова, Н. А. Тушин, Р. В. Писарева // Вестник РГУПС. 2020. № 2 (78). С. 113–122. ISSN 0201-727X.

## References

1. Kozlov P. A. On systems and systematicity in transport. *Transport of the Urals*. 2016. No. 2 (49). Pp. 3–8. DOI: 10.20291/1815-9400-2016-2-3-8. (In Russian).
2. Kozlov P. A. System research — a new approach. *Science and technology in transport*. 2014. No. 1. Pp. 46–50. ISSN 2074-9325. (In Russian).
3. Kozlov P. A., Kozlova V. P., Bushueva T. I. Systemic structuring of transport holdings. *Transport of the Urals*. 2025. No. 3 (86). Pp. 11–14. DOI: 10.20291/1815-9400-2025-3-11-14. (In Russian).
4. Kozlov P. A., Kozlova V. P., Tushin N. A., Pisareva R. V. Technology for selecting efficient vehicles with different freight-cargo flow. *Vestnik RGUPS*. 2020. No. 2 (78). Pp. 113–122. ISSN 0201-727X. (In Russian).

Научная статья

УДК 656.11

# Методика формирования устойчивых паттернов транспортного поведения индивидов на основе предыдущего опыта и информирования о текущем состоянии транспортной системы

Андрей Владимирович Ахромешин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Тульский государственный университет, Тула, Россия

## Methodology of forming stable patterns of transport behavior of individuals based on previous experience and information about current state of transport system

Andrey V. Akhromeshin<sup>1</sup>

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

### Аннотация

Представлена методика, в основе которой лежат предыдущий опыт поведения индивидов на транспортной сети города и информация о текущем состоянии транспортной системы. Описаны алгоритм и структура взаимодействия интеллектуальной транспортной системы с элементами управления паттернами транспортного поведения.

Предложенная методика представляет собой теоретическую и практическую основу для управления транспортным спросом на различных структурных уровнях. Ключевое преимущество — учет и целенаправленное использование предыдущего опыта для формирования не навязанных, а осознанных и устойчивых паттернов поведения индивидов.

Внедрение методики требует развития цифровой инфраструктуры интеллектуальных транспортных систем городов, однако потенциальный эффект в виде снижения загруженности дорог, повышения экологичности и комфорта мобильности значителен и социально-экономически обоснован.

**Ключевые слова:** транспортное поведение, паттерн поведения, транспортная система, улично-дорожная сеть, индивид, методика, система управления

### Abstract

A methodology based on the previous experience of individuals' behavior on the city's transport network and information about the current state of the transport system is presented. The algorithm and structure of interaction of an intelligent transport system with control elements of patterns of transport behavior are described.

The proposed methodology provides a theoretical and practical basis for managing transport demand at various structural levels. The key advantage is taking into account and purposefully using previous experience to form conscious and stable patterns of individual behavior rather than imposed ones.

The implementation of the methodology requires the development of the digital infrastructure of intelligent urban transport systems, but the potential effect of reducing traffic congestion, increasing environmental friendliness and comfort of mobility is significant and socio-economically justified.

**Keywords:** transport behavior, pattern of behavior, transport system, road network, individual, methodology, management system

DOI: 10.20291/1815-9400-2025-4-14-20

### ВВЕДЕНИЕ

Транспортные заторы, экологические выбросы и неэффективное использование инфраструктуры улично-дорожной сети (УДС) становятся хроническими проблемами современных мегаполисов. Традиционные подходы, сфокусированные на экстенсивном развитии дорожной сети, исчерпали свой потенциал и стали экономически несостоятельными [1]. В связи с этим парадигма управления транспортом смещается в сторону управления мобильностью населения, где центральным объектом становится индивид с его поведенческими установками и привычками.

Транспортное поведение (ТП) индивида представляет собой устойчивый и повторяющийся во времени паттерн выбора видов транспорта, маршрутов и времени поездок. Формирование таких паттернов — сложный когнитивный процесс, в значительной степени зависящий от **предыдущего опыта** [2]. При этом негативный опыт (длительные заторы, некомфортные поездки в общественном транспорте) закрепляет деструктивные модели поведения (например, предпочтение личного автомобиля при любой возможности). Соответственно задача управления заключается в том, чтобы на основе целенаправленного воздействия сформировать позитивный опыт и, как следствие, устойчивые **конструктивные паттерны**, выгодные и для индивида, и для транспортной системы (ТС) в целом.

Цель представленного в статье исследования — разработка методики формирования устойчивых паттернов транспортного поведения, учитывающей предыдущий опыт поведения индивидов на транспортной сети города и информирование о текущем состоянии ТС, а также описание алгоритма и структуры взаимодействия интеллектуальных транспортных систем (ИТС) с элементами управления паттернами ТП.

Методика строится на подходах, сформулированных в публикациях [3–5], где рассматриваются системы управления транспортным поведением населения городских агломераций, паттерны поведения индивидов, методы распознавания



и классификации паттернов на примере модели транспортной системы индивидуальных перемещений.

Существующие подходы к управлению транспортным поведением, в том числе системы поддержки принятия решений, можно условно разделить следующим образом:

**жесткие (директивные).** Это административные запреты, платные въезды в определенные транспортные зоны города, изменение схем дорожного движения, запрет использования некоторых видов транспорта (например, въезд в центр города автомобилей с двигателями внутреннего сгорания);

**мягкие (недирективные).** К ним относятся системы информирования (информационные табло и указатели, мобильные приложения, программы стимулирования поездок на общественном транспорте). Эти методы обладают меньшим немедленным эффектом, но нацелены на долгосрочное изменение привычек [6].

### ПРЕДПОСЫЛКИ СОЗДАНИЯ МЕТОДИКИ

При разработке методики использовались теория макросистем, системный анализ [7], нелинейная динамика [8], теория транспортных потоков [9], общая теория управления [10].

Общая теория управления представляет собой фундаментальную научную дисциплину, изучающую общие закономерности процессов управления в системах произвольной природы (технических, биологических, экономических и социальных). Применительно к управлению транспортным поведением индивидов главными элементами механизма управления являются следующие методы и средства воздействия (способы и инструменты):

организационно-административные (превентивные механизмы управления дорожным движением, пересмотр маршрутов движения и расписания городского пассажирского транспорта общего пользования);

экономические (управление потоками движения транспорта и выбором способов перемещения в зависимости от стоимости проезда и парковки);

социально-психологические (системы мониторинга, информирования и оповещения о тех или иных дорожных инцидентах, а также о путях их объезда).

Для управления мобильностью населения в транспортных системах активно применяется теория паттернов [11–13]. Принципы типизации и кластеризации перемещений индивидов по ТС широко используются для выявления общих закономерностей и выработки управляющих воздействий на транспортную сеть, группы индивидов и на конкретного человека, т.е. используются различные иерархические уровни.

В основу разрабатываемой методики положены следующие ключевые моменты.

1. Использование данных о перемещениях населения (совершенных поездках), т.е. о предыдущем опыте [14–16].

2. Создание систем информирования о текущем состоянии транспортной системы, включая мобильные приложения, информационные табло на УДС, центры мониторинга дорожной обстановки [17–19].

3. Использование понятия «оптимум функционирования транспортной системы». Это системный подход к управлению

транспортом, который заключается в поиске и достижении такого состояния системы, при котором она работает с максимальной эффективностью, обеспечивает наилучшее соответствие между спросом на перевозки и предложением транспортных услуг, учитывая множественные и часто противоречивые критерии оценки [20, 21].

Поиск оптимума осуществляется по нескольким ключевым критериям, которые часто конфликтуют друг с другом. К ним относятся:

**экономический критерий** — минимизация совокупных затрат (таких как время в пути, стоимость перевозки, расходы на строительство и содержание инфраструктуры, на топливо) и максимизация экономической эффективности;

**временной критерий** — минимизация времени поездки и времени доставки грузов, повышение регулярности и предсказуемости перевозок;

**социальный критерий** — доступность транспорта для всех слоев населения (включая маломобильные группы), безопасность, комфорт, экологичность (снижение шума и выбросов);

**пропускная способность дорожной сети города** — максимальное использование существующей инфраструктуры без возникновения заторов.

Устойчивые паттерны транспортного поведения формируются за счет персонализации (учета прошлого опыта), прозрачности (доступа к данным в реальном времени) и стимулирования (мотивации к изменению привычек).

### МЕТОДИКА ФОРМИРОВАНИЯ УСТОЙЧИВЫХ ПАТТЕРНОВ ТРАНСПОРТНОГО ПОВЕДЕНИЯ

Цель разработки методики — определить зависимости формирования устойчивых паттернов поведения на различных структурных уровнях функционирования транспортной системы (на микро-, мезо- и макроуровне).

Объект методики — паттерны транспортного поведения индивидов, формирующиеся в устойчивые модели в зависимости от привычек, внутренних мотивов и приоритетов, а также в процессе приобретения опыта перемещений по транспортной сети города и получения данных с систем информирования о дорожной обстановке и инцидентах.

Рассмотрим алгоритм формирования устойчивых паттернов транспортного поведения.

Общая последовательность действий представляет собой классический пример цикла управления с обратной связью, адаптированный для сложной системы городского транспорта, и подразумевает следующие шаги.

**Шаг 1. Сбор информации обо всех перемещениях индивидов по транспортной сети.** На этом этапе ставится задача получить максимально полную и детальную картину транспортных потоков. Источниками информации являются данные с мобильных сетей, транспортные карты (карты оплаты проезда), датчики, установленные на транспорте (GPS/ГЛОНАСС), датчики на дорогах (камеры, радары, индукционные петли), данные с навигационных приложений (Яндекс.Карты, Google Maps), опросы населения.

**Шаг 2. Анализ информации, очистка базы, выявление ошибочных записей (и других некорректных данных).** На текущем



этапе необходимо подготовить данные для анализа, устранив «шум» и ошибки. Для этого осуществляется валидация данных, т.е. проверка на физическую возможность перемещения (например, нереально высокая скорость между двумя точками, указывающая на ошибку геолокации), фильтрация выбросов (удаление аномальных точек, не соответствующих общему потоку данных), обработка пропущенных значений, заполнение пробелов в данных (например, интерполяция местоположения между двумя известными точками) или их исключение. Также требуется удалить дублирующиеся записи, выполнить удаление или шифрование персональных идентификаторов, чтобы обеспечить конфиденциальность.

**Шаг 3. Сортировка данных, разложение по паттернам.** Цель — группировка однородных перемещений и выявление повторяющихся моделей поведения. На этом этапе проводится сегментация по типам пользователей, выстраиваются цепочки перемещений, осуществляется группировка поездок по схожим маршрутам и временным интервалам, выявляются пространственно-временные паттерны.

**Шаг 4. Анализ данных, классификация и кластеризация паттернов.** Задача этапа — систематизировать выявленные паттерны, найти скрытые зависимости и сходства, получить в результате структурированную таксономию транспортных паттернов с количественными характеристиками.

**Шаг 5. Выявление устойчивых закономерностей.** Одна из самых значимых задач данного шага — отличить случайные флуктуации от стабильных, системных явлений. Здесь происходит исследование паттернов на протяжении длительного времени — недель, месяцев. Осуществляется поиск связей между различными паттернами (пример — как перекрытие одной улицы влияет на нагрузку соседних); выявляются причинно-следственные связи, почему возник тот или иной паттерн (например, паттерн «пробка на выезде из города» обусловлен узким местом в виде моста).

**Шаг 6. Выработка управляющих воздействий.** На этом этапе разрабатываются меры по оптимизации паттернов под заданные критерии оптимальности транспортной системы. Для прогноза последствий воздействий на ТС применяются транспортные модели. Управляющие воздействия включают в себя три ключевых направления:

инфраструктурные (изменение схемы движения, введение платного въезда, выделенные полосы для общественного транспорта, изменение режима работы светофоров);

тарифно-экономическое регулирование (корректировка стоимости проезда, введение льгот, стимулирование поездок не в часы пик);

информационные (информирование пользователей через приложения о наиболее целесообразных маршрутах, заторах, переполненности транспорта).

**Шаг 7. Сравнение текущих паттернов с оптимальными,** т.е. сопоставление смоделированных результатов внедрения воздействия с оптимальными KPI, количественная оценка ожидаемого эффекта от управляющего воздействия.

**Шаг 8. Управление. Оказание воздействия на систему.** Задача данного этапа состоит в непосредственном управлении транспортной системой в разрезе физических изменений ин-

фраструктуры, режимов работы светофорных объектов, приоритизации проезда общественного транспорта, т.е. это директивное управление. Информационное воздействие на индивидов — не директивное управление.

**Шаг 9. Приход транспортной системы в новое равновесное состояние.** Здесь происходит адаптация и стабилизация системы в новое равновесное состояние, в режиме реального времени осуществляется мониторинг за ключевыми параметрами работы после внедрения изменений, анализируется переходный процесс. Индивиды пробуют новые маршруты, меняют привычки. Этот период может занимать от нескольких дней до нескольких месяцев. Транспортная система стабилизируется, формируются новые (устойчивые) потоки и паттерны поведения.

**Шаг 10. Появление новых паттернов транспортного поведения.** Фиксация новых (возникших) паттернов и изменение в старых. Например, после введения выделенной полосы из-за перераспределения автомобильного потока могут появиться паттерн «ускоренное движение автобусов по улице Центральной» и паттерн «увеличение нагрузки на параллельных улицах». То есть это будет новый набор паттернов, описывающих актуальное состояние транспортной сети.

**Шаг 11. Возврат к шагу 1. Повторение цикла.**

Для наглядности на рис. 1 схематично представим всю последовательность шагов.

Далее опишем поэтапный алгоритм взаимодействия ИТС и формирование устойчивых паттернов поведения на транспортной сети города (рис. 2).

Функция информирования в транспортной системе будет включать в себя комплексы мониторинга и оповещения водителей. Эти системы — критически важный элемент ИТС. Их воздействие на транспортную систему является многокомпонентным и в значительной степени нелинейным. Максимальная эффективность достигается при интеграции с другими подсистемами управления (такими как светофорное регулирование, управление инцидентами) и при использовании алгоритмов адаптивного управления, учитывающих прогнозируемую реакцию водителей на предоставляемую информацию. Для верификации результатов воздействия необходима комплексная система мониторинга на основе данных детекторов транспорта, GPS-трекинга и камер видеонаблюдения.

К объектам информирования относятся динамические дорожные знаки, табло с бегущей строкой или графические дисплеи, отображающие информацию о заторах, авариях, дорожных работах, погодных условиях, рекомендуемых маршрутах объезда; мобильные приложения и навигационные системы, которые используют данные в реальном времени (для построения маршрутов с учетом текущей дорожной обстановки); радиотрансляции (RDS-TMC), передающие закодированные сообщения о дорожной обстановке через FM-радио.

Отметим, что характер предоставляемой информации также играет важную роль в системах информирования. Различают реактивный способ передачи, т.е. информирование об уже произошедших событиях (авариях, заторах), и проактивный, когда предоставление прогнозной информации о вероятных заторах строится на основе моделей транспортного потока и данных исторической статистики.



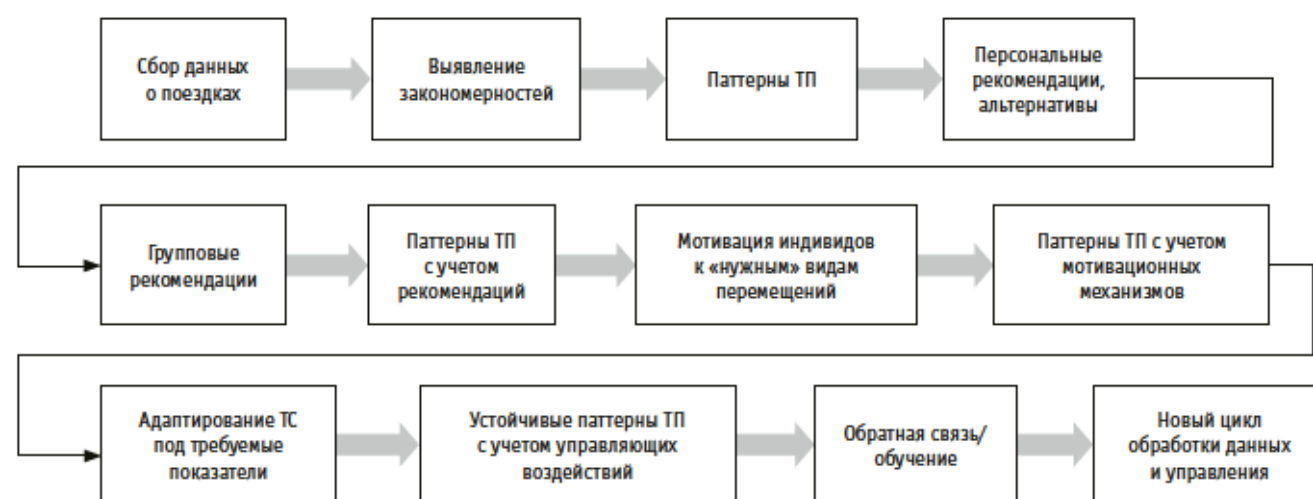


Рис. 1. Последовательность шагов алгоритма методики формирования устойчивых паттернов транспортного поведения

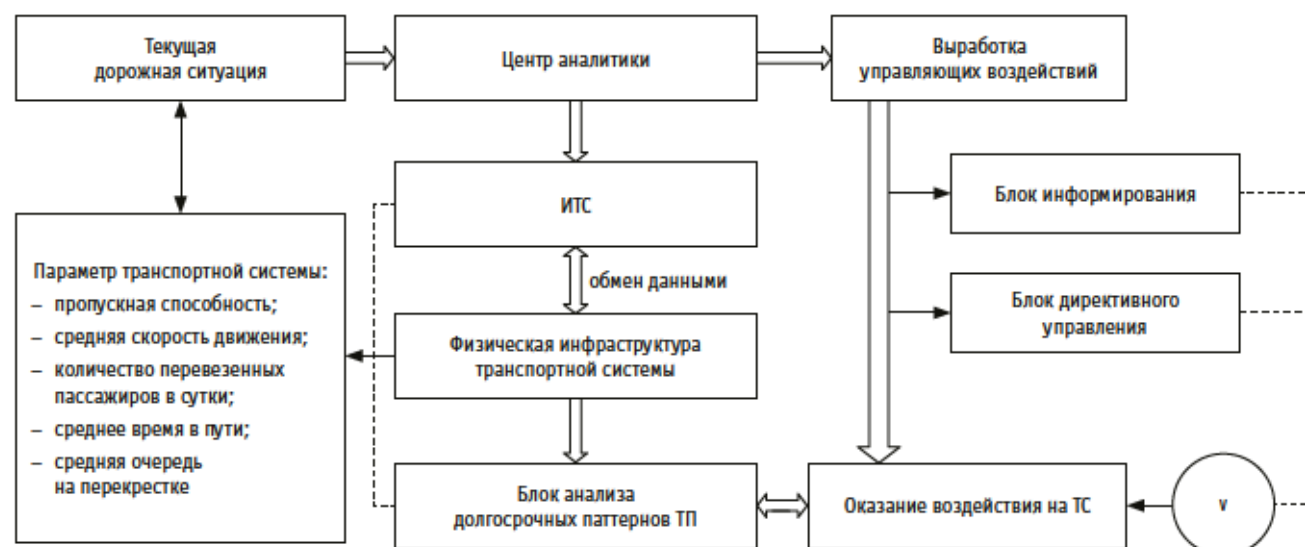


Рис. 2. Структура взаимодействия ИТС с элементами управления паттернами транспортного поведения:  
V — блок адаптации системы под заданные показатели функционирования ТС

Для разрабатываемой методики важен масштаб событий, происходящих в ТС. Опишем уровни взаимодействия в понятиях теории макросистем на примере индивида.

Макроуровень — стратегический выбор маршрута. На нем идет распределение нагрузки на дорожную сеть, Информирование о заторах на основных магистралях стимулирует перераспределение транспортных потоков на альтернативные маршруты. Эффективность зависит от достоверности информации и наличия реальных альтернатив.

Мезоуровень — тактическое вождение. Снижение скорости подхода к зоне затруднения и заблаговременное предупреждение позволяют плавно снижать скорость, что минимизирует риск возникновения «волн замедления» и вторичных инцидентов. Водитель психологически готов к изменению условий, что снижает вероятность резких, небезопасных маневров.

Микроуровень — оперативное управление транспортной системой. Предсказуемость условий движения позволяет водителю сосредоточиться на непосредственном управлении транспортным средством, а не на анализе внезапно меняющейся обстановки.

Реализация методики при помощи ИТС представлена на рис. 3.

Мониторинг параметров функционирования ИТС в текущее время и выявление паттернов рассмотрены ранее, и в настоящей работе дублироваться не будут. Архивные данные, описывающие состояние ТС и ее элементов, а также отдельные характеристики, содержатся в базе данных модуля контроля эффективности ИТС. К этим данным предлагается добавлять и типичные паттерны поведения, характерные для применяемых управляющих воздействий.

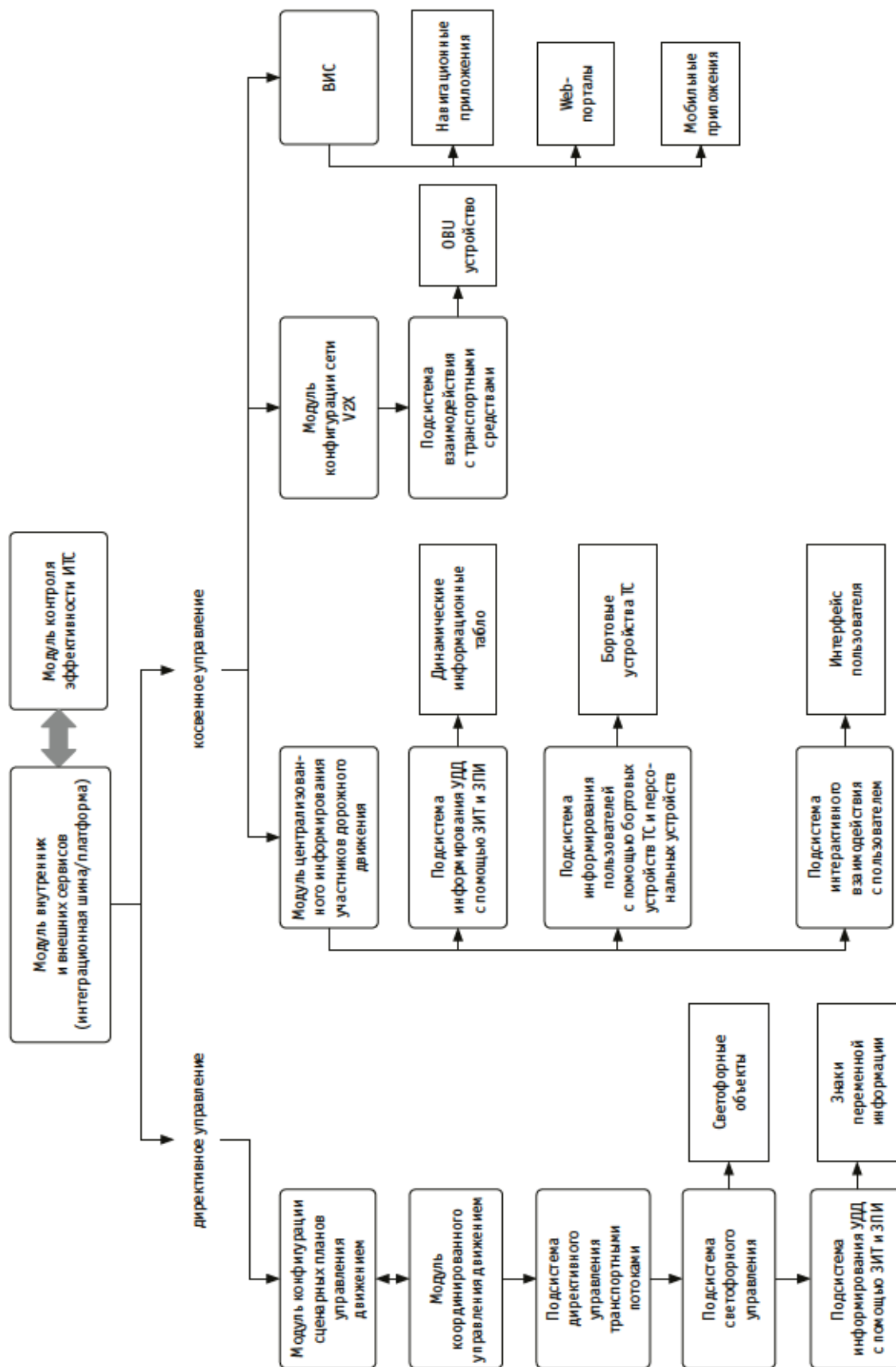


Рис. 3. Структура схемы управления транспортным поведением с помощью ИТС



Полученные значения текущего и возможного прогнозного состояния ИТС предполагают подбор оптимальных управляющих воздействий на элементы ИТС в рамках директивного управления (Модуля конфигурации сценарных планов управления движением) и косвенного управления (информирования).

Рассмотрим подробнее некоторые составляющие схемы, представленной на рис. 3.

Директивное управление включает в себя регулирование движения транспортных потоков на основе использования периферийных объектов инструментальных подсистем светофорного управления (светофорных объектов) и информирование участников дорожного движения с помощью динамических информационных табло (ДИТ) и знаков переменной информации (ЗПИ). Оно осуществляется путем изменения планов пофазных развязок для повышения пропускной способности сечений, а также разрешенных параметров движения транспортных средств.

Косвенное управление — это информирование через три вида источников передачи данных. Модуль централизованного информирования участников дорожного движения определяет типы и структуру сообщений, а также элементы периферийного оборудования, на которые необходимо передать информацию. Инструментальные подсистемы обеспечивают передачу информации на оборудование. Таким оборудованием могут быть ДИТ, установленный на магистральном въезде в ИТС или перед развязкой, собственное устройство транспортной системы, обеспечивающее передачу визуальной и звуковой информации, а также интерфейс пользователя.

Модуль конфигурации сети V2X является инновационным решением для субъектов Российской Федерации, обеспечивающим обмен информацией между ближайшими подвижными и стационарными объектами при помощи устройств RSU и OBU. OBU — устройство, установленное в транспортном средстве, которое принимает данные от RSU и обрабатывает их, чтобы предоставить водителю информацию о текущей обстановке на дороге. Кроме того, OBU может отправлять данные на RSU и сообщать другим участникам дорожного движения информацию о положении и скорости движения транспортного средства.

Внешние информационные системы (ВИС) являются одновременно и получателями, и приобретателями информации, с которыми взаимодействует ИТС. В данном случае интерес представляют ВИС экосистем (например, Яндекс), компаний-перевозчиков, административных ресурсов, так как их приложения и веб-порталы являются активными трансляторами информации для индивидов.

Интерфейс пользователя — это возможность индивида взаимодействовать с ИТС через собственное устройство, которое предоставляет информацию о функционировании элементов системы, возникновении ЧС и обеспечивает обратную связь о потребностях в транспортной мобильности.

Последующие процессы, происходящие в ИТС, можно назвать, с одной стороны, циклическими, так как любое изменение состояния ИТС приводит к выработке управляющих состояний для приведения системы в равновесное состояние, а с другой стороны, мониторинг, управление и информирование являются непрерывным процессом.

Отметим, что рассмотренные процессы представлены на рис. 3 в рамках функциональных блоков архитектуры город-

ской агломерации ИТС. В качестве базовой использована архитектура ИТС городской агломерации, приведенная в Приложении № 5 распоряжения Минтранса России от 25 марта 2020 г. № АК-60-р [22].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье описана методика формирования устойчивых паттернов транспортного поведения на основе предыдущего опыта поведения индивидов на транспортной сети города и информирования о текущем состоянии транспортной системы. Предложенная методика представляет собой теоретическую и практическую основу для управления транспортным спросом на различных структурных уровнях. Ключевое преимущество — учет и целенаправленное использование предыдущего опыта индивидов для формирования не навязанных, а осознанных и устойчивых паттернов поведения.

Внедрение методики требует развития цифровой инфраструктуры интеллектуальных транспортных систем городов, однако потенциальный эффект в виде снижения загруженности дорог, повышения экологичности и комфорта мобильности является значительным и социально-экономически обоснованным.

Для объективности перечислим и негативные моменты, которые возникают при использовании систем мониторинга и информирования водителей о дорожной обстановке и инцидентах: эффект «переинформирования» (избыток или противоречивость информации могут привести к затруднению или параличу принятия решений у водителя);

неадекватное поведение пользователей (не все водители следуют рекомендациям, уровень доверия к системе является критическим параметром и зависит от ее точности в прошлом);

латентность данных (задержка между возникновением, обнаружением инцидента, обработкой и доведением информации до водителя может сделать информацию нерелевантной);

негативные сетевые эффекты (массовый перенос потока на альтернативный маршрут может вызвать коллапс на ранее свободной дороге);

зависимость от проникновения технологий (эффективность системы ограничена долей транспортных средств, оснащенных соответствующими устройствами, такими как навигаторы, смартфоны, встроенные мультимедийные системы, совместимые с системами информирования).

Также следует отметить, что для дальнейшего изучения паттернов транспортного поведения необходимо поставить следующие вопросы:

как меняются предпочтения (приоритеты) в совершении поездок индивидов на долгом горизонте планирования, что такое долгосрочные временные паттерны транспортного поведения;

существуют ли сезонные паттерны ТП, как время года и погодные условия влияют на тип перемещения населения;

какие балансовые условия должны соблюдаться, чтобы индивидуальные предпочтения (индивидуальный паттерн) были подчинены интересам всей транспортной системы, как информирование о дорожной обстановке способно в этом помочь.

Именно эти вопросы лежат в области научных интересов автора настоящей публикации и будут рассмотрены в последующих статьях.



#### Сведения об авторе:

**Андрей Владимирович Ахромешин**,  
кандидат технических наук, доцент кафедры «Транспортно-технологиче-  
ские машины и процессы» Тульского государственного университета

#### Author's Information:

**Andrey V. Akhromeshin**,  
PhD in Engineering, Associate Professor of Transport and Technological  
Machines and Processes Department, Tula State University

### Литература

1. Litman T. Understanding Transport Demands and Elasticities. Victoria Transport Policy Institute, 2025. 80 p.
2. Пищикова О. В. Формирование механизма управления транспортным поведением жителей мегаполиса : диссертация на соискание ученой степени кандидата экономических наук. Москва, 2022. 200 с.
3. Агуреев И. Е., Ахромешин А. В. К вопросу разработки модели транспортной системы индивидуальных перемещений // Мир транспорта и технологических машин. 2022. № 4-2 (79). С. 49–57. DOI: 10.33979/2073-7432-2022-2(79)-4-49-57.
4. Агуреев И. Е., Ахромешин А. В. Системы управления транспортным поведением населения городских агломераций. Паттерны поведения, методы их распознавания // Интеллект. Инновации. Инвестиции. 2024. № 4. С. 57–75. DOI: 10.25198/2077-7175-2024-4-57.
5. Ахромешин А. В., Пышный В. А. Мотивы принятия решений при совершении поездок // Научно-технические аспекты развития автотранспортного комплекса : материалы XI Международной научно-практической конференции в рамках 11-го Международного научного форума Донецкой Народной Республики, Горловка, 28 мая 2025 г. Горловка : Донецкий национальный технический университет, 2025.
6. Ben-Elia E., Avineri E. Response to Travel Information: A Behavioural Review // Transport Reviews. 2015. Vol. 35. No. 3. Pp. 352–377. DOI: 10.1080/01441647.2015.1015471.
7. Попков Ю. С. Теория макросистем. Москва : Librocom, 2015. 320 с.
8. Методы качественной теории в нелинейной динамике / Л. П. Шильников, А. Л. Шильников, Д. В. Тураев, Л. Чуа. Москва, 2013. 548 с.
9. Введение в математическое моделирование транспортных потоков / А. В. Гасников, С. Л. Кленов, Е. А. Нурминский [и др.] ; под ред. А. В. Гасникова. Москва, 2013. 430 с.
10. Беллман Р. Введение в теорию матриц. Москва : Наука, 1976. 351 с.
11. Гашенко А. Е. Теория паттернов в формировании городской среды // Праксема. Проблемы визуальной семиотики. 2019. № 3. С. 75–88. ISSN 2312-7899.
12. From Mobility Patterns to Behavioural Change: Leveraging Travel Behaviour and Personality Profiles to Nudge for Sustainable Transportation / E. Anagnostopoulou, Ja. Urbančič, E. Bothos [et al.] // Journal of Intelligent Information Systems. 2020. Vol. 54. No. 1. Pp. 157–178.
13. Mining Temporal Patterns of Transport Behaviour for Predicting Future Transport Usage / S. Foell, M. Veloso, G. Kortuem, C. L. Bento // Proceedings of the Third International Workshop on Pervasive Urban Applications (PURBA) in conjunction with ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing. 2013. Pp. 1239–1248. DOI: 10.1145/2494091.2497354.
14. Modelling Context-sensitive Dynamic Activity-travel Behavior under Conditions of Uncertainty Incorporating Reinforcement

### References

1. Litman T. Understanding Transport Demands and Elasticities. Victoria Transport Policy Institute, 2025. 80 p.
2. Pishchikova O. V. Formation of mechanism for managing the transport behavior of megalopolis residents : PhD in Economics Thesis. Moscow, 2022. 200 p. (In Russian).
3. Agureev I. E., Akhromeshin A. V. On the issue of developing a model of a transport system of individual movements with management. *World of transport and technological machines*. 2022. No. 4-2 (79). Pp. 49–57. DOI: 10.33979/2073-7432-2022-2(79)-4-49-57. (In Russian).
4. Agureev I. E., Akhromeshin A. V. Systems for managing the transport behavior of the population of urban agglomerations. Patterns of behavior, methods of their recognition. *Intellect. Innovations. Investments*. 2024. No. 4. Pp. 57–75. DOI: 10.25198/2077-7175-2024-4-57. (In Russian).
5. Akhromeshin A. V., Pyshnyi V. A. Motives for taking decisions when making trips. *Scientific and technical aspects of the development of the motor transport complex : proceedings of the 11th International scientific and practical conference within the framework of the 11th International scientific forum of the Donetsk People's Republic*, Gorlovka, May 28, 2025. Gorlovka : Donetsk National Technical University, 2025. (In Russian).
6. Ben-Elia E., Avineri E. Response to Travel Information: A Behavioural Review. *Transport Reviews*. 2015. Vol. 35. No. 3. Pp. 352–377. DOI: 10.1080/01441647.2015.1015471.
7. Popkov Yu. S. Theory of macrosystems. Moscow : Librocom, 2015. 320 p. (In Russian).
8. Shilnikov L. P., Shilnikov A. L., Turaev D. V., Chua L. Methods of qualitative theory in nonlinear dynamics. Moscow, 2013. 548 p. (In Russian).
9. Gasnikov A. V., Klenov S. L., Nurminskiy E. A. [et al.]. Introduction to mathematical modeling of traffic flows : edited by A. V. Gasnikov. Moscow, 2013. 430 p. (In Russian).
10. Bellman R. Introduction to matrix theory. Moscow : Science, 1976. 351 p. (In Russian).
11. Gashenko A. E. Pattern theory in urban environment formation. *ПРАΞΗΜΑ. Journal of Visual Semiotics*. 2019. No. 3. Pp. 75–88. ISSN 2312-7899. (In Russian).
12. Anagnostopoulou E., Urbančič Ja., Bothos E. [et al.]. From Mobility Patterns to Behavioural Change: Leveraging Travel Behaviour and Personality Profiles to Nudge for Sustainable Transportation. *Journal of Intelligent Information Systems*. 2020. Vol. 54. No. 1. Pp. 157–178.
13. Foell S., Veloso M., Kortuem G., Bento C. L. Mining Temporal Patterns of Transport Behaviour for Predicting Future Transport Usage. *Proceedings of the Third International Workshop on Pervasive Urban Applications (PURBA) in conjunction with ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing*. 2013. Pp. 1239–1248. DOI: 10.1145/2494091.2497354.
14. Han Q., Arentze T. A., Timmermans H. J. P. [et al.]. Modelling Context-sensitive Dynamic Activity-travel Behavior under Con-

- Learning, Habit Formation, and Behavioral and Cognitive Adaptation Strategies / Q. Han, T. A. Arentze, H. J. P. Timmermans [et al.] // *Proceedings of the 87th Annual Meeting of the Transportation Research Board*. Washington, 2008.
15. Frequent-pattern Growth Algorithm Based Association Rule Mining Method of Public Transport Travel Stability / S. Hu, Q. Liang, H. Ouang, J. Weng // *International Journal of Sustainable Transportation*. 2021. Vol. 15. No. 11. Pp. 879–892. DOI: 10.1080/15568318.2020.1827318.
16. Yazdanpanah M., Hadji Hosseinlou M. The Role of Personality Traits Through Habit and Intention on Determining Future Preferences of Public Transport Use // *Behavioral Sciences*. 2017. Vol. 7. No. 1. 15 p. DOI: 10.3390/bs7010008.
17. Arentze T. A., Timmermans H. J. P. Albatross: A Learning-based Transportation Oriented Simulation System // *Transportation Research Part B: Methodological*. 2004. Vol. 38. Issue 8. Pp. 613–633. DOI: 10.1016/j.trb.2002.10.001.
18. Schneider R. J. Theory of routine mode choice decisions: An operational framework to increase sustainable transportation // *Transport Policy*. 2013. Vol. 25. Issue 7. Pp. 128–137. DOI: 10.1016/j.tranpol.2012.10.007.
19. Vahidi H., Yan W. How is an informal transport infrastructure system formed? Towards a spatially explicit conceptual model // *Open Geospatial Data, Software and Standards*. 2016. Vol. 1. No. 8. 26 p. DOI: 10.1186/s40965-016-0009-9.
20. From user equilibrium to system optimum: a literature review on the role of travel information, bounded rationality and non-selfish behaviour at the network and individual levels / M. van Essen, T. Thomas, E. van Berkun, C. Chorus // *Transport reviews*. 2016. Vol. 36. No. 4. Pp. 527–548. DOI: 10.1080/01441647.2015.1125399.
21. Watling D. P., Cantarella G. E. Modelling sources of variation in transportation systems: theoretical foundations of day-to-day dynamic models // *Transportmetrica B: Transport Dynamics*. 2013. Vol. 1. No. 1. Pp. 3–32. DOI: 10.1080/21680566.2013.785372.
22. Об утверждении Методики оценки и ранжирования локальных проектов в целях реализации мероприятия «Внедрение интеллектуальных транспортных систем, предусматривающих автоматизацию процессов управления дорожным движением в городских агломерациях, включающих города с населением свыше 300 тысяч человек» в рамках федерального проекта «Общесистемные меры развития дорожного хозяйства» национального проекта «Безопасные и качественные автомобильные дороги»: распоряжение Министерства транспорта Российской Федерации от 25.03.2020 г. № АК-60-р. URL: <https://mintrans.gov.ru/documents/8/11078?type=&ysclid=mhsx1kiyco265174129>.
- ditions of Uncertainty Incorporating Reinforcement Learning, Habit Formation, and Behavioral and Cognitive Adaptation Strategies. *Proceedings of the 87th Annual Meeting of the Transportation Research Board*. Washington, 2008.
15. Hu S., Liang Q., Ouang H., Weng J. Frequent-pattern Growth Algorithm Based Association Rule Mining Method of Public Transport Travel Stability. *International Journal of Sustainable Transportation*. 2021. Vol. 15. No. 11. Pp. 879–892. DOI: 10.1080/15568318.2020.1827318.
16. Yazdanpanah M., Hadji Hosseinlou M. The Role of Personality Traits Through Habit and Intention on Determining Future Preferences of Public Transport Use. *Behavioral Sciences*. 2017. Vol. 7. No. 1. 15 p. DOI: 10.3390/bs7010008.
17. Arentze T. A., Timmermans H. J. P. Albatross: A Learning-based Transportation Oriented Simulation System. *Transportation Research Part B: Methodological*. 2004. Vol. 38. Issue 8. Pp. 613–633. DOI: 10.1016/j.trb.2002.10.001.
18. Schneider R. J. Theory of routine mode choice decisions: An operational framework to increase sustainable transportation. *Transport Policy*. 2013. Vol. 25. Issue 7. Pp. 128–137. DOI: 10.1016/j.tranpol.2012.10.007.
19. Vahidi H., Yan W. How is an informal transport infrastructure system formed? Towards a spatially explicit conceptual model. *Open Geospatial Data, Software and Standards*. 2016. Vol. 1. No. 8. 26 p. DOI: 10.1186/s40965-016-0009-9.
20. Van Essen M., Thomas T., Van Berkun E., Chorus C. From user equilibrium to system optimum: a literature review on the role of travel information, bounded rationality and non-selfish behaviour at the network and individual levels. *Transport reviews*. 2016. Vol. 36. No. 4. Pp. 527–548. DOI: 10.1080/01441647.2015.1125399.
21. Watling D. P., Cantarella G. E. Modelling sources of variation in transportation systems: theoretical foundations of day-to-day dynamic models. *Transportmetrica B: Transport Dynamics*. 2013. Vol. 1. No. 1. Pp. 3–32. DOI: 10.1080/21680566.2013.785372.
22. On approval of the Methodology for evaluating and ranking local projects in order to implement the event «Introduction of intelligent transport systems providing automation of traffic management processes in urban agglomerations, including cities with a population of over 300 thousand people» within the framework of the federal project «System-wide measures for the development of road facilities» of the national project „Safe and high-quality highways”: the Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation dated 25.03.2020 No. АК-60-р. URL: <https://mintrans.gov.ru/documents/8/11078?type=&ysclid=mhsx1kiyco265174129>. (In Russian).



Научная статья  
УДК 629.424.15

# Исследование параметров работы систем охлаждения на тепловозах при различных условиях эксплуатации

Сергей Михайлович Овчаренко<sup>1</sup>, Александр Сергеевич Анисимов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Омский государственный университет путей сообщения, Омск, Россия

## Investigation of parameters for cooling systems on diesel locomotives under various operating conditions

Sergey M. Ovcharenko<sup>1</sup>, Alexander S. Anisimov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Omsk State Transport University, Omsk, Russia

### Аннотация

В статье проанализированы параметры работы системы охлаждения тепловозов. В результате моделирования установлено, что при различных сочетаниях режимов работы локомотива количество отведенного от охлаждающей жидкости тепла не соответствует количеству тепла, отведенного в дизеле в охлаждающую жидкость, а при частых изменениях этих параметров в процессе эксплуатации система не способна обеспечить стабильность температуры охлаждающей жидкости. Сделан вывод о необходимости модернизировать существующую конструкцию системы охлаждения, что позволит регулировать производительность водяного насоса и частоту вращения вентилятора холодильника независимо от режима работы локомотива.

**Ключевые слова:** тепловоз, дизель-генераторная установка, теплообмен, система охлаждения, моделирование

### Abstract

The article analyzes parameters of cooling system for diesel locomotives. As a result of the simulation, it was found that with various combinations of operating modes of the locomotive, the amount of heat removed from the coolant does not correspond to the amount of heat removed in the diesel engine to the coolant, and with frequent changes in these parameters during operation, the system is unable to ensure the stability of the coolant temperature. It is concluded that it is necessary to modernize the existing design of the cooling system, which will allow regulating the performance of the water pump and the fan speed of the refrigerator, regardless of the operating mode of the locomotive.

**Keywords:** diesel locomotive, diesel generator set, heat exchange, cooling system, simulation

DOI: 10.20291/1815-9400-2025-4-22-27

Принцип работы системы охлаждения тепловоза основан на отводе избыточного тепла, выделяемого в дизеле при сгорании топлива, в охлаждающую жидкость и моторное масло. Чтобы поддерживать температуру охлаждающей жидкости не выше допустимой, предусмотрена система автоматического регулирования. На разных сериях тепловозов системы охлаждения и системы регулирования температуры теплоносителей отличаются как конструктивно, так и по принципу регулирования. При этом следует учитывать, что затраты мощности дизеля и соответственно расхода дизельного топлива на привод насосов и вентилятора холодильника могут достигать 10 % и более.

Задача системы регулирования температуры охлаждающей жидкости — поддержание стабильности температуры на соответствующем режиме охлаждения. Интенсивное снижение или повышение температуры охлаждающей жидкости приводит к увеличению разности температуры между внутренней и наружной стенками цилиндрической втулки, внутренних напряжений в металле и, как следствие, к повышенному износу и возникновению трещин в цилиндрических втулках.

В статье приведены результаты моделирования теплообменных процессов на примере системы охлаждения маневрового тепловоза серии ТЭМ18ДМ. На рис. 1 представлена схема этой системы [1], в которой предусмотрено семь теплообменников. Насосы 5, 7 имеют механический привод от коленчатого вала дизеля, поэтому их производительность зависит от режима работы дизеля. Привод вентилятора холодильника механический (через редуктор от коленчатого вала дизеля), поэтому частота вращения вентилятора и его производительность также зависят от режима работы дизеля.

Наряду с повышением надежности системы охлаждения, одной из основных задач является снижение энергозатрат на ее работу при обеспечении стабильности температуры теплоносителей. В качестве примера на рис. 2 и 3 приведены графики температуры охлаждающей жидкости и моторного масла тепловоза ТЭМ18ДМ, полученные по результатам контроля бортовой системой БОРТ.

Нестабильность режимов работы дизель-генераторной установки маневрового тепловоза, частые чередования режимов нагрузки и холостого хода в большинстве случаев приводят к значительному разбросу температуры теплоносителей и, как следствие, к повышенному расходу топлива и снижению надежности работы локомотива [2, 3].

Штатная система регулирования температуры охлаждающей жидкости в горячем контуре работает по следующему алгоритму. При температуре охлаждающей жидкости на выходе из дизеля  $+75^{\circ}\text{C}$  открываются жалюзи шахты холодильника. По достижении температуры  $+80^{\circ}\text{C}$  включается вентилятор холодильника, а по достижении  $+90^{\circ}\text{C}$  происходит сброс нагрузки. При температуре моторного масла, равной  $+65^{\circ}\text{C}$ , открываются жалюзи, по достижении температуры  $+70^{\circ}\text{C}$  включается вентилятор, по достижении  $+75^{\circ}\text{C}$  происходит сброс нагрузки. Контроль температуры наддувочного воздуха осуществляется следующим образом: при температуре  $+25^{\circ}\text{C}$  открываются жалюзи, а при температуре  $+55^{\circ}\text{C}$  включается вентилятор [4]. Регулирование температуры теплоносителей по такому алгоритму нацелено на то, чтобы не допустить перегрева, однако задача стабилизации температуры теплоносителей при этом не решается.

Процессы теплообмена в узлах системы охлаждения подвержены множеству случайных факторов, которые в настоящее время при реализации алгоритма регулирования температуры охлаждающей жидкости (режим работы дизеля, частота вращения вентилятора, скорость циркуляции охлаждающих жидкостей по трубопроводам и теплообменникам) [5–7] не учитываются. В технической документации [4] приводятся следующие параметры работы систем тепловоза на номинальном режиме:

производительность масляного насоса —  $35 \text{ м}^3/\text{ч}$  (при частоте вращения коленчатого вала дизеля  $750 \text{ мин}^{-1}$ );

производительность водяного насоса горячего контура —  $50 \text{ м}^3/\text{ч}$  (при частоте вращения коленчатого вала дизеля  $750 \text{ мин}^{-1}$ );

производительность водяного насоса холодного контура —  $25 \text{ м}^3/\text{ч}$  (при частоте вращения коленчатого вала дизеля  $750 \text{ мин}^{-1}$ );

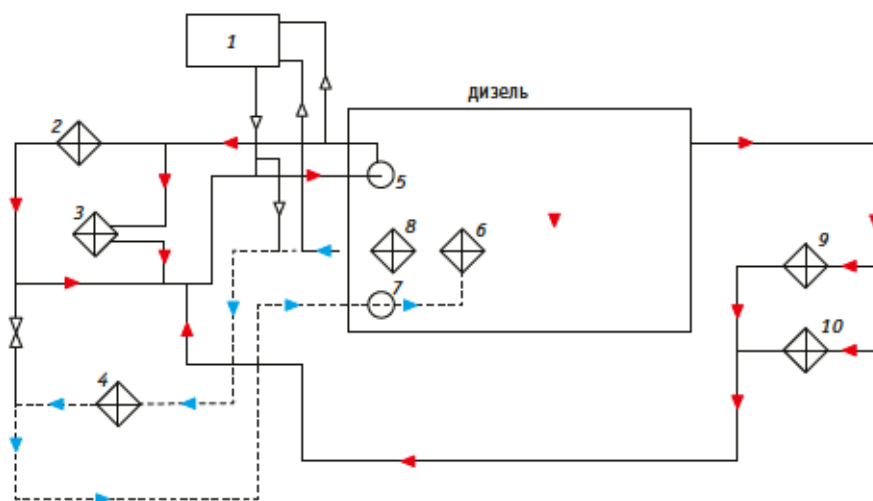


Рис. 1. Система охлаждения тепловоза ТЭМ18ДМ:

1 — расширительный бак; 2, 4 — секции холодильника горячего и холодного контуров; 3 — подогреватель топлива; 5, 7 — водяные насосы горячего и холодного контуров; 6 — охладитель наддувочного воздуха; 8 — охладитель моторного масла; 9, 10 — калориферы кабины машиниста; прямая линия — горячий, пунктир — холодный контур

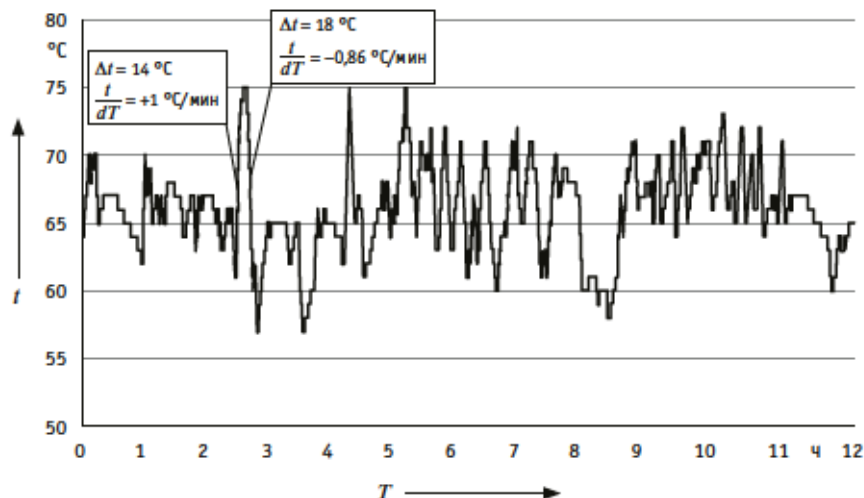


Рис. 2. Температура охлаждающей жидкости на выходе из дизеля

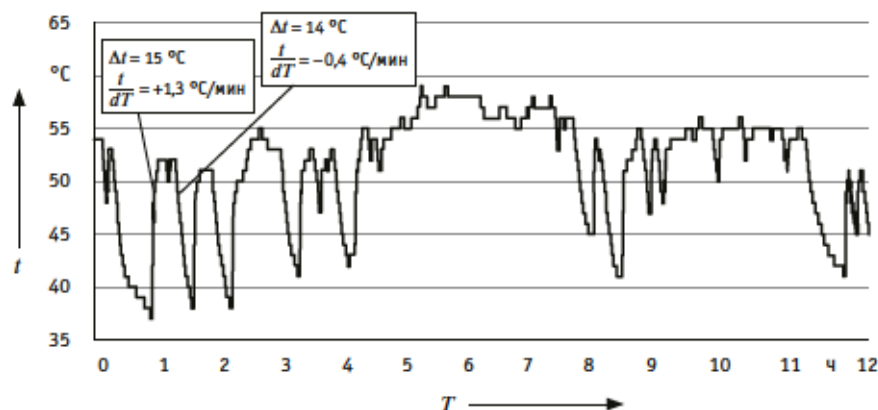


Рис. 3. Температура моторного масла на выходе из дизеля



Таблица 1

Параметры работы системы охлаждения тепловоза ТЭМ18ДМ при различных режимах работы дизель-генераторной установки

Параметр	Нулевая ПК (холостой ход)	8-я ПК (нагрузка)
Частота вращения коленчатого вала дизеля, мин <sup>-1</sup>	300	750
Частота вращения вентилятора холодильника, мин <sup>-1</sup>	422	1055
Производительность водяного насоса горячего контура, м <sup>3</sup> /ч	20	50
Производительность водяного насоса холодного контура, м <sup>3</sup> /ч	10	25
Количество тепла, выделяемого в охлаждающую жидкость, кДж/ч	39454	1184512
Количество тепла, выделяемого в моторное масло, кДж/ч	9991	299973
Количество тепла, отводимое от наддувочного воздуха, кДж/ч	6148	184599

Таблица 2

Количество тепла, передаваемое в горячий контур охлаждения на режимах нагрузки

ПК	1	2	3	4	5	6	7	8
$Q_{\text{в}}, \text{Дж/ч} \cdot 10^5$	0,947	1,664	2,442	3,648	5,272	7,352	9,896	11,830

подача вентилятора — 130000 м<sup>3</sup>/ч (при частоте вращения коленчатого вала дизеля 750 мин<sup>-1</sup>).

При работе дизеля на полной мощности 882 кВт с удельным расходом топлива 208,7 г/(кВт·ч) общее количество теплоты, выделяемое от сгорания топлива, составит 8359 МДж/ч, а отвод тепла в охлаждающую жидкость и в моторное масло — 1613 МДж/ч. При работе на холостом ходу на нулевой позиции контроллера машиниста (ПК) общее количество теплоты, выделяемое при сгорании топлива, составит 341,6 МДж/ч [8], отвод тепла в охлаждающую жидкость и в моторное масло — 65,9 МДж/ч. Таким образом, можно принять, что количество тепла, которое необходимо отводить от теплоносителей в процессе работы дизеля, будет отличаться на разных режимах более чем в 20 раз.

Стабилизация температуры охлаждающей жидкости при таком разбросе режимов выделения тепла — сложная, но решаемая задача. Элементы более тонкой настройки системы регулирования температуры теплоносителей реализованы, например, на тепловозах ТЭП70, ТЭ116 и ТЭ25 различных модификаций. В частности, гидрообъемный привод вентиляторов холодильника на тепловозе ТЭП70 позволяет плавно регулировать частоту вращения вентиляторов и количество тепла, отводимого от охлаждающей жидкости. На тепловозах ТЭ116 и ТЭ25 в шахте холодильника установлено четыре мотор-вентилятора, т.е. можно реализовать четыре режима циркуляции охлаждающего воздуха независимо от режима работы дизеля.

Опыт эксплуатации этих тепловозов позволяет сделать следующий вывод: современные системы охлаждения должны обладать способностью предиктивно реагировать на изменение внешних факторов, выбирать такие режимы, которые будут стабилизировать температуру охлаждающей жидкости и тем самым снижать затраты энергии на обеспечение работы самой системы охлаждения. Конструкция подобных систем предусматривает плавное регулирование частоты вращения вентилятора холодильника и производительности насосов прокачки теплоносителей. В основу алгоритма управления параметрами работы системы охлажде-

ния закладываются результаты моделирования теплообменных процессов для конкретной конструкции. Базовыми параметрами являются диапазон теплоотвода (минимальное и максимальное значения), объем теплоносителей (охлаждающей жидкости, моторного масла), количество секций холодильника, характеристики охладителей моторного масла и наддувочного воздуха.

Рассмотрим условия работы системы охлаждения тепловоза ТЭМ18ДМ в режиме нагрузки на позициях контроллера машиниста 1–8 при изменении температуры воздуха в диапазоне от –15 до +40 °С. Исследуем два варианта работы при температуре охлаждающей жидкости на выходе из дизеля +50 и +90 °С.

Параметры работы дизеля и системы охлаждения на нулевой позиции контроллера машиниста и при номинальном режиме под нагрузкой приведены в табл. 1.

В горячем контуре системы охлаждения дизеля в секциях холодильника отводится тепло, поступившее в охлаждающую жидкость. Количество тепла, выделенное при сгорании топлива, кДж/ч, определяется по выражению

$$Q_i = b e_i N e_i H u, \quad (1)$$

где  $i$  — номер позиции контроллера машиниста (ПК);  $b e_i$  — удельный расход топлива на  $i$ -й ПК, кг/(кВт·ч);  $N e_i$  — мощность дизель-генераторной установки (ДГУ) на  $i$ -й ПК, кВт;  $H u$  — теплотворная способность дизельного топлива, кДж/кг.

Количество тепла, поступающее в охлаждающую жидкость горячего контура при работе ДГУ, рассчитывается следующим образом, кДж/ч:

$$Q_i = Q_{\text{ав}}, \quad (2)$$

где  $q_{\text{в}}$  — доля тепла, отводимого в охлаждающую жидкость.

Для расчетов примем  $q_{\text{в}} = 0,154$  [8]. Количество тепла, передаваемое в горячий контур на различных режимах, приведено в табл. 2. Чтобы в процессе эксплуатации обеспечить надежную работу дизеля и исключить значительные перепады температуры охлаждающей жидкости, следует не только не допускать перегрева, но и поддерживать стабильную температуру охлаждающей жидкости при различных режимах работы ДГУ. Необходимость дальнейших исследований и поиска решений по повышению эффективности работы систем охлаждения подтверждаются в том числе и данные, представленные на рис. 1 и 2.



Чтобы исключить резкие температурные перепады, снижение температуры охлаждающей жидкости в секциях холодильника должно находиться в интервале 5–7 °С (для расчетов примем его равным 5 °С).

В штатном режиме работы системы охлаждения расход охлаждающей жидкости (кг/ч) в горячем контуре рассчитывается так:

$$G_i = 3600 \rho_b f_b z_T v_T \quad (3)$$

где  $\rho_b$  — плотность охлаждающей жидкости, зависящая от ее температуры, кг/м<sup>3</sup>;  $f_b$  — площадь живого сечения секции для прохода охлаждающей жидкости, м<sup>2</sup>;  $z_T$  — количество секций горячего контура;  $v_T$  — скорость движения охлаждающей жидкости в трубках секций холодильника, м/с.

Требуемый расход воды для отвода тепла при снижении в секциях холодильника температуры охлаждающей жидкости на 5 °С при различных режимах работы ДГУ можно определить следующим образом, м<sup>3</sup>/ч:

$$V = \frac{Q}{(t_1 - t_2) c_b \rho_b}, \quad (4)$$

где  $t_1$  — температура охлаждающей жидкости на входе в секции холодильника, °С;  $t_2$  — температура охлаждающей жидкости на выходе из секций холодильника, °С;  $c_b$  — удельная теплоемкость воды, кДж/(кг·К).

На рис. 4 представлены результаты расчета штатной производительности водяного насоса в зависимости от ПК (линия 1), а также расчеты требуемой производительности в зависимости от ПК и температуры охлаждающей жидкости на выходе из дизеля (линия 2). На основании этих данных можно сделать вывод, что колебания температуры охлаждающей жидкости главным образом обусловлены несоответствием между штатными и требуемыми параметрами ее работы на соответствующих режимах.

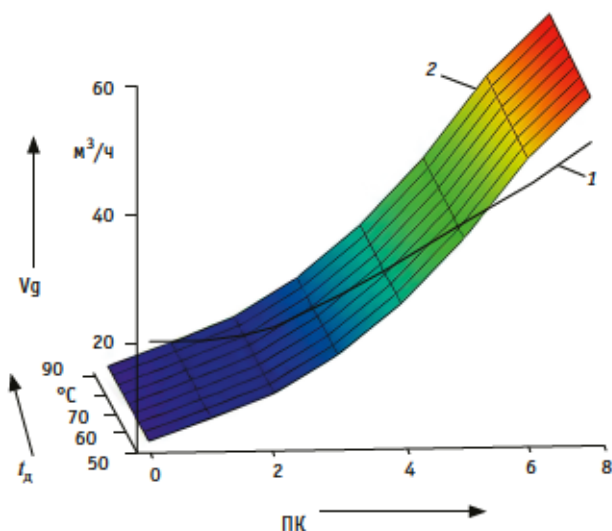


Рис. 4. Штатная (1) и требуемая (2) производительность насоса горячего контура

Расчет параметров системы охлаждения основан на совместном решении фундаментальных уравнений теплового баланса и теплопередачи для воздуха и охлаждающей жидкости [8]:

$$\begin{cases} Q = V_b c_b (t_1 - t_2); \\ Q = V_{вз} c_{вз} (\tau_2 - \tau_1); \\ Q = 0,5 K F z (t_1 + t_2 - \tau_2 - \tau_1), \end{cases} \quad (5)$$

где  $c_{вз}$  — теплоемкость воздуха, кДж/(кг·К);  $\tau_1$  — температура наружного воздуха, °С;  $\tau_2$  — температура воздуха на выходе из секций холодильника, °С;  $K$  — коэффициент теплопередачи от жидкости к воздуху, кДж/(м<sup>2</sup>·К);  $F$  — площадь поверхности одной секции, омываемая воздухом, м<sup>2</sup>;  $z$  — количество секций в контуре.

Коэффициент теплопередачи определяется по выражению [9]

$$K = 4,187 \frac{185}{\left(1 + \frac{19,2}{U_r}\right) \left(0,856 + \frac{0,13}{v_r}\right)}, \quad (6)$$

где  $U_r$  — массовая скорость воздуха, кг/(м<sup>2</sup>·с).

Система уравнений (5) использована для моделирования тепловых процессов при изменении таких параметров, как режим работы ДГУ (1–8-я ПК), температура наружного воздуха (от –15 до 40 °С с шагом 5 °С) и температура охлаждающей жидкости на выходе из дизеля (расчеты проведены при  $t_1 = 50$  °С и  $t_1 = 90$  °С). Для совместного решения уравнений системы (5) применялся итерационный метод. Поверхности отклика температуры воздуха и охлаждающей жидкости на выходе из секций холодильника представлены на рис. 5 и 6.

Результаты моделирования наглядно показывают, что при различных сочетаниях режимов работы ДГУ, температуре

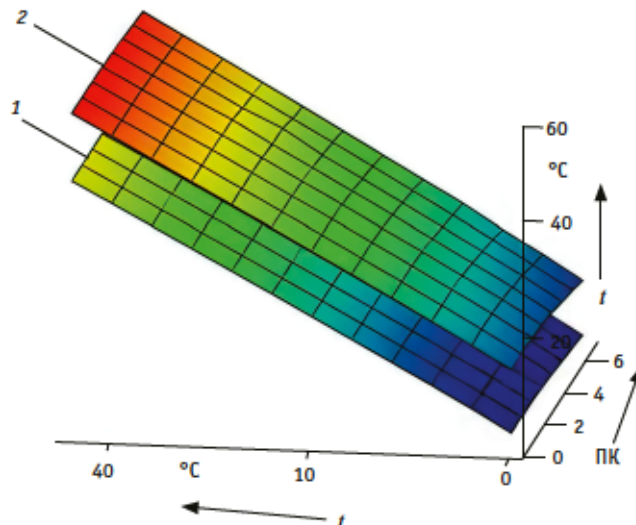


Рис. 5. Температура воздуха на выходе из секций холодильника: 1 — при  $t_1 = 50$  °С; 2 — при  $t_1 = 90$  °С

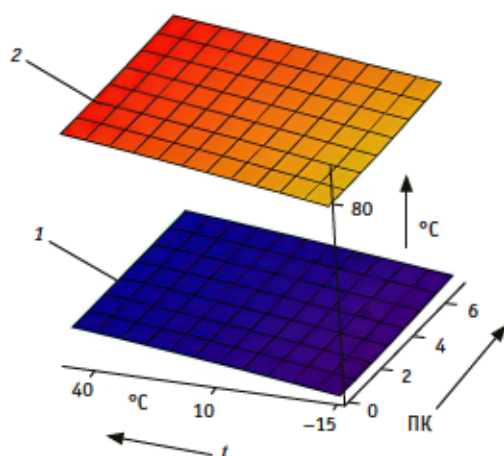


Рис. 6. Температура охлаждающей жидкости на выходе из секций холодильника:  
1 — при  $t_1 = 50^\circ\text{C}$ ; 2 — при  $t_1 = 90^\circ\text{C}$

наружного воздуха, температуре охлаждающей жидкости на выходе из дизеля количество отведенного тепла от охлаждающей жидкости не соответствует количеству тепла, отведенного в дизеле в охлаждающую жидкость (рис. 7). При частых изменениях этих параметров в процессе эксплуатации система управления не справляется с задачей по обеспечению стабильности температуры охлаждающей жидкости, что негативно сказывается на надежности и экономичности работы тепловоза.

#### Сведения об авторах:

**Сергей Михайлович Овчаренко**,  
доктор технических наук, профессор кафедры «Локомотивы»  
Омского государственного университета путей сообщения

**Александр Сергеевич Анисимов**,  
доктор технических наук, профессор кафедры «Локомотивы»  
Омского государственного университета путей сообщения

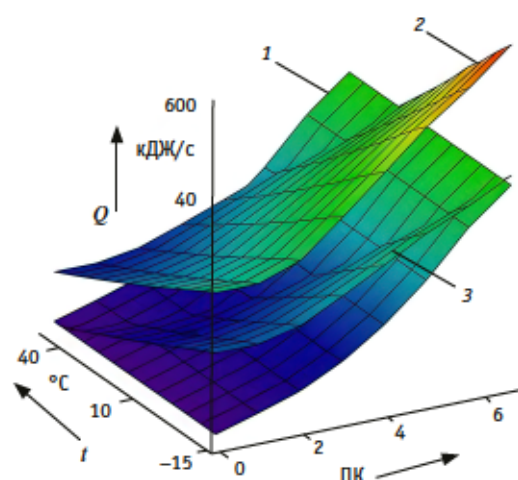


Рис. 7. Количество отведенного тепла:  
1 — требуемого; 2 — при  $t_1 = 90^\circ\text{C}$ ; 3 — при  $t_1 = 50^\circ\text{C}$

Таким образом, очевидно, что при существующей конструкции элементов системы охлаждения теплоносителей дизеля решить задачу стабилизации температуры охлаждающей жидкости на установленном уровне невозможно. Следовательно, необходима модернизация конструкций систем охлаждения с механическим приводом насосов и вентилятора от коленчатого вала дизеля, которая позволит регулировать производительность водяного насоса и частоту вращения вентилятора холодильника независимо от режима работы ДГУ.

#### Authors information:

**Sergey M. Ovcharenko**,  
DSc in Engineering, Professor of Locomotives Department,  
Omsk State Transport University

**Alexander S. Anisimov**,  
DSc in Engineering, Professor of Locomotives Department,  
Omsk State Transport University

#### Литература

1. Евенко В. И., Иванов Б. В., Апанович Н. Г. Конструкция, расчет и проектирование тепловозов. Москва : Машиностроение, 1969. 387 с.
2. Овчаренко С. М., Минаков В. А., Платковский М. А. Влияние степени загрузки дизель-генераторной установки на расход топлива маневровых локомотивов // Известия Транссиба. 2024. № 3 (59). С. 13–21. ISSN 2220-4245.
3. Грачев В. В., Нестеров А. И., Федотов М. В. Математическая модель водяной системы тепловоза ТЭП70БС // Вестник транспорта Поволжья. 2025. № 1 (109). С. 27–37. ISSN 1997-0722.
4. Некрасов Г. И. Повышение эффективности системы охлаждения тепловозного дизеля с использованием индивидуального привода водяных насосов : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва, 2019. 158 с.
5. Овчаренко С. М., Ринг И. С. Исследование распределения температурных полей по узлам тепловоза // Эксплуатационная

#### References

1. Evenko V. I., Ivanov B. V., Apanovich N. G. Construction, calculation and design of diesel locomotives. Moscow : Mechanical engineering, 1969. 387 p. (In Russian).
2. Ovcharenko S. M., Minakov V. A., Platkovskii M. A. The diesel generator set loading degree influence on the shunting locomotives fuel consumption. *Journal of Transsib Railway Studies*. 2024. No. 3 (59). Pp. 13–21. ISSN 2220-4245. (In Russian).
3. Grachev V. V., Nesterov A. I., Fedotov M. V. Mathematical model of the TEP70BS diesel locomotive water system. *Bulletin of transport of the Volga region*. 2025. No. 1 (109). Pp. 27–37. ISSN 1997-0722. (In Russian).
4. Nekrasov G. I. Improving the efficiency of diesel locomotive cooling system using an individual water pump drive : PhD in Engineering Thesis. Moscow, 2019. 158 p. (In Russian).
5. Ovcharenko S. M., Ring I. S. Investigation of the distribution of temperature fields across the nodes of a diesel locomotive.



надежность локомотивного парка и повышение эффективности тяги поездов : материалы VII всероссийской научно-технической конференции с международным участием, Омск, 18 ноября 2022 г. Омск : Изд-во ОмГУПС, 2022. С. 474–479.

6. Оперативный контроль эффективности работы системы охлаждения тепловоза / С. М. Овчаренко, А. А. Метелев, В. А. Минаков, В. Р. Ведрученко // Известия Транссиба. 2019. № 4 (40). С. 9–17. ISSN 2220-4245.
7. Сахаров П. А. Проектирование тепловоза. Гомель : БелГУТ, 2017. 79 с.
8. Тепловоз ТЭМ18ДМ. Руководство по эксплуатации. Т. 1. Москва : ЗАО «УК БМЗ», 2009. 156 с.
9. Овчаренко С. М., Ринг И. С., Овчаренко С. С. Исследование температурных режимов работы систем охлаждения тепловозов в процессе эксплуатации // Известия Транссиба. 2022. № 2 (50). С. 117–123. ISSN 2220-4245.

Operational reliability of the locomotive fleet and increased train traction efficiency : proceedings of the 7th All-Russian scientific and practical conference with international participation, Omsk, November 18, 2022. Omsk : Publishing House of OSTU, 2022. Pp. 474–479. (In Russian).

6. Ovcharenko S. M., Metelev A. A., Minakov V. A., Vedruchenko V. R. Operational control of system performance cooling of the locomotive. *Journal of Transsib Railway Studies*. 2019. No. 4 (40). Pp. 9–17. ISSN 2220-4245. (In Russian).
7. Sakharov P. A. Design of a diesel locomotive. Gomel : BelSUT, 2017. 79 p. (In Russian).
8. Diesel locomotive TEM18DM. User Manual. Vol. 1. Moscow, 2009. 150 p. (In Russian).
9. Ovcharenko S. M., Ring I. S., Ovcharenko S. S. Investigation of temperature modes of operation of diesel locomotive cooling systems during operation. *Journal of Transsib Railway Studies*. 2022. No. 2 (50). Pp. 117–123. ISSN 2220-4245. (In Russian).

Научная статья  
УДК 629.423.31

## Исследование неравномерности воздушного зазора в вентильно-индукторной машине тягового исполнения

Екатерина Евгеньевна Мирошниченко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ростовский государственный университет путей сообщения, Ростов-на-Дону, Россия

## Investigation for unevenness of air gap in a valve-inductor traction machine

Ekaterina E. Miroshnichenko<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russia

### Аннотация

Вентильно-индукторный двигатель является перспективной электрической машиной для применения в системе тяги скоростного электровоза. Основное препятствие массового использования такого типа машин в качестве тягового электродвигателя — силы одностороннего магнитного притяжения, которые, воздействуя на подшипники вентильно-индукторного двигателя, снижают их ресурс и ухудшают виброакустические показатели машины. По результатам исследования этих сил при различных вариантах динамического смещения на основе использования математических моделей программы MATLAB-Simulink и конечно-элементного метода пакета FEMM установлено, что в вентильно-индукторном тяговом двигателе они могут достигать высоких значений. Предложен комплекс мероприятий на этапах проектирования, изготовления, ремонта и эксплуатации вентильно-индукторного тягового двигателя, позволяющий свести к минимуму действие сил одностороннего магнитного притяжения на подшипниковые узлы и повысить ресурс работы электрической машины. Использование вентильно-индукторного двигателя, имеющего длительный срок службы подшипников, в системе тягового привода создаст предпосылки для создания конкурентоспособного скоростного подвижного состава нового поколения.

**Ключевые слова:** электровоз, асинхронная электрическая машина, вентильно-индукторный тяговый двигатель, динамическое смещение, силы одностороннего магнитного притяжения

### Abstract

The valve-inductor motor is a promising electric machine for use in the traction system of a high-speed electric locomotive. The main obstacle to the mass use of this type of machine as a traction electric motor is the forces of unilateral magnetic attraction, which, acting on the bearings of the valve-inductor motor, reduce their service life and worsen the vibro-acoustic characteristics of the machine. Based on the results of the study of these forces in various variants of dynamic displacement based on the use of mathematical models of the MATLAB-Simulink program and the finite element method of the FEMM package, it was found that they can reach high values in a valve-inductor traction motor. A set of measures is proposed at the stages of design, manufacture, repair and operation of a valve-inductor traction motor, which minimizes the effect of unilateral magnetic attraction forces on bearing assemblies and increases the service life of an electric machine. The use of a valve-inductor motor with a long bearing life in a traction drive system will create the prerequisites for the creation of competitive high-speed rolling stock of a new generation.

**Keywords:** electric locomotive, asynchronous electric machine, valve-inductor traction motor, dynamic displacement, unilateral magnetic attraction forces

DOI: 10.20291/1815-9400-2025-4-28-33

В настоящее время для оптимизации перевозочного процесса требуются скоростные двухсистемные электровазы, производство которых не будет зависеть от поставок импортных комплектующих. Двухсистемный электроваз отечественного производства даст возможность исключить продолжительные стоянки на станциях стыковки тока и замену локомотива, сэкономить затраченное в пути время и рационально использовать локомотивную бригаду.

В 2026 г. планируется ввести в эксплуатацию первый российский двухсистемный электроваз, который должен стать аналогом ЭП20 и иметь компоненты существующих единиц электрического подвижного состава (ЭПС). Соответственно новый электроваз должен развивать скорость до 160–200 км/ч, обладать мощностью 7200 кВт и асинхронными тяговыми электродвигателями (АТЭД).

Однако анализ данных о распределении отказов электрооборудования за два года эксплуатации электроваза ЭП20 «Олимп» (рис. 1) показал, что асинхронные электрические машины (АЭМ) попадают в разряд лимитирующих узлов [1].

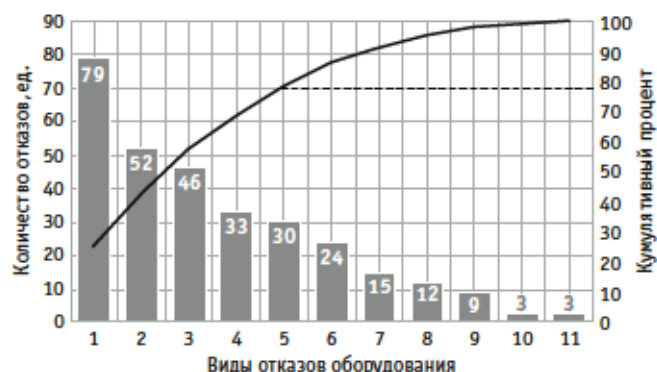


Рис. 1. Диаграмма Парето по видам отказов электрооборудования электровазов ЭП20 «Олимп»:

- 1 — механическое оборудование; 2 — пневматическое и тормозное оборудование; 3 — электрические машины (тяговые электродвигатели и вспомогательные машины); 4 — электроаппаратура;
- 5 — низковольтные цепи; 6 — устройства безопасности;
- 7 — преобразователи; 8 — системы управления и диагностики;
- 9 — кабина управления и санитарный модуль;
- 10 — тяговые трансформаторы; 11 — высоковольтные цепи



АТЭД относятся к наиболее ответственному оборудованию электровозов ЭП20, принимающему на себя действие больших нагрузок. Ограниченные размеры АТЭД приводят к максимальному использованию пространства внутри электрической машины и росту ее рабочей температуры. При нарушении правил эксплуатации либо по причине выхода из строя систем охлаждения возникает перегрев в АТЭД. В частности, перегрев обмотки статора приводит к снижению ресурса ее изоляции, а при перегреве роторной обмотки происходит выплавление роторных стержней [2, 3].

Перспективной электрической машиной для использования в системе тяги электровоза ЭП20 «Олимп» является вентильно-индукторный двигатель (ВИД), который в сравнении с АЭМ обладает рядом преимуществ, таких как низкая материалоемкость (применяются недорогие, недефицитные материалы), более простая конструкция магнитной системы, энергоэффективность, высокая перегрузочная способность. Отсутствие роторной обмотки повышает надежность ВИД (исключены перегрев ротора и разрушение изоляции под воздействием центробежных сил). Обмотки статора просты, надежны, обладают высокой жесткостью, не требуют дополнительной фиксации. Пологость характеристики КПД в широком интервале изменения мощности делает ВИД весьма перспективным для ЭПС с частыми пусками [4–7].

Вместе с тем вентильно-индукторные машины (ВИМ) не лишены и недостатков, например, такого, как высокие пульсации электромагнитного момента, приводящие к шуму и вибрациям в электрической машине. Однако этот недостаток можно свести к минимуму при использовании различных эффективных способов, рассмотренных в работах [8–10].

Помимо высоких пульсаций электромагнитного момента, целевому применению ВИМ, в том числе на железнодорожном транспорте в качестве тяговых электродвигателей, препятствует наличие сил одностороннего магнитного притяжения (ОМП). Основная причина их появления — неравномерность воздушного зазора, возникающая в электрическом двигателе из-за технологических особен-

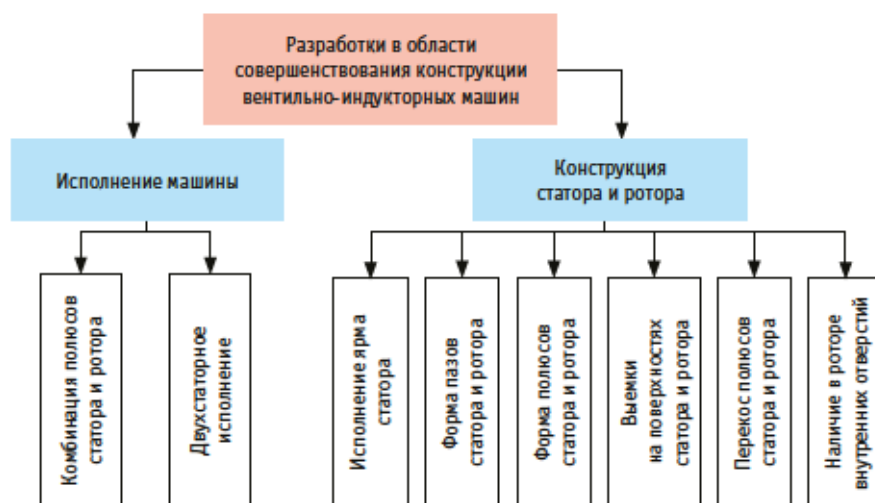


Рис. 2. Совершенствование конструкции магнитной системы ВИМ

ностей его изготовления и эксплуатации. Нередко силы ОМП носят скрытый характер и проявляются как ухудшение виброакустических показателей. Кроме того, силы ОМП, приложенные к подшипникам и направленные в сторону действия силы тяжести, приводят к преждевременному износу подшипникового узла и выходу из строя самой ВИМ [5–7].

Снизить влияние сил ОМП в машинах вентильно-индукторного типа можно при использовании различных способов, которые объединяют в две группы. К первой группе относят методы, позволяющие улучшить характеристики машины за счет изменения конструкции магнитной системы [11, 12] (рис. 2). Однако эти способы приводят к существенному усложнению магнитопровода, а кроме того, могут служить причиной снижения производительности ВИМ.

Вторая группа методов, связанная с совершенствованием системы управления электрической машиной (синусоидальное и гибридное возбуждение, управление полюсными токами и т.д.), тоже не лишена недостатков. Например, двухступенчатое управление коммутацией приводит к возникновению хвостового тока, а значит, и крутящего момента с отрицательным знаком. Кроме того, меры по улучшению системы управления усложняют ее, тем самым повышая стоимость тягового привода [13–15].

Именно поэтому цель публикуемой статьи, т.е. исследование сил ОМП при неравномерности воздушного зазора

в ВИД тягового исполнения, анализ этих сил и последующая разработка рекомендаций по устранению либо минимизации их влияния на подшипники, является весьма актуальной.

В качестве объекта исследования выбран перспективный вентильно-индукторный тяговый двигатель (ВИТД) для электровоза, являющегося прототипом ЭП20 «Олимп».

При расчете магнитной системы ВИТД в качестве исходных данных взяты дополнительные заранее известные габаритные размеры двигателя, так как его магнитная система проектируется в корпусе АТЭД типа ДТА-1200А, установленного на электровозе «Олимп» [7].

Основная причина возникновения сил ОМП — неравномерность воздушного зазора в электродвигателе, которая может иметь технологический и эксплуатационный характер.

На предварительном этапе исследования принят ряд начальных условий:

рассматривалось плоскопараллельное электромагнитное поле в поперечном сечении электрической машины, которое не имеет возможности выходить за внешний контур поверхности магнитопровода статора;

работа ВИТД осуществлялась в номинальном режиме;

питание — одноимпульсное;

исключены явление перекося фаз, а также влияние гистерезиса и вихревых токов на характеристики магнитного поля ВИТД;

величины неравномерности и средней температуры воздушного зазора в электрической машине приняты постоянными во времени;

ВИТД для электровоза, прототипом которого служит ЭП20 «Олимп», имеет мощность на валу  $P = 1300$  кВт, напряжение  $U_d = 2200$  В, частоту вращения  $n = 1766$  об/мин, величину воздушного зазора на одну сторону  $\delta = 1,6$  мм [7].

Расчеты на начальном этапе выполнялись с использованием математических моделей программы MATLAB-Simulink. Дальнейшие вычисления проводились при помощи конечно-элементного метода пакета FEMM. Поэтапный алгоритм расчета сил ОМП в ВИТД приведен в статье [7].

Расчетные данные сил ОМП при соосном положении полюсов ротора и статора ВИТД, когда ось ротора имеет динамическое смещение с шагом 0,2 мм, представлены на рис. 3а; кривые сил ОМП, полученные для варианта расположения полюсов в электрической машине, когда электромагнитный момент достигает максимальных значений  $M_{\max}$  — на рис. 3б.

Как показал анализ полученных результатов, на всех вариантах смещения имеются участки с резким увеличением и таким же резким спадом силы, а затем с плавным ее снижением. Участок резкого возрастания приходится на токовый интервал, соответствующий прямолинейной части кривой намагничивания  $\psi(i, \theta)$ , в конце которого сила достигает максимального значения (рис. 4). Последующий резкий спад характерен для участка перегиба кривой намагничивания. Далее происходит плавное снижение силы ОМП, соответствующее токовому участку, когда магнитная система электрической машины выходит в насыщение.

Пояснить характер изменения сил с точки зрения различной степени насыщения магнитной системы позволяет рис. 5. Так, случаи ненасыщенной магнитной системы (рис. 5а) соответствуют участку резкого возрастания силы ОМП. Если смещение ротора осуществляется вертикально вниз, то в нижней части магнитопровода электрической машины с меньшим воздушным зазором силовые линии магнитного поля более плотно располагаются друг относительно друга, поэтому влияние электромагнитной силы

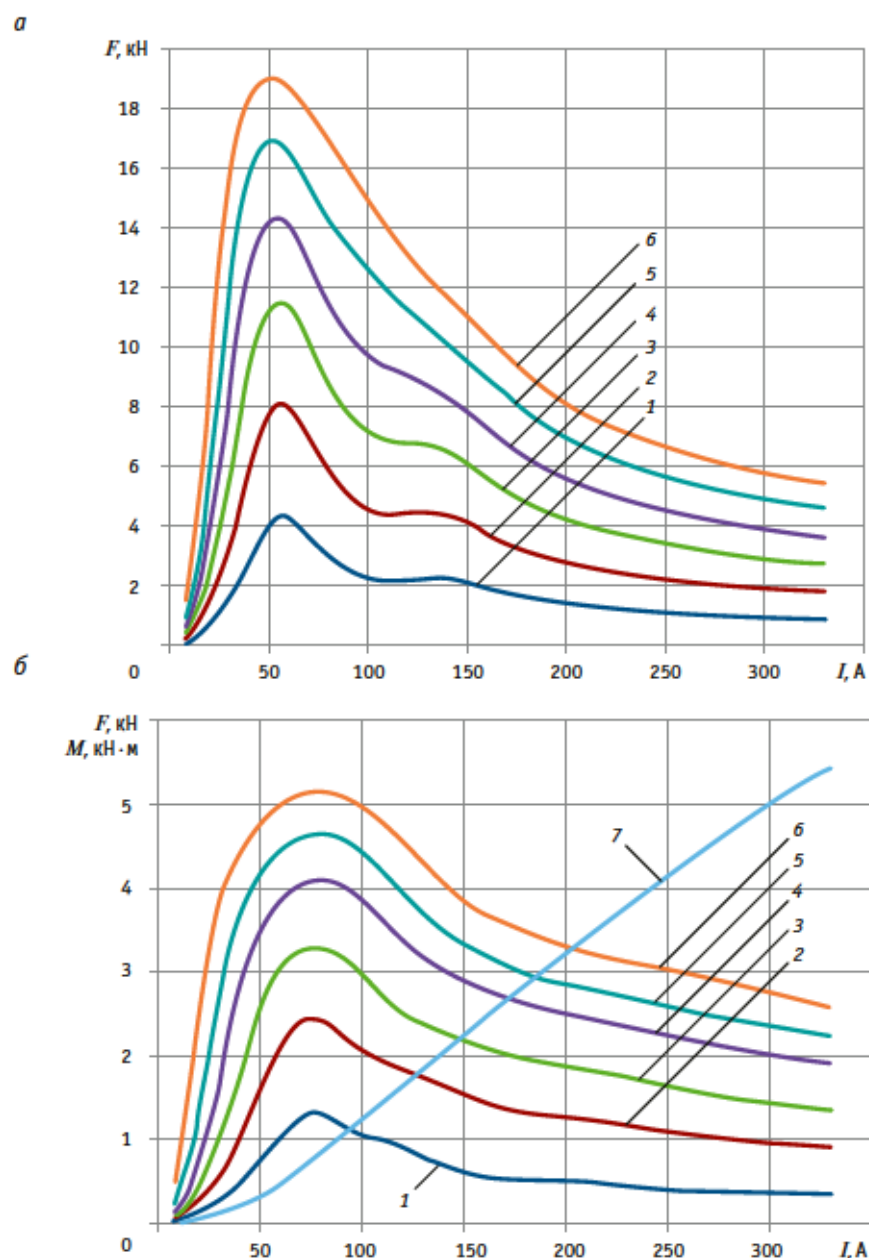


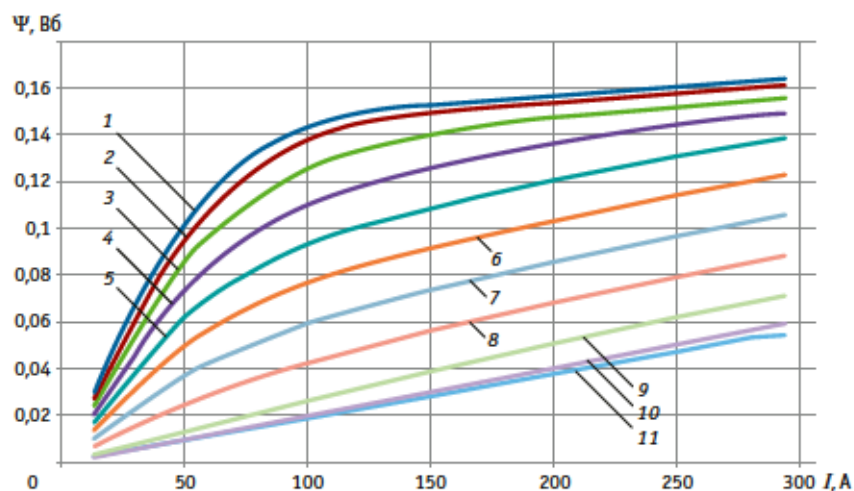
Рис. 3. Параметры ВИТД при динамическом смещении с шагом 0,2 мм:  
а — кривые сил ОМП при соосном расположении полюсов; б — кривые сил ОМП для случая  $M_{\max}$ ;  $F$  — силы ОМП;  $M$  — электромагнитный момент;  
1 —  $F(\Delta = 0,2)$ ; 2 —  $F(\Delta = 0,4)$ ; 3 —  $F(\Delta = 0,6)$ ; 4 —  $F(\Delta = 0,8)$ ;  
5 —  $F(\Delta = 1)$ ; 6 —  $F(\Delta = 1,2)$ ; 7 —  $M(\Delta = 0,2)$

здесь велико. Спад величины силы ОМП приходится на интервал, когда магнитная система ВИТД выходит в насыщение (рис. 5б). В таком случае силовые линии в диаметрально расположенных полюсах распределены равномерно относительно друг друга, причем положение минимального воздушного зазора здесь не играет никакой роли. Тогда рост электромаг-

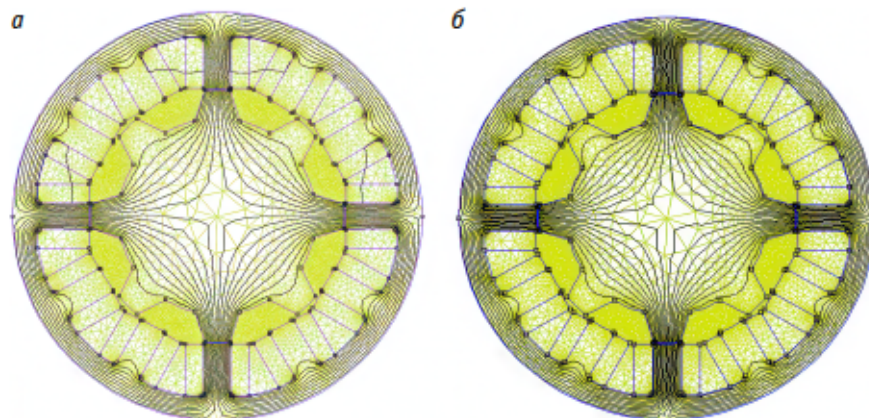
нитной силы сопровождается уменьшением силы ОМП.

Характер изменения кривых сил ОМП для случая  $M_{\max}$  (см. рис. 3б) схож с характером кривых при соосном расположении полюсов (см. рис. 3а), однако максимум силы ОМП при возрастании величины динамического смещения в явном виде не выражен.



Рис. 4. Семейство кривых  $\psi(I, \theta)$  ВИД тягового исполнения:

1 — 180; 2 — 162; 3 — 144; 4 — 126; 5 — 108; 6 — 90; 7 — 72; 8 — 54; 9 — 36; 10 — 18; 11 — 0

Рис. 5. Картина прохождения силовых линий в поперечном сечении ВИД для случая динамического смещения  $\Delta = 0,2$  мм:

а — система не насыщена; б — система вышла в насыщение

По графикам, представленным на рис. 3, можно также сделать вывод о прямой зависимости величины максимальной силы ОМП от динамического смещения. Воздействуя на подшипниковые узлы, силы ОМП ухудшают виброакустические показатели ВИД, при этом снижается ресурс работы подшипников, что приводит к полному выходу из строя электрической машины. Следовательно, возникает необходимость в уменьшении воздействия сил ОМП на подшипники за счет ограничения их величины до допустимых значений.

При проектировании ВИД предлагается устанавливать текущие и предельно

допустимые значения допусков на конструктивные элементы машины и ее магнитную систему. После этого следует суммировать допуски, что позволит определить максимально возможное смещение при сборке.

На этапе сборки при изготовлении ВИД необходимо четко контролировать размеры элементов магнитной системы и сортировать детали, в которых наблюдаются отклонения от требуемых значений. Сборку электрической машины следует проводить на одной установке, при этом особое значение имеет процесс учета отклонений в самих деталях.

В перспективе воздействие сил ОМП при эксплуатации ВИД можно снизить либо устранить средствами управления. Например, независимое управление полюсными токами позволит вдвое уменьшить силу ОМП.

Более эффективным методом, позволяющим снизить влияние сил ОМП, является активный магнитный подвес ротора. С этой целью следует использовать двухканальную систему управления: по первому каналу регулированием амплитудного значения тока создается вращающий момент, второй канал служит для создания самого магнитного подвеса путем подачи токов различной величины в диаметрально расположенные фазные катушки.

Современный ЭПС оборудован микропроцессорными системами управления и диагностики, поэтому с использованием датчиков радиального перемещения ротора можно получать сведения о состоянии воздушного зазора ВИД, что позволит прогнозировать отказы или предотказное состояние подшипников.

## ВЫВОДЫ

Таким образом, результаты выполненного исследования показали, что силы ОМП могут достигать высоких значений при неравномерности воздушного зазора, что обусловлено технологическими и эксплуатационными причинами. Под влиянием данных сил ухудшаются виброакустические характеристики электрической машины, что в основном связано с воздействием сил ОМП на подшипниковые узлы. В результате это приводит к снижению ресурса работы подшипниковых узлов, а нередко и к выходу из строя ВИД.

Предложенный комплекс мероприятий по проектированию, изготовлению, ремонту и эксплуатации ВИД позволит минимизировать действие сил ОМП на подшипниковые узлы и повысить ресурс работы электрической машины.

Использование ВИД, имеющего длительный срок службы подшипников, в системе тягового привода создаст предпосылки для создания конкурентоспособного скоростного подвижного состава нового поколения.

#### Сведения об авторе:

**Екатерина Евгеньевна Мирошниченко**,  
кандидат технических наук, доцент кафедры «Тяговый подвижной состав» Ростовского государственного университета путей сообщения

#### Author's Information:

**Ekaterina E. Miroshnichenko**,  
PhD in Engineering, Associate Professor of Traction Rolling Stock Department, Rostov State Transport University

### Литература

1. Попов Д. И. Разработка научных основ построения электро-технических комплексов для испытания тяговых электрических машин методом взаимной нагрузки : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Омск, 2022. 365 с.
2. Грищенко А. В., Хамидов О. Р. Оценка технического состояния локомотивных асинхронных тяговых электродвигателей с использованием нейронных сетей // Транспорт Российской Федерации. 2018. № 6 (79). С. 19–22. ISSN 1994-831X.
3. Ибраев Ж. С., Джакупов Н. Р., Куштаева Д. С. Асинхронный тяговый привод локомотивов // Вестник КазАТК. 2020. № 1 (112). С. 89–97. ISSN 1609-1817.
4. Мирошниченко Е. Е., Евтеев Н. С. Вспомогательный электропривод с повышенной надежностью для электровоза переменного тока // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. 2024. № 2 (39). С. 42–49. ISSN 2415-8658.
5. Мирошниченко Е. Е. Повышение работоспособности тяговых вентильно-индукторных двигателей за счет применения бортовых микропроцессорных систем диагностики // Интеллектуальные транспортные системы : материалы IV Международной научно-практической конференции, Москва, 22 мая 2025 г. Москва : Изд-во РУТ (МИИТ), 2025. С. 299–304. DOI: 10.30932/9785002587582-2025-299-304.
6. Мирошниченко Е. Е. Анализ сил одностороннего магнитного притяжения при неравномерном воздушном зазоре вентильно-индукторной электрической машины // Актуальные проблемы общества, экономики и права в контексте глобальных вызовов : материалы XIII Международной научно-практической конференции, Москва, 7 сентября 2022. Санкт-Петербург : Печатный цех, 2022. С. 153–158.
7. Мирошниченко Е. Е. Вентильно-индукторный двигатель с повышенной надежностью для тягового электропривода подвижного состава // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. 2023. № 2 (35). С. 20–27. ISSN 2415-8658.
8. Selection of Stator Pole Tip for Torque Ripple Reduction of Switched Reluctance Motor / J. Parmar, J. Panchal, T. Jhankal, A. N. Patel // 2024 IEEE 11th Power India International Conference (PIICON). 2024. Pp. 1–6. DOI: 10.1109/PIICON63519.2024.10995057.
9. Shahbazi R., Rashidi A. Torque Ripple Reduction of Switched Reluctance Motor by Implementing a New Converter based on DITC Method // 2023 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). 2023. Pp. 5043–5048. DOI: 10.1109/ECCE53617.2023.10362140.
10. An Improved Model-Predictive Torque Control of Switched Reluctance Motor based on Sector Adaptive Allocation Technology / P. Ren, J. Zhu, Y. Liu [et al.] // 2024 IEEE Transactions on Power Electronics. 2024. Vol. 39. No. 4. Pp. 4567–4577. DOI: 10.1109/tpe.2023.3349283.
11. Characteristics Analysis and Comparison of Conventional and Segmental Rotor Type 12/8 Double Stator Bearingless Switched Reluctance Motors / Z. Xu, Z. Zhou, Z. Fan [et al.] // 2022 Joint MMM-Intermag Conference (INTERMAG). 2022. Pp. 1–5. DOI: 10.1109/INTERMAG39746.2022.9827861.

### References

1. Popov D. I. Development of scientific foundations for the construction of electrotechnical complexes for testing traction electric machines by the method of mutual loading : DSc in Engineering Thesis. Omsk, 2022. 365 p. (In Russian).
2. Grishchenko A. V., Khamidov O. R. Evaluation of the technical condition of locomotive asynchronous traction electric motors using neural networks. *Transport of the Russian Federation*. 2018. No. 6 (79). Pp. 19–22. ISSN 1994-831X. (In Russian).
3. Ibraev Zh. S., Jakupov N. R., Kushtaeva D. S. Asynchronous power drive for locomotives. *The Bulletin of KazATC*. 2020. Vol. 112. No. 1. Pp. 89–97. ISSN 1609-1817. (In Russian).
4. Miroshnichenko E. E., Evteev N. S. Auxiliary electric drive with increased reliability for AC electric locomotives. *Pacific Rim Countries Transportation System*. 2024. No. 2 (39). Pp. 42–49. ISSN 2415-8658. (In Russian).
5. Miroshnichenko E. E. Increasing the performance of traction switched reluctance motors by using on-board microprocessor diagnostic systems. *Intelligent transport systems : proceedings of the 4th International scientific and practical conference, Moscow, May 22, 2025*. Moscow : Publishing House of RUT (MIIT) 2025. Pp. 299–304. DOI: 10.30932/9785002587582-2025-299-304. (In Russian).
6. Miroshnichenko E. E. Analysis of the forces of one-way magnetic attraction arising from an uneven air gap of switched reluctance electric machine. *Actual problems of society, economics and law in the context of global challenges : proceedings of the 13th International scientific and practical conference, Moscow, September 7, 2022*. St. Petersburg : Printing Shop, 2022. Pp. 153–158. (In Russian).
7. Miroshnichenko E. E. Switched reluctance motor with increased reliability for traction electric drive of rolling stock. *Pacific Rim Countries Transportation System*. 2023. No. 2 (35). Pp. 20–27. ISSN 2415-8658. (In Russian).
8. Parmar J., Panchal J., Jhankal T., Patel A. N. Selection of Stator Pole Tip for Torque Ripple Reduction of Switched Reluctance Motor. *2024 IEEE 11th Power India International Conference (PIICON)*. 2024. Pp. 1–6. DOI: 10.1109/PIICON63519.2024.10995057.
9. Shahbazi R., Rashidi A. Torque Ripple Reduction of Switched Reluctance Motor by Implementing a New Converter based on DITC Method. *2023 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*. 2023. Pp. 5043–5048. DOI: 10.1109/ECCE53617.2023.10362140.
10. Ren P., Zhu J., Liu Y. [et al.]. An Improved Model-Predictive Torque Control of Switched Reluctance Motor based on Sector Adaptive Allocation Technology. *2024 IEEE Transactions on Power Electronics*. 2024. Vol. 39. No. 4. Pp. 4567–4577. DOI: 10.1109/tpe.2023.3349283.
11. Xu Z., Zhou Z., Fan Z. [et al.]. Characteristics Analysis and Comparison of Conventional and Segmental Rotor Type 12/8 Double Stator Bearingless Switched Reluctance Motors. *2022 Joint MMM-Intermag Conference (INTERMAG)*. 2022. Pp. 1–5. DOI: 10.1109/INTERMAG39746.2022.9827861.



12. Design and Performance Analysis of Switched Reluctance Motor with Inner Holes to Reduce Radial Force / G. F. Lukman, X. S. Nguyen, K. Jeong [et al.] // 2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). 2020. Pp. 4697–4702. DOI: 10.1109/ECCE44975.2020.9235634.
13. Advanced Control of Switched Reluctance Motors (SRMs): A Review on Current Regulation, Torque Control and Vibration Suppression / G. Fang, F. P. Scalcon, D. Xiao [et al.] // 2021 IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society. 2021. Vol. 2. Pp. 280–301. DOI: 10.1109/OJIES.2021.3076807.
14. Analytical and Experimental Verification of Novel Current Waveforms for Noise Reduction in Switched Reluctance Motor / J. Furqani, C. A. Wiguna, A. Chiba [et al.] // 2019 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC). 2019. Pp. 576–583. DOI: 10.1109/IEMDC.2019.8785171.
15. Wilson V., Latha P. G. Performance Analysis of SRM with Two Stage Commutation for Effective Vibration Reduction // 2021 IEEE International Power and Renewable Energy Conference (IPRECON). 2021. Pp. 1–6. DOI: 10.1109/IPRECON52453.2021.9641037.
12. Lukman G. F., Nguyen X. S., Jeong K. [et al.]. Design and Performance Analysis of Switched Reluctance Motor with Inner Holes to Reduce Radial Force. 2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). 2020. Pp. 4697–4702. DOI: 10.1109/ECCE44975.2020.9235634.
13. Fang G., Scalcon F. P., Xiao D. [et al.]. Advanced Control of Switched Reluctance Motors (SRMs): A Review on Current Regulation, Torque Control and Vibration Suppression. 2021 IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society. 2021. Vol. 2. Pp. 280–301. DOI: 10.1109/OJIES.2021.3076807.
14. Furqani J., Wiguna C. A., Chiba A. [et al.]. Analytical and Experimental Verification of Novel Current Waveforms for Noise Reduction in Switched Reluctance Motor. 2019 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC). 2019. Pp. 576–583. DOI: 10.1109/IEMDC.2019.8785171.
15. Wilson V., Latha P. G. Performance Analysis of SRM with Two Stage Commutation for Effective Vibration Reduction. 2021 IEEE International Power and Renewable Energy Conference (IPRECON). 2021. Pp. 1–6. DOI: 10.1109/IPRECON52453.2021.9641037.

Научная статья

УДК 629.463

## Разработка методики для оценки ресурса шкворневых узлов вагонов-хопперов

Александр Евгеньевич Афанасьев<sup>1</sup>, Аlesia Алексеевна Богданович<sup>1</sup>, Никита Валерьевич Пекин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ООО «Инженерный Центр подвижного состава», Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>ООО «Уральское конструкторское бюро вагоностроения», Нижний Тагил, Россия

## Development of methodology for estimating the resource of pivot assemblies for hopper cars

Alexander E. Afanasyev<sup>1</sup>, Alesia A. Bogdanovich<sup>1</sup>, Nikita V. Pekin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Engineering Center of Rolling Stock LLC, St. Petersburg, Russia

<sup>2</sup>Ural Design Bureau of Railway Car Building LLC, Nizhny Tagil, Russia

### Аннотация

В статье представлена разработанная методика ресурсных стендовых испытаний шкворневых узлов вагонов-хопперов, позволяющая более достоверно воспроизводить эксплуатационные нагрузки, влияющие на долговечность узлов, лимитирующих срок службы грузовых вагонов.

Показано, что традиционные методы оценки ресурса шкворневых узлов, основанные на четырехточечной схеме опирания опытных образцов, не обеспечивают корректное воспроизведение напряженно-деформированного состояния шкворневых узлов вагонов-хопперов в условиях эксплуатации. С использованием метода конечных элементов проведен анализ распределения нагрузок и изгибающих моментов, действующих в зоне соединения шкворневой и хребтовой балок вагона-хоппера. На основе полученных данных предложена усовершенствованная методика для оценки ресурса шкворневых узлов вагонов-хопперов.

**Ключевые слова:** шкворневой узел, вагон-хоппер, срок службы, методика испытаний, ресурсные испытания, стендовые испытания

### Abstract

The article presents the developed method of resource bench testing for pivot assemblies of hopper cars, which makes it possible to more reliably reproduce the operational loads affecting the durability of components that limit the service life of freight cars.

It is shown that traditional methods for estimating the life of pivot assemblies based on a four-point support scheme for prototypes do not ensure the correct reproduction of the stress-strain state for pivot assemblies of hopper cars under operating conditions. The finite element method was used to analyze the distribution of loads and bending moments acting in the junction zone of the pivot and ridge beams of hopper car. Based on the data obtained, an improved methodology has been proposed for estimating the resource of pivot assemblies for hopper cars.

**Keywords:** pivot assembly, hopper car, service life, test procedure, resource tests, bench tests

DOI: 10.20291/1815-9400-2025-4-34-38

Согласно действующему «Положению о системе технического обслуживания и ремонта грузовых вагонов» [1], в случае, если вагону устанавливают назначенный срок службы, превышающий численные значения, приведенные в [1], новые значения назначенного срока службы должны быть подтверждены экспериментально путем проведения ресурсных испытаний вагона в целом или узлов, лимитирующих его срок службы. Узлом, лимитирующим срок службы, в вагоностроении называют наиболее нагруженный элемент конструкции, отказ которого ведет к списанию единицы подвижного состава.

В исследуемом вагоне-хоппере по результатам расчетов прочности одним из наиболее нагруженных узлов является соединение хребтовой и шкворневой балок, которое воспринимает и передает основные силовые воздействия: вертикальные нагрузки от массы груза, продольные ударные силы, поперечные воздействия и перекосы кузова.

Руководствуясь вышеизложенным, в ООО «ИЦПС» совместно с ООО «УКБВ» была разработана методика ресурсных стендовых испытаний, позволяющая оценить расчетный срок службы и прогнозировать долговечность шкворневого узла (ШУ).

Традиционно для определения ресурса шкворневых узлов широко применялась методика, которая основывалась на схеме с опиранием на четыре точки (или иначе с двухуровневым опиранием) по краям шкворневой и хребтовой балок с учетом эксцентриситета сил и их распределения в контролируемых зонах в зависимости от действующей испытательной нагрузки [2, 3]. Изначально такая схема испытаний применялась для полувагонов, также аналогичный подход использовался и для иных типов подвижного состава — вагонов-самосвалов [4] и пр. Это было оправдано их конструктивными особенностями, когда хребтовая балка несет значительную часть нагрузок, а шкворневой узел работает в условиях, близких к эксплуатации полувагонов. При теоретическом обосновании подобных подходов распределение сил на макете ШУ определяется из расчета реакций, возникающих при действии нормативных нагрузок.



Из условия равенства изгибающих моментов эти реакции пересчитываются на реальные параметры испытываемых макетов. Таким образом, получается распределение нагрузок, соответствующее нормативным расчетным режимам. Например, для шкворневой и хребтовой балок полувагона [2, 3] оно составляет  $0,32P/0,18P-0,35P/0,15P$  соответственно, где  $P$  — вертикальная нагрузка, прикладываемая к пятнику макета ШУ.

При разработке методики ресурсных испытаний ШУ вагона-хоппера была выполнена проверка традиционного подхода, чтобы определить возможность его применения в исследуемой конструкции ШУ. Для этого использовался подход, основанный на методе конечных элементов (МКЭ) [5]. Расчетная модель представляла собой трехмерную модель люкового полувагона (рис. 1) с пластинчатыми конечными элементами.

Подготовка данных о топологии конечно-элементной расчетной схемы, а также вычисление распределения нагрузок в конструкции производились с использованием прикладного программного обеспечения. В качестве глобальной системы координат при составлении расчетной схемы была выбрана правая Декартова система с центром на продольной оси вагона. Ось  $X$  системы координат направлена вдоль продольной оси вагона, ось  $Y$  — вертикально вверх, ось  $Z$  — поперек. Расчетная модель включала в себя кузов вагона и его раму, в которой, руководствуясь принципом Сен-Венана, был определен ШУ. В зонах соединения ШУ с рамой полувагона заданы жесткие связи. Таким образом, в режиме действия вертикальной статической нагрузки, соответствующем нагружению с наибольшим числом циклов действия силы, было получено распределение  $0,36P/0,14P$ , что подтверждает сходимость данного метода вычисления испытательных нагрузок. После подтверждения традиционно применяемого подхода аналогичный расчет был проведен для исследуемой конструкции ШУ вагона-хоппера.

Однако результаты использования традиционного подхода к исследуемой конструкции ШУ показали значительные деформации узла и повышенные значения эквивалентных напряжений, не соответствующих расчетным данным, полученным для модели вагона-хоппера в целом. Таким образом, в результате ряда расчетов было установлено, что стандартный подход [2–4] неприменим для оценки ресурса исследуемой конструкции ШУ. Это объясняется конструктивными особенностями узла, а также существенным отличием характера распределения нагрузок в вагонах бункерного типа, что требует совершенствования методики определения ресурса наиболее нагруженных в эксплуатации узлов.

Вагоны-хопперы имеют принципиально иную конструкцию кузова по сравнению с полувагонами. Основная особенность заключается в том, что несущая система хоппера формируется за счет множества балок, стоек, а также боковых стенок и бункерных перегородок (рис. 2), работающих как пространственная ферма [6, 7].

Дополнительно стоит отметить, что центр тяжести вагонов бункерного типа выше, чем у полувагонов, на  $\approx 16\%$ , что приводит к увеличению влияния инерционных нагрузок и формированию эксцентриситетов элементов рамы в разных сечениях. В результате хребтовая балка в таких вагонах играет

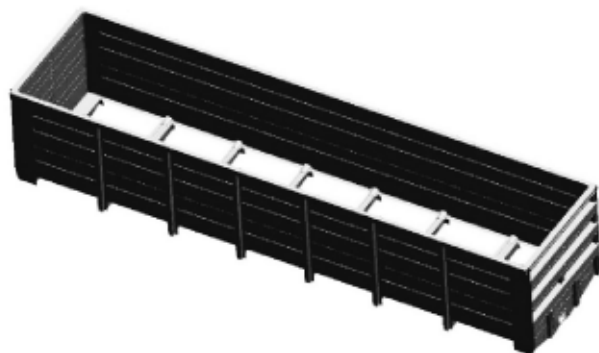


Рис. 1. Расчетная модель люкового полувагона

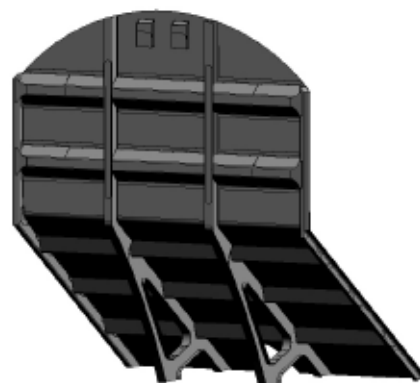


Рис. 2. Конструктивная схема торцевой стены вагона-хоппера

вспомогательную роль: она воспринимает лишь ограниченную часть продольных и изгибающих нагрузок, в то время как значительные усилия перераспределяются через наклонные стенки, вертикальные стойки и раму бункера. Это приводит к тому, что шкворневая балка оказывается намного более нагруженной, чем в конструкции полувагона.

Традиционно применяемая методика испытаний макетов ШУ не способна воспроизвести такие условия. Во-первых, она не учитывает кручение шкворневой балки, возникающее из-за характера взаимодействия рамы вагона-хоппера с тележкой. Во-вторых, эксцентриситет нагрузок в вагоне-хоппере, как уже было сказано, выражен гораздо сильнее: нагрузка от веса груза передается неравномерно, особенно при неполной или асимметричной загрузке бункеров [7]. Это означает, что в расчете, применявшемся для традиционного подхода к определению срока службы, исключаются значимые изгибающие моменты, которые оказывают существенное влияние на долговечность сварных соединений и деталей ШУ. Таким образом, использование традиционного подхода для ШУ вагонов-хопперов может привести к систематическому занижению расчетных напряжений и к ошибочной оценке ресурса.

Для корректной оценки ресурса ШУ вагонов-хопперов была предложена новая методика, основанная на шеститочечном (или иначе трехуровневом) опирании опытного образца. Такая схема нагружения макетов ШУ позволяет смоделировать полный спектр действующих на вагон-хоппер эксплуатационных нагрузок.

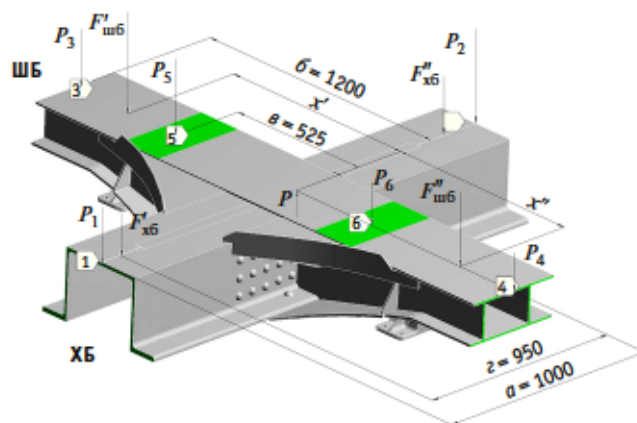


Рис. 3. Схема зон для определения расчетных сил и моментов от действия нормативной нагрузки:

$P$  — вертикальная статическая нагрузка от веса кузова и силы тяжести груза;  $P_1$ – $P_6$  — силы, возникающие в расчетных зонах ШУ при моделировании;  $a, b, e$  — плечи сил  $P_1$ – $P_6$ ;  $F_{шб}$ ,  $F_{шб}''$ ,  $F_{хб}$ ,  $F_{хб}''$  — эквивалентные силы;  $z, x', x''$  — плечи эквивалентных сил (все размеры указаны в миллиметрах)

В результате расчета МКЭ трехмерной модели вагона-хоппера были получены силы и изгибающие моменты, возникающие в зонах соединения ШУ с элементами рамы вагона-хоппера при действии нормативной нагрузки. Значения моментов и сил определялись в следующих расчетных зонах:

- зоне жестких связей хребтовой балки с элементами конструкции вагона (зоны 1 и 2 на рис. 3);
- зоне жестких связей шкворневой балки с элементами конструкции вагона (зоны 3 и 4 на рис. 3);
- зонах опирания вертикальных стоек кузова вагона на шкворневую балку узла (зоны 5 и 6 на рис. 3).

Для разработки методики оценки ресурса ШУ полученные из модели реакции учитываются в полном объеме. Однако, если при испытаниях установить макет на шесть точек опирания в соответствии с полученным результатом, формируется статически неопределимая система нагружения. В теоретической механике статически неопределимой принято называть систему, для определения усилий в которой, кроме уравнений статики, необходимы уравнения деформации [8]. В такой системе регулировка требуемого распределения при испытаниях проблематична.

Поэтому расчетные силы и крутящие моменты, полученные из модели, приводятся к эквивалентным нагрузкам. При этом основным требованием при пересчете было соблюдение двух условий: суммарная сила (1) и момент (2) от эквивалентных нагрузок должны быть равны сумме сил и моментов от расчетных реакций, полученных при моделировании вагона-хоппера:

$$\sum P_i = \sum F_i \quad (1)$$

где  $\sum P_i$  — сумма расчетных сил, действующих на модель шкворневой или хребтовой балки узла в конструкции вагона, Н;  $\sum F_i$  — сумма эквивалентных сил, Н;

$$\sum M_i = \sum M_F \quad (2)$$

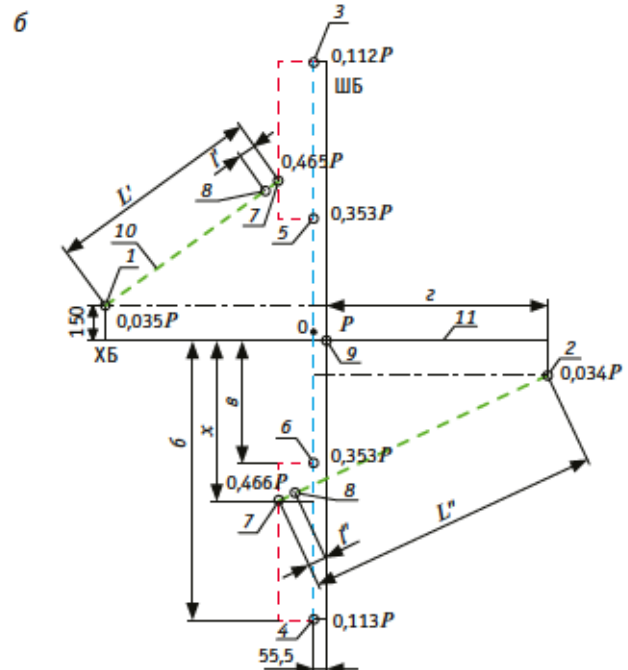
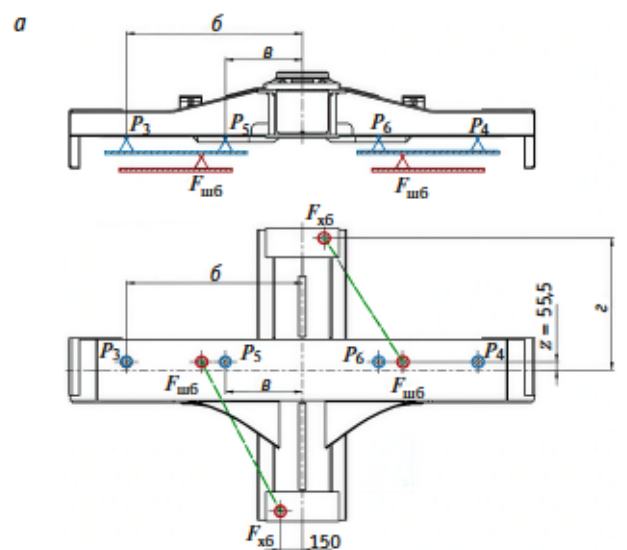


Рис. 4. Схема нагружения образца (размеры в миллиметрах): 1–7 — опоры ШУ; 8 — цилиндрическая опора опорной балки; 9 — место приложения силы  $P$  к ШУ; 10 — опорная балка; 11 — образец ШУ; ■ — первый уровень; ■ — второй уровень; ■ — третий уровень

где  $\sum M_i$  — сумма моментов сил, действующих на модель шкворневой или хребтовой балки узла в составе вагона, Н·мм;  $\sum M_F$  — сумма расчетных моментов эквивалентных сил  $F_i$ , Н·мм.

Исходя из условия (1) в систему, изображенную на рис. 3, сначала вводятся силы  $F_{шб} = P_3 + P_5$  и  $F_{шб}'' = P_4 + P_6$ , действующие на шкворневую балку. Плечи этих сил,  $x'$  и  $x''$ , рассчитываются из условия (2). По результатам расчета получены эквивалентные силы  $F_{шб} = F_{шб}'' = F_{шб}$  с плечом действия  $x' = x'' = x$ . Таким образом, вертикальные реакции в зонах 3–6 сводятся к одной эквивалентной силе  $F_{шб}$  (рис. 4), приложенной к шкворневой балке на расстоянии плеча  $x$ .



Для того чтобы учесть кручение шкворневой балки, из условия (2) определяется эксцентриситет  $z$  от силы  $F_{шб}$ .

Вертикальные реакции, действующие в точках 1–2 (см. рис. 3), заменяются силами  $F_{хб}$ , определяемыми из условия (2) (см. рис. 4а).

Моделирование действия вертикальной статической нагрузки не учитывает кручение хребтовой балки, возникающее в эксплуатации вагонов-хопперов. Исходя из этого аналогично традиционному подходу [2, 3] для учета кручения хребтовой балки сила  $F_{хб}$  прикладывается с эксцентриситетом 150 мм (см. рис. 4а).

Для того чтобы полученная система сил, как было сказано, стала статически определимой, вводятся поперечные опорные балки, соединяющие между собой точки приложения  $F_{шб}$  и  $F_{хб}$ . Расположение опор поперечных балок (размеры  $l'$ ,  $l''$  на рис. 4б) выбрано таким образом, чтобы обеспечить величину реакций в зонах ШУ, соответствующую приведенным на рис. 4б.

Таким образом, разработана схема нагружения ШУ вагона-хоппера, в которой реализовано последовательное восприятие макетом сил на трех уровнях. Три уровня опирания предназначены для натурного регулирования системы и обеспече-

ния требуемого уровня реакций в контролируемых зонах ШУ. Подобная схема нагружения позволяет в условиях испытаний воспроизвести эксплуатационные воздействия, максимально приближенные к реальным условиям работы вагона-хоппера. Важным преимуществом разработанной методики является учет всех действующих нагрузок, которые не учитывались предыдущими методиками испытаний, но оказывают существенное влияние на долговечность сварных конструкций [4].

Анализ конструктивных особенностей различных типов вагонов показывает, что универсальные методики оценки ресурса не всегда применимы [9, 10]. Для полувагонов и схожих по конструкции грузовых вагонов двухуровневая (или иначе четырехточечная) схема испытаний достаточно точна, так как учитывает основные силовые факторы работы ШУ [2, 3]. Однако для вагонов-хопперов ее использование может привести к искажению картины напряженно-деформированного состояния ШУ, так как не учитываются значительные нагрузки и изгибающие моменты [6]. Разработка методики с трехуровневым (шеститочечным) опиранием макетов ШУ позволяет устранить этот недостаток и сформировать систему испытаний, соответствующую реальным условиям работы ШУ вагона-хоппера.

#### Сведения об авторах:

**Александр Евгеньевич Афанасьев**,  
кандидат технических наук, заместитель начальника  
отдела экспертизы по сертификации продукции вагоностроения  
ООО «Инженерный Центр подвижного состава»

**Алеся Алексеевна Богданович**,  
инженер отдела экспертизы по сертификации продукции  
вагоностроения ООО «Инженерный Центр подвижного состава»

**Никита Валерьевич Пекин**,  
начальник отдела статических и динамических испытаний  
ООО «Уральское конструкторское бюро вагоностроения»

#### Authors information:

**Alexander E. Afanasyev**,  
PhD in Engineering,  
Deputy Head of Certification Expertise Department,  
Engineering Center of Rolling Stock LLC

**Alesya A. Bogdanovich**,  
Engineer of Certification Expertise Department,  
Engineering Center of Rolling Stock LLC

**Nikita V. Pekin**,  
Head of Static and Dynamic Tests Department,  
Ural Design Bureau of Railway Car Building LLC

## Литература

1. Положение о системе технического обслуживания и ремонта грузовых вагонов, допущенных в обращение на железнодорожные пути общего пользования в международном сообщении: утв. Советом по железнодорожному транспорту государств — участников Содружества, протокол от 16–17 октября 2012 г. № 57 (Приложение № 11) (с изменениями и дополнениями по состоянию на 01.01.2024 г.). URL: [https://online.zakon.kz/Document/?doc\\_id=31396597&pos=16;-49#pos=16;-49](https://online.zakon.kz/Document/?doc_id=31396597&pos=16;-49#pos=16;-49).
2. Экспериментальные исследования работы шкворневого узла 4-осных полувагонов и пути повышения его эксплуатационной надежности / П. С. Соколов, В. И. Гамиров, И. В. Тарлинский, С. И. Михайлов // Вагоны и грузовая работа: материалы III научно-технической конференции. Свердловск: Уральское отделение ВНИИЖТ, 1964. Вып. 5. С. 26–38.
3. Ступин А. П. Надежность и техническое состояние полувагонов новой постройки // Вестник ВНИИЖТ. 1978. № 7. С. 31–33. ISSN 2223-9731.
4. Экспериментальное подтверждение срока службы шкворневого узла вагона-самосвала / А. Е. Афанасьев, А. О. Воробьев, А. В. Додонов [и др.] // Вестник Брянского государственного

## References

1. Regulations on the system of technical maintenance and repair of freight cars admitted to operation on public railways in international traffic: approved by the Council for Railway Transport of the Commonwealth Member States, protocol No. 57 dated October 16–17, 2012 (Annex No. 11) (with amendments and additions as of 01.01.2024). URL: [https://online.zakon.kz/Document/?doc\\_id=31396597&pos=16;-49#pos=16;-49](https://online.zakon.kz/Document/?doc_id=31396597&pos=16;-49#pos=16;-49). (In Russian).
2. Sokolov P. S., Gamirov V. I., Tarlinskiy I. V., S. I. Mikhaylov. Experimental studies of the operation of the pivot assembly of 4-axle gondolas and ways to improve its operational reliability. *Cars and freight work: proceedings of the 3th scientific and technical conference*. Sverdlovsk, 1964. Issue 5. Pp. 26–38. (In Russian).
3. Stupin A. P. Reliability and technical condition for gondola cars of new construction. *Russian Railway Science Journal*. 1978. No. 7. Pp. 31–33. ISSN 2223-9731. (In Russian).
4. Afanasyev A. E., Vorobiyov A. O., Dodonov A. V. [et al.]. Experimental confirmation of hinge pivot unit life of dump car. *Bulletin of Bryansk State Technical University*. 2021. No. 4 (101). Pp. 36–46. DOI: 10.30987/1999-8775-2021-4-36-46. (In Russian).

го технического университета. 2021. № 4 (101). С. 36–46. DOI: 10.30987/1999-8775-2021-4-36-46.

5. Цыганская Л. В., Таничева Н. А., Рахимов Р. В. Автоматизированное проектирование подвижного состава. Ч. 2. Санкт-Петербург : Изд-во ПГУПС, 2022. 61 с.
6. Атапин В. Г. Сопротивление материалов. Москва : Юрайт, 2023. 438 с.
7. Битюцкий А. А. Вагоны хoppers : особенности конструкции, теории и расчета. Санкт-Петербург : ОМ-Пресс, 2007. 99 с.
8. Ефименко Э. Р. Статически неопределимые системы. Тольятти : Изд-во ТГУ, 2019. 126 с.
9. Приходько А. П. Метод нормирования запасов усталостной прочности с учетом назначенного ресурса машин // Вопросы строительной механики кузовов вагонов. Брянск, 1983. С. 109–133.
10. Гридюшко В. И. Исследование надежности грузовых вагонов и пути повышения их работоспособности // Труды ВНИИЖТ. 1974. Вып. 524. С. 4–12.
5. Tsyganskaya L. V., Tanicheva N. A., Rakhimov R. V. Automated design of rolling stock. Part 4. St. Petersburg : Publishing House of PSTU. 2022. 61 p. (In Russian).
6. Atapin V. G. Resistance of materials. Moscow : Yurait, 2023. 438 p. (In Russian).
7. Bityutskiy A. A. Hopper cars: design features, theory and calculation. St. Petersburg : OM-Press, 2007. 99 p. (In Russian).
8. Efimenko E. R. Statically indeterminate systems. Tolyatti : Publishing House of TSU, 2019. 126 p. (In Russian).
9. Prihodko A. P. Method of rationing fatigue strength reserves, taking into account the assigned resource of machines. In book : *Questions of construction mechanics of cars bodies*. Bryansk, 1983. Pp. 109–133. (In Russian).
10. Gridyushko V. I. Investigation of the reliability of freight cars and ways to improve their performance. *Proceedings of VNIIZhT*. 1974. Issue 524. Pp. 4–12. (In Russian).



Научная статья

УДК 656.072

## Организация пригородных пассажирских перевозок на основе сбалансированной оптимизационной модели

Артём Олегович Шмидт<sup>1</sup>, Николай Андреевич Тушин<sup>2</sup><sup>1</sup>ОАО «Российские железные дороги», Москва, Россия<sup>2</sup>Уральский государственный университет путей сообщения, Екатеринбург, Россия

## Organization of suburban passenger transportation based on a balanced optimization model

Artem O. Shmidt<sup>1</sup>, Nikolay A. Tushin<sup>2</sup><sup>1</sup>JSC «Russian Railways», Moscow, Russia<sup>2</sup>Ural State University of Railway Transport, Ekaterinburg, Russia

### Аннотация

В статье рассматривается организация пассажирских перевозок в пригородном железнодорожном сообщении, позволяющая учесть баланс интересов всех участников перевозочного процесса. Представлена функциональная оптимизационная модель обслуживания ниток графика движения пригородных поездов составами разных схем формирования на основе метода динамического согласования. Приведены сведения об апробации модели и перспективах ее совершенствования.

**Ключевые слова:** пригородные перевозки, модульное движение, график оборота составов, гибкое регулирование составности, метод динамического согласования, оптимизационная модель

### Abstract

The article considers the organization of passenger transportation in suburban railway communication, which allows taking into account the balance of interests of all participants in the transportation process. A functional optimization model of servicing the threads of the commuter train schedule by trains of different formation schemes based on the dynamic matching method is presented. The information about the model's approbation and the prospects for its improvement is provided.

**Keywords:** commuter transportation, modular movement, train turnover schedule, flexible composition control, dynamic matching method, optimization model

DOI: 10.20291/1815-9400-2025-4-39-44

**В** России в пригородном сообщении ежегодно перевозится более 1 млрд пассажиров. При этом интересы участников пригородного движения бывают противоречивыми (табл. 1).

Таблица 1

Интересы участников пригородных перевозок

Участник	Интерес
Пассажир	Короткое время ожидания транспорта и поездки, низкая загруженность (населенность) поездов, высокая частота движения
Перевозчик	Высокая эффективность эксплуатации подвижного состава (минимум вагонов и транспортной работы, высокая населенность), высокая маршрутная скорость, минимум расходов, связанных с перевозками
Владелец инфраструктуры	Приоритет высокодоходным грузовым поездом (предполагает низкую частоту движения пригородных поездов), параллельный график движения (предполагает невысокую маршрутную скорость)
Моторвагонное депо (отдельное от перевозчика)	Максимум транспортной работы, минимум операций по переформированию составов, максимум поездо-часов в движении (предполагает невысокую маршрутную скорость)
Государство (субъекты Российской Федерации)	Интересы пассажира при минимуме субсидий перевозчикам

Противоречия усиливаются при развитии маршрутной сети, замене устаревающего парка подвижного состава, а локально возникают при переходе на новый график движения поездов. Чтобы организовать пригородные железнодорожные перевозки в таких условиях, требуется поддерживать баланс интересов всех участников перевозочного процесса. Соответственно

и научные исследования должны быть направлены на создание модели, позволяющей разработать рациональный вариант организации движения поездов и оборота составов, при котором искомый баланс будет достигнут.

Система организации движения пригородных поездов включает в себя разработку расписания, удовлетворяющего пассажиров и заказчика перевозок, а также графика оборота составов, который позволяет определить необходимое число составов (вагонов) для обслуживания маршрутной сети. В настоящее время, согласно нормативным документам ОАО «РЖД», график движения разрабатывается с учетом графика оборота, однако нигде не говорится об их взаимовлиянии и о критериях выбора того или иного варианта. Поэтому сотрудникам службы движения, специалистам депо и перевозчику приходится решать целый ряд задач:

- привлекать новый состав в оборот или менять расписание;
- увеличивать число вагонов в конкретном поезде или увеличивать частоту движения;
- увеличивать число вагонов в конкретном поезде или корректировать расписание;
- увеличивать частоту движения или корректировать расписание.

При этом перевозки — не статичный, а динамичный процесс. И оптимальное решение, выбранное на определенном участке в определенный отрезок времени, может привести к тому, что в целом вариант окажется нерациональным.

Баланс интересов с точки зрения общества достигается при минимизации издержек всех участников перевозочного процесса. При этом необходимо выбирать один критерий оптимизации. За исключением временных затрат пассажиров, все остальные интересы участников перевозочного процесса выражаются в расходах (на вагоны, составы и их пробеги, субсидии и др.) или в упущенной экономической выгоде (при приоритетном пропуске пассажирского поезда вместо грузового). Однако временные затраты пассажира также можно оценить в денежном эквиваленте (в экономической оценке свободного времени [1]).

Система организации пригородного движения состоит из трех взаимосвязанных компонентов — пассажиропотока, ниток графика движения поездов и пригородных составов. При этом каждый из компонентов входит в сферу интересов того или иного участника перевозочного процесса. Баланс интересов достигается при совокупной минимизации денежных затрат участников перевозочного процесса на освоение пассажиропотока в пригородном направлении.

С целью решения задачи обеспечения баланса интересов хозяйствующих субъектов и государства при организации пригородных перевозок была разработана функциональная оптимизационная модель обслуживания ниток графика движения пригородных поездов моторвагонным подвижным составом (МВПС) разных схем формирования.

Подходы к постановке задачи представлены в [2–6]. В ее основу положен метод динамического согласования, разработанный научной школой под руководством П. А. Козлова [7–10]. Суть метода изначально заключалась в согласовании ритмов производства и потребления продукции на предприя-

тиях путем использования управленческих (динамических) резервов грузового транспорта. Применительно к рассматриваемой задаче требуется согласовать ритмы зарождения и погашения пассажиропотоков путем организации движения МВПС (разных схем формирования, в том числе модульного) по ниткам графика. При этом нитки графика движения поездов тоже зарождаются и погашаются на станциях оборота, и они связаны как с пассажиропотоком, так и с МВПС (поезд не отправится без пассажиров и состава). Но стоит отметить, что решение задачи не сводится к согласованию ритмов зарождения и погашения пассажиропотока и ниток графика, а представляет собой инструмент по поиску оптимального решения перевозок пассажиров МВПС разных схем формирования.

В основу предлагаемой оптимизационной модели положена задача обеспечения ниток графика движения пригородных поездов составами одной схемы формирования (далее — базовый метод). Метод был разработан П. А. Козловым и Е. В. Копыловой [11–13]. В базовом методе по пригородному направлению перемещаются два потока: поток ниток графика и поток составов, связанные между собой ограничением. Для задания ниток графика предварительно решается задача организации пассажиропотока в поездах. Главное отличие предлагаемой модели от базового метода состоит в том, что пассажиропоток организуется в поездах, а нитки их графика обеспечиваются МВПС разных схем формирования в рамках одной задачи. При этом исходными данными являются как пассажиропотоки, так и расписание (существующее или предлагаемое исследователем).

Описание функциональной оптимизационной модели представлено в [14]. Она состоит из набора уравнений, которые задают динамику потоков, а также из ограничений, отражающих особенности технологии работы пригородного железнодорожного транспорта. Переменными являются пассажиропотоки, а связанные с ним составы разных схем формирования и нитки графика будем называть сопутствующими величинами.

На основе исходных параметров модель должна позволять планировать составность поездов в зависимости от меняющегося пассажиропотока, а также корректировать график движения при обеспечении комфортного проезда пассажиров и допустимого времени ожидания поезда с минимальным привлечением дополнительных составов (или вагонов).

Главная идея при разработке оптимизационной модели заключается в формализации выбора составов у разных типов  $V$ , которые задают их схему формирования. МВПС разных типов  $u^i$  могут передвигаться по нитке графика движения пригородного поезда  $x$ . Графически это отображается в виде совокупности дуг, связанных с дугой нитки графика. Число дуг показывает варианты составности пригородных поездов на выбранном направлении (рис. 1).

Для выбора типа состава необходимо связать нитки графика с фактической величиной струи пассажиропотока  $A$ . Прикрепление составов и пассажиропотока к ниткам графика в модели реализовано попеременно за счет ограничений, представленных ниже. Связка пассажиропотока, нитки графика и МВПС интерпретируются как движение пригородного пассажирского поезда.



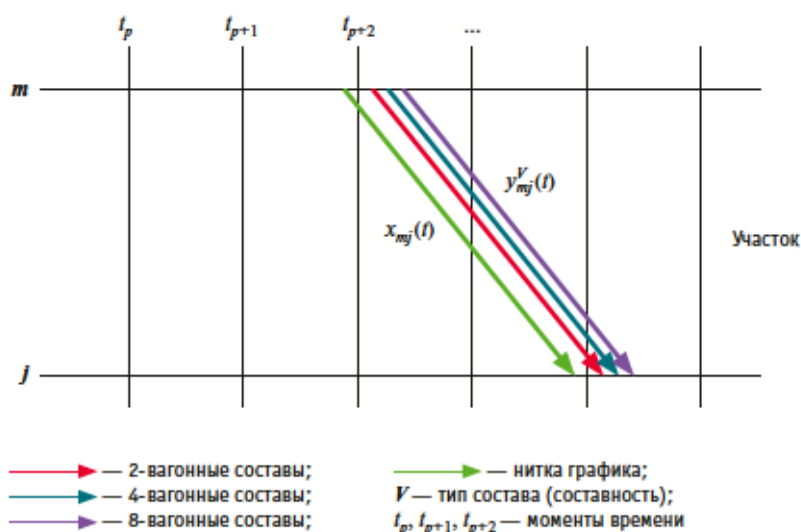


Рис. 1. Совокупность дуг движения разных типов МВПС, связанных с ниткой графика

Следующая идея, которая позволила осуществить зарождение пассажиропотоков, ниток графика движения пригородных поездов, — это деление станций на подсистемы (условные станции). Станции отправления пассажиров имеют условную станцию зарождения

(производства) пассажиропотока «П». На них отображается динамика подхода пассажиров на платформы, допускаются формирование очереди на посадку в поезда, а также сдвиг ниток графика. Каждая станция направления содержит условную транзитную станцию «Т»,

которая предназначена для моделирования движения поездов, а также для посадки-высадки пассажиров. Станции назначения имеют условную станцию прибытия «Пр», с помощью которой погашаются прибывшие пассажиропотоки и нитки графика.

Для учета факта корректировки и величины сдвига нитки графика на начальных станциях маршрута движения поездов введены дополнительные величины, так называемые точки отправления  $S_j^*(t_p)$ . Сдвиг точки отправления «влево» означает изменение времени отправления поезда ранее, а «вправо» — позднее изначально запланированного. На конечных станциях введены точки прибытия  $S_j^*(t_p)$ . Задание точек отправления и точек прибытия производится в соответствии с нормативным расписанием (либо в соответствии с предложениями исследователя). Для перевода точки отправления в нитку графика  $x$  на начальной станции введена специальная величина  $x_j$ . Корректировка ниток графика регулируется стоимостью сдвижек точек отправления.

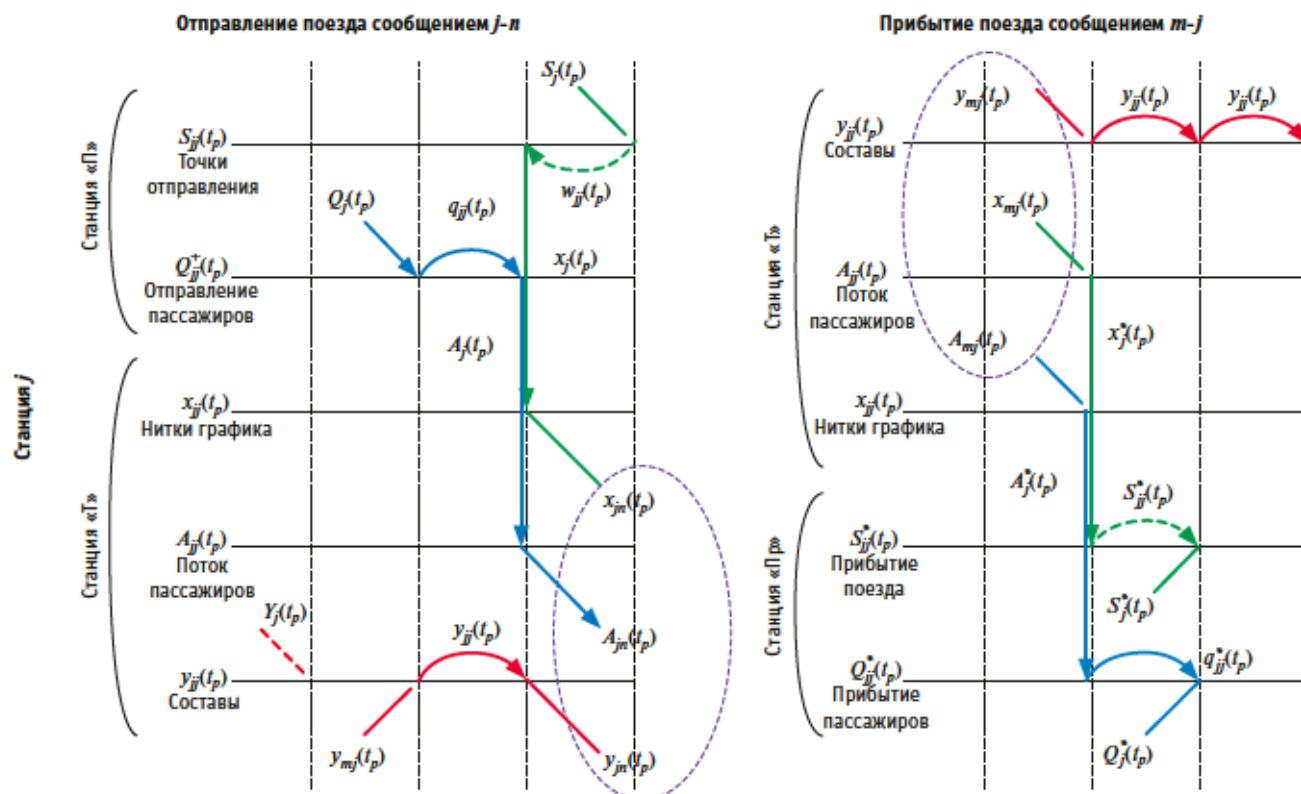


Рис. 2. Схема потоков в модели для пунктов оборота

Общая схема пассажиропотоков, связанных с ними ниток графика и составов для пунктов оборота приведена на рис. 2.

Пример балансового уравнения для точек отправления по начальным станциям показан на рис. 3.

При решении задачи аналогичные уравнения записываются для пассажиропотоков, составов и ниток графика по всем станциям рассматриваемого направления.

Вводятся следующие ограничения.

В каждый момент времени может быть инициирована только одна нитка графика:

$$x_{jn}(t_p) = 1. \quad (1)$$

Число отправленных на перегон составов не должно превышать количества ниток:

$$\sum_V y_{jn}^V(t_p) = x_{jn}(t_p). \quad (2)$$

Этим ограничением также задается неотделимость состава от нитки графика.

Количество пассажиров не должно превышать вместимость составов:

$$\sum_V (y_{jn}^V(t_p) \cdot N_y^V) \geq A_{jn}(t_p), \quad (3)$$

где  $N_y^V$  — пассажироместность МВПС типа  $V$ .

Два последних ограничения задают связь нитки графика с плотностью пассажиропотока.

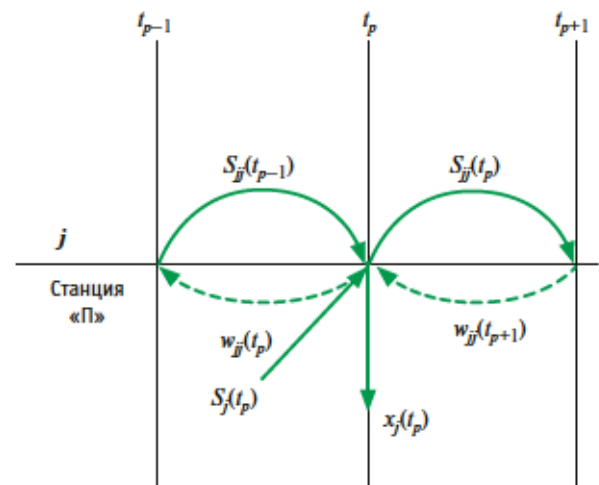
Критерий минимизации:

$$\sum_{p=0}^{T-1} \sum_j (q_{jj}(t_p) \cdot C_{qjj} + s_{jj}(t_p) \cdot C_{sjj} + w_{jj}(t_p) \cdot C_{wj} + \sum_V (Y_j^V(t_p) \cdot C_y^V)) + \sum_j q_{jj}(t_T) \cdot C_{qjjT} \rightarrow \min, \quad (4)$$

где  $q_{jj}(t_p) \cdot C_{qjj}$  — слагаемое, отображающее затраты ожидания пассажирами посадки в поезд (пассажиро-часы ожидания);  $s_{jj}(t_p) \cdot C_{sjj} + w_{jj}(t_p) \cdot C_{wj}$  — слагаемое, отображающее затраты на корректировку ниток графика движения пригородных поездов;  $\sum_V (Y_j^V(t_p) \cdot C_y^V)$  — слагаемое, отображающее затраты на привлечение составов разных типов в оборот;  $\sum_j q_{jj}(t_T) \cdot C_{qjjT}$  — слагаемое, отображающее стоимость отказа пассажирам в посадке (реализует сток в модели).

Более подробное описание показателей уравнения (4) приведено в [14].

По итогам решения исследователь получает оптимальный (в нашей интерпретации — сбалансированный) вариант организации пригородного движения на направлении с минимальными совокупными затратами всех участников перевозочного процесса (а не каждого в отдельности).



Уравнение баланса точек отправления:

$$s_{jj}(t_p) = s_{jj}(t_{p-1}) - w_{jj}(t_p) + w_{jj}(t_{p+1}) - x_j(t_p) + S_j(t_p)$$

Рис. 3. Уравнение баланса точек отправления:

$s_{jj}(t_{p-1})$  — количество точек отправления, смещаемых «вправо» по оси времени с предыдущего такта;  $w_{jj}(t_{p+1})$  — количество точек отправления, смещаемых «влево» по оси времени с последующего такта;  $w_{jj}(t_p)$  — количество точек отправления, смещаемых «влево» по оси времени с текущего такта;  $x_j(t_p)$  — перевод точки отправления в нитку графика;  $S_j(t_p)$  — точка отправления поезда по нормативному расписанию в момент времени  $t_p$ .

При проведении экспериментов на реальном полигоне Свердловской железной дороги с вводом двух типов МВПС доказана работоспособность модели и возможность движения модульных электропоездов (рис. 4).

По итогам расчетов разрабатывается гибкий график оборота составов, который реализует регулирование составности и допускает изменение порядка обслуживания ниток графика движения пригородных поездов составами в результате оперативных корректировок.

Рассмотренная модель может быть использована в автоматизированных системах холдинга «РЖД» для организации движения пригородных поездов, при этом будет достигнут баланс интересов участников перевозочного процесса. С практической точки зрения по результатам расчета на модели планируется разработка нормативного и гибкого графика оборота составов (в условиях корректировки составности, при возникновении переходных процессов из-за назначения разовых поездов, при проведении технологических «окон» и пр.), что необходимо для организации работы моторвагонного депо.

Предмет дальнейших исследований — совершенствование функциональной оптимизационной модели, в частности: реализация движения на нелинейном разветвленном направлении или в железнодорожном узле;

реализация движения нескольких сцепленных составов по одной нитке графика;

изменение составности (секционирование) с заходом в моторвагонного депо;

комбинация секционирования и модульного движения;



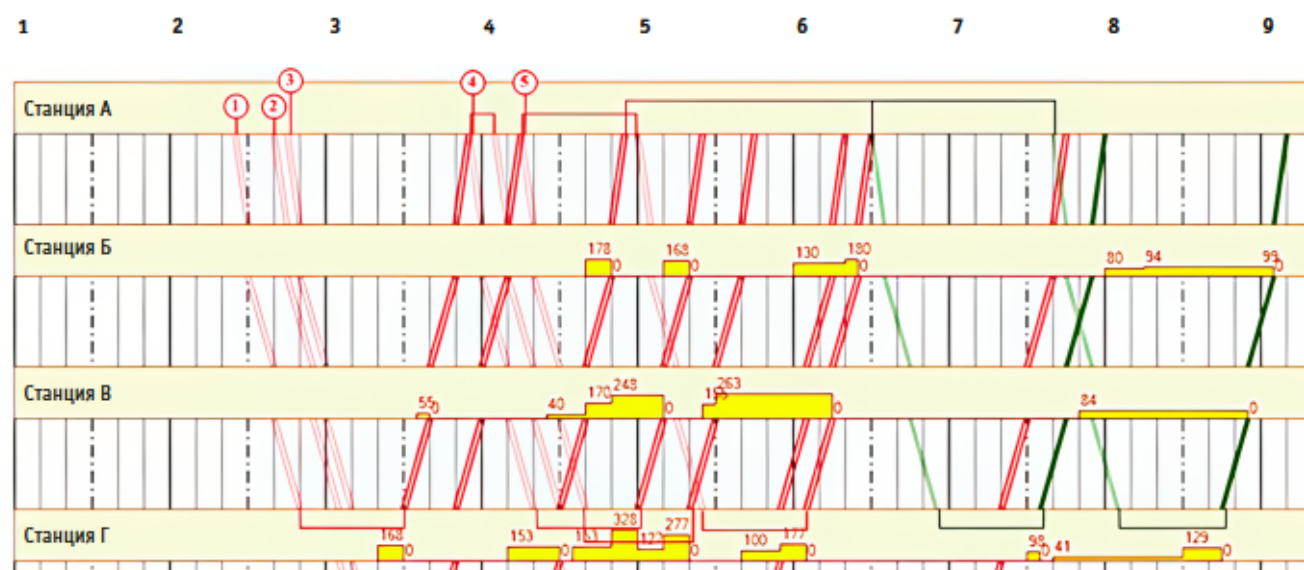


Рис. 4. Оборот с модульным движением по результатам расчета

учет изменения составности в пути следования (операции с модульными составами на зонных станциях).

Следующее перспективное направление исследований — разработка имитационной модели, позволяющей получать разные варианты пригородного движения в зависимости от изменяющихся исходных данных. С помощью «имитационного спуска» можно будет итерационно улучшать качество принятых решений

по организации оборота составов, подбирая более подходящие исходные данные. Последовательное совершенствование исходных данных в имитационной модели можно интерпретировать как самообучение информационной системы. Соответственно конечным продуктом должна стать информационная система (подсистема) организации пригородного движения, содержащая имитационную модель, с элементами искусственного интеллекта.

#### Сведения об авторах:

**Артём Олегович Шмидт**,  
кандидат технических наук, главный специалист Департамента  
пассажирских перевозок ОАО «Российские железные дороги»

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

#### Authors information:

**Artem O. Shmidt**,  
PhD in Engineering, Chief Specialist of Passenger Transportation  
Department, JSC «Russian Railways»

**Nikolay A. Tushin**,  
DSc in Engineering,  
Professor of Operations Management Department,  
Ural State University of Railway Transport

#### Литература

1. Сафронов А. В. Экономическая оценка потерь времени пассажиров в пригородных перевозках // Экономика железных дорог. 2020. № 4. С. 60–70. ISSN 1727-6500.
2. Герасимчук К. Е., Шмидт А. О. Возможность эксплуатации модульных электропоездов для пригородных перевозок в Пермском крае // Транспорт Урала. 2016. № 3 (50). С. 60–65. DOI: 10.20291/1815-9400-2016-3-60-65.
3. Шмидт А. О. Автоматизация гибкого регулирования составности поездов на основе прогнозирования пригородных пассажиропотоков // Транспорт Урала. 2018. № 4 (59). С. 41–47. DOI: 10.20291/1815-9400-2018-4-41-47.
4. Шмидт А. О. Подходы к разработке методики организации модульного движения электропоездов с учетом размеров пассажиропотока // Транспорт Урала. 2019. № 4 (63). С. 91–96. DOI: 10.20291/1815-9400-2019-4-91-96.

#### References

1. Safronov A. V. Economic assessment of passengers' time losses in suburban transportation. *Railway Economics*. 2020. No. 4. Pp. 60–70. ISSN 1727-6500. (In Russian).
2. Gerasimchuk K. E., Shmidt A. O. Possibility of modular electric trains use for commuter traffic in the Perm Region. *Transport of the Urals*. 2016. No. 3 (50). Pp. 60–65. DOI: 10.20291/1815-9400-2016-3-60-65. (In Russian).
3. Shmidt A. O. Automation of flexible regulation of train formation based on suburban passenger traffic forecasting. *Transport of the Urals*. 2018. No. 4 (59). Pp. 41–47. DOI: 10.20291/1815-9400-2018-4-41-47. (In Russian).
4. Shmidt A. O. Approaches to develop a method for organization of modular movement of electric multiple units with the consideration for passenger traffic. *Transport of the Urals*. 2019.

5. Шмидт А. О. Выбор подхода для оптимизации плана формирования пригородных электропоездов на основе технологии модульного движения // Вестник РГУПС. 2020. № 4 (80). С. 123–131. DOI: 10.46973/0201-727X\_2020\_4\_123.
6. Technology of development of graphics of flexible control of composition in suburban railway / V. Kostenko, R. Pank, A. Shmidt, N. Tushin // International Scientific Conference «International Transport Scientific Innovation» (ITSI-2021). AIP Conference Proceedings. 2023. Vol. 2476 (1).
7. Козлов П. А., Миловидов С. П. Динамическая транспортная задача с задержками в сетевой постановке // Известия АН СССР. Техническая кибернетика. 1982. № 1. С. 211–212. ISSN 0002-3388.
8. Блюмин С. Л., Козлов П. А., Миловидов С. П. Динамическая транспортная задача с задержками // Автоматика и телемеханика. 1984. № 25. С. 158–161. ISSN 0005-2310.
9. Козлов П. А., Миловидов С. П. Оптимизация структуры транспортных потоков в динамике при приоритете потребителей // Экономика и математические методы. 1982. Т. XVIII. Вып. 3. С. 521–531. ISSN 0424-7388.
10. Об использовании моделей оптимального управления транспортными потоками / П. А. Козлов, В. С. Колокольников, Н. А. Тушин, О. В. Осокин // Вестник УрГУПС. 2019. № 1 (41). С. 60–69. DOI: 10.20291/2079-0392-2019-1-60-69.
11. Козлов П. А., Копылова Е. В. Оптимизация оборота составов по обеспечению ниток графика пригородного движения // Наука и техника транспорта. 2020. № 2. С. 68–73. ISSN 2074-9325.
12. Козлов П. А., Копылова Е. В., Осокин О. В. Технология организации пригородного пассажиропотока // Вестник РГУПС. 2019. № 3 (75). С. 109–117. 0201-727X.
13. Копылова Е. В. Оптимизация пригородных пассажирских перевозок на основе организации пассажиропотока : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Москва, 2022. 324 с.
14. Шмидт А. О. Технология гибкого регулирования составности пригородных поездов : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Екатеринбург, 2024. 212 с.
- No. 4 (63). Pp. 91–96. DOI: 10.20291/1815-9400-2019-4-91-96. (In Russian).
5. Schmidt A. O. Choice of an approach to optimize plan of the formation suburban electric trains based on the technology modular motion. *Vestnik RGUPS*. 2020. No. 4 (80). Pp. 123–131. DOI: 10.46973/0201-727X\_2020\_4\_123. (In Russian).
6. Kostenko V., Pank R., Shmidt A., Tushin N. Technology of development of graphics of flexible control of composition in suburban railway. *International Scientific Conference «International Transport Scientific Innovation» (ITSI-2021)*. AIP Conference Proceedings. 2023. Vol. 2476 (1).
7. Kozlov P. A., Milovidov S. P. The dynamic transportation problem with delays in the network statement. *Soviet Journal of Computer and Systems Sciences*. 1982. No. 1. Pp. 211–212. ISSN 0002-3388. (In Russian).
8. Blyumin S. L., Kozlov P. A., Milovidov S. P. A dynamic transportation problem with delays. *Automation and Remote Control*. 1984. No. 25. Pp. 158–161. ISSN 0005-2310. (In Russian).
9. Kozlov P. A., Milovidov S. P. Optimization of transport flows structure in flow dynamics at the priority of consumers. *Economics and Mathematical Methods*. 1982. Vol. XVIII. No. 3. Pp. 521–531. ISSN 0424-7388. (In Russian).
10. Kozlov P. A., Kolokol'nikov V. S., Tushin N. A., Osokin O. V. On using effective management models for transport flows. *Herald of the USURT*. 2019. No. 1 (41). Pp. 60–69. DOI: 10.20291/2079-0392-2019-1-60-69. (In Russian).
11. Kozlov P. A., Kopylova E. V. Optimization of train turnover to provide train path allocation of suburban traffic. *Science and technology in transport*. 2020. No. 2. Pp. 68–73. ISSN 2074-9325. (In Russian).
12. Kozlov P. A., Kopylova E. V., Osokin O. V. Organization technology of the suburban passenger flow. *Vestnik RGUPS*. 2019. No. 3 (75). Pp. 109–117. 0201-727X. (In Russian).
13. Kopylova E. V. Optimization of suburban passenger transportation based on the organization of passenger traffic : DSc in Engineering Thesis. Moscow, 2022. 324 p. (In Russian).
14. Schmidt A. O. Technology of flexible regulation of commuter train composition : PhD in Engineering Thesis. Ekaterinburg, 2024. 212 p. (In Russian).



Научная статья

УДК 656.27

## Методика распределения зон управления оперативного персонала на станциях малоинтенсивных железнодорожных линий

Константин Евгеньевич Ковалев<sup>1</sup>, Алексей Викторович Новичихин<sup>1</sup><sup>1</sup>Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Санкт-Петербург, Россия

## Methodology of distributing zones of operational staff control at stations of low-intensive railway lines

Konstantin E. Kovalev<sup>1</sup>, Alexey V. Novichikhin<sup>1</sup><sup>1</sup>Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

### Аннотация

Представлена методика распределения зон управления оперативного персонала на станциях малоинтенсивных железнодорожных линий, позволяющая сформировать комплексный подход к решению задачи по оптимизации организационно-технологических структур в условиях ограниченных кадровых и технологических ресурсов.

При реализации методики использовались методы теории управления, теории транспортных процессов, системного анализа, динамического программирования. Для снижения затрат в продвижении грузопотоков предложен усовершенствованный инструментальный распределения зон управления между дежурными по станции на малоинтенсивных линиях, который позволяет определить достаточное число дежурных при различных сценариях функционирования железнодорожных линий.

**Ключевые слова:** малоинтенсивные железнодорожные линии, транспортная сеть, загруженность дежурного по станции, распределение транспортных потоков, зоны управления

### Abstract

A methodology for the distribution of operational personnel management zones at stations of low-intensity railway lines is presented, which makes it possible to form an integrated approach to solving the problem of optimizing organizational and technological structures with limited human and technological resources.

When implementing the methodology, the methods of control theory, theory of transport processes, system analysis, and dynamic programming were used. In order to reduce costs in the promotion of freight flows, an improved toolkit has been proposed for the distribution of control zones between assistant station-masters on low-intensity lines, which makes it possible to determine a sufficient number of attendants under various scenarios of the functioning of railway lines.

**Keywords:** low-intensity railway lines, transport network, workload of the assistant station-master, distribution of traffic flows, control zones

DOI: 10.20291/1815-9400-2025-4-45-49

**М**алоинтенсивные железнодорожные линии (МИЛ) являются одним из объектов управления железнодорожной транспортной системы [1]. Сложность управления МИЛ заключается в низких размерах перевозок, что требует малой численности работников службы движения, а следовательно, загруженность на таких станциях не соответствует нормативным значениям [2].

Одно из направлений решения данной проблемы — оптимизация распределения зон управления оперативного персонала станций на МИЛ, т.е. управление несколькими станциями одним дежурным, что позволит не только повысить эффективность эксплуатации инфраструктуры и использования трудовых ресурсов, сократить издержки при сохранении требуемого уровня безопасности и качества перевозочного процесса [3], но и создать условия развития железнодорожных перевозок в тех регионах, где их объемы имеют низкий уровень. Для этого применяются инструменты расчета загруженности дежурного по станции и разбиение упорядоченного множества на минимальное число сегментов при соблюдении ограничений по допустимой норме загруженности оперативного работника за смену.

Пусть дана железнодорожная линия, где имеется  $n$  станций, через которые следует  $T_i \in \{1, \dots, 8\}$  пар поездов в сутки, и на некоторых станциях производится грузовая работа с  $L_i \in \{0, \dots, 5\}$  вагонами.

Затраты времени дежурного по станции на выполнение  $r$ -й функции управления  $t_{vr}$  определяются по выражению [4]

$$t_{vr} = \sum_{i=1}^m t_i + \sum_{j=1}^n t_j q_j + \sum_{k=1}^n t_k (1 - q_j), \quad \forall v, r, \quad (1)$$

где  $t_i$  — затраты времени на выполнение  $i$ -го блока операторов алгоритма, мин;  $m$  — количество безусловно выполняемых блоков операторов в алгоритме  $r$ -й функции управления;  $t_j$  — затраты времени на выполнение  $j$ -го блока операторов при условии  $q_j$  в алгоритме  $r$ -й функции управления, мин;  $n$  — количество  $j$ -х и  $k$ -х блоков операторов в алгоритме  $r$ -й функции управления;  $t_k$  — затраты времени на выполнение  $k$ -го блока

операторов при условии  $1-q_j$  в алгоритме  $r$ -й функции управления, мин;  $v$  — наблюдение затрат времени на выполнение каждого оператора алгоритма  $r$ -й функции управления, мин.

Загруженность дежурного по станции рассчитывается по выражению

$$T_3 = \sum_{r=1}^s M(t_{vr} n_r), \quad (2)$$

где  $M(t_{vr})$  — оценка математического ожидания затрат рабочего времени на выполнение  $r$ -й функции управления;  $n_r$  — количество функций  $r$ -го типа, выполняемых за смену,  $r \leq s$ ;  $s$  — количество типов функций управления, выполняемых оперативным работником за смену.

Норма загруженности оперативного работника за смену в соответствии с действующей нормой [5] принята равной в диапазоне  $576 \leq T_3 \leq 675$  мин. Требуется объединить упорядоченный набор станций на минимальное число смежных зон под управлением одного дежурного по станции так, чтобы суммарная загруженность в каждой зоне не превышала норму 675 мин, с учетом следующих ограничений.

1.  $y_{ij} \in [0, 1]$  — бинарная переменная, в которой 1 означает, что есть возможность объединить несколько станций под одним руководством, 0 — такой возможности нет.

2. Каждая станция принадлежит одной зоне управления:

$$\sum_{i=1}^c \sum_{j=1}^n y_{ij} = 1, \forall c = 1, \dots, n,$$

где  $i$  — количество станций;  $j$  — переменный индекс суммирования при возможности объединения станций под руководством одного дежурного по станции;  $c$  — максимальное количество станций, которые можно объединить под одним руководством;  $n$  — количество станций на участке.

3. Загруженность одного дежурного по станции не должна превышать допустимую норму:

$$F = \{(i, j): \sum_{m=i}^j a_m \leq 675\}.$$

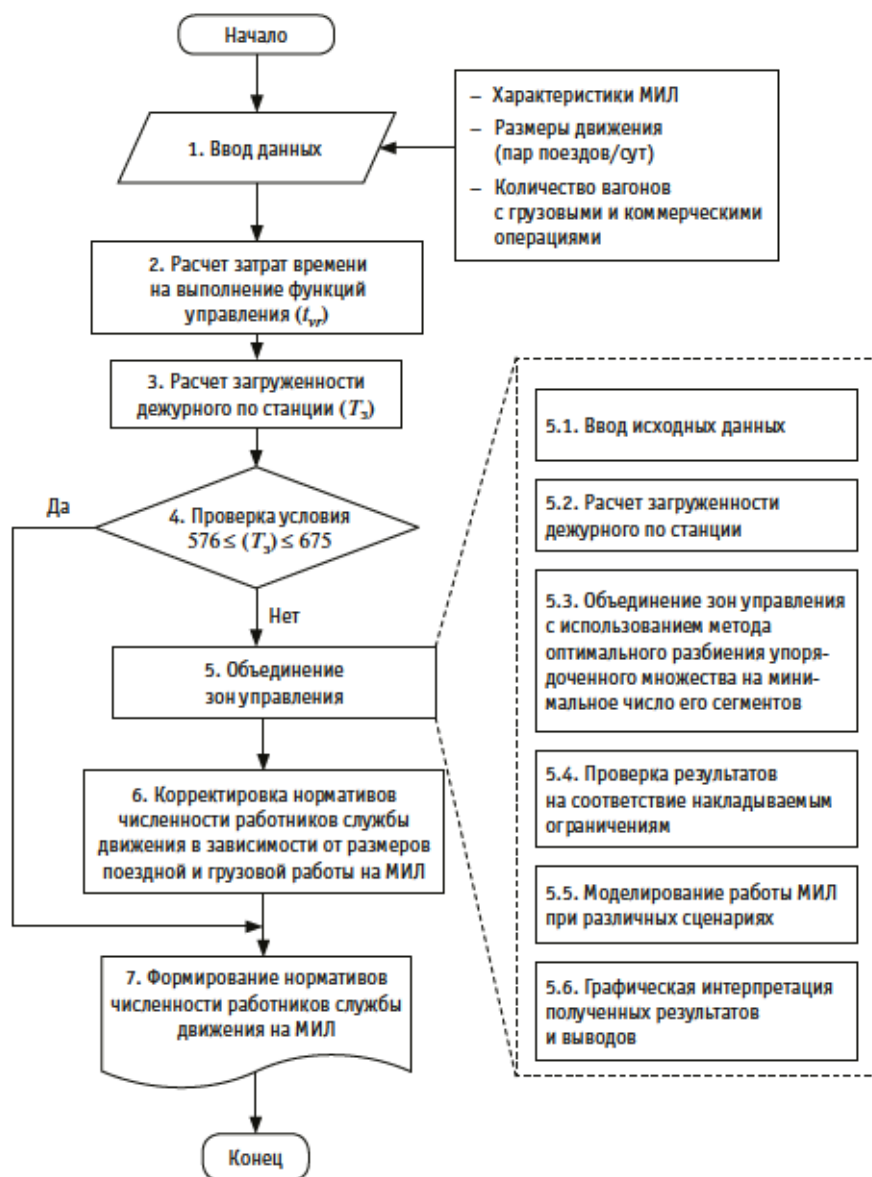


Рис. 1. Блок-схема процедуры распределения зон управления оперативного персонала на станциях МИЛ

4. Объединение зон возможно из отрезков, отвечающих условию  $y_{ij} = 0, \forall (i, j) \notin F$ .

Целевая функция имеет вид  $\sum_{1 \leq i \leq j \leq n} y_{ij} \rightarrow \min$  и решается поэтапно в соответствии с блок-схемой, показанной на рис. 1.

Рассмотрим более подробно пункт 5 блок-схемы, включающий шесть подпунктов.

1. Ввод исходных данных. Пусть имеется участок, состоящий из 12 станций

(рис. 2) с размерами перевозок, приведенными в табл. 1.

2. Расчет загруженности дежурного по станции производится согласно выражениям (1) и (2).

3. Объединение зон управления реализуется при помощи метода оптимального разбиения упорядоченного множества на минимальное число его сегментов [6–9]. Решение задачи состоит в разбиении последовательности на соседние контурные отрезки таким образом, чтобы сумма на каждом отрезке



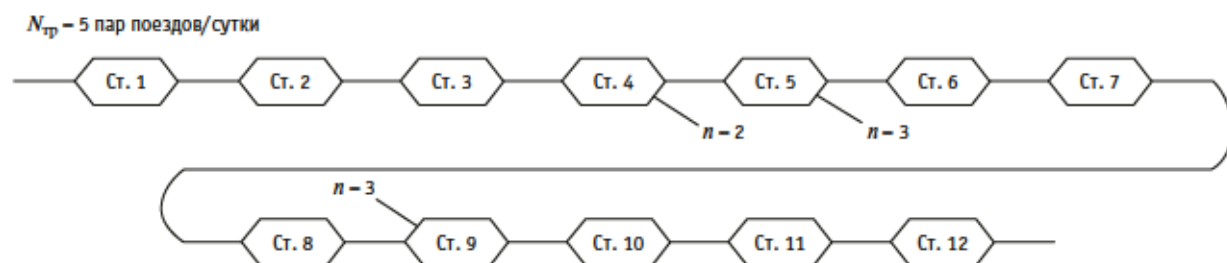


Рис. 2. Схема участка

Таблица 1

Размеры перевозок по участку

Станции участка МИЛ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$T_i$	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
$L_i$	0	0	0	2	3	0	0	0	3	0	0	0

Таблица 2

План модельных экспериментов и результаты моделирования

Сценарии	Описание сценария	Управляемые переменные		Переменные		$f(i)$
		$T_{\text{э}} \text{ мин}$	$t_{\text{тр}}$	$T_i$	$L_i$	
1. Базовый	1.1. Низкие размеры перевозок	675	$t_{\text{ср}}$	2–3	0–1	5
	1.2. Средние размеры перевозок	675	$t_{\text{ср}}$	3–5	1–3	9
	1.3. Высокие размеры перевозок	675	$t_{\text{ср}}$	6–8	3–5	12
2. Пространственная неоднородность	2.1. Высокие размеры перевозок на 2–3 станциях, на остальных станциях низкие	675	$t_{\text{ср}}$	2–8	1–6	8
	2.2. Высокие размеры перевозок на 2–4 рядом расположенных станциях	675	$t_{\text{ср}}$	4–8	1–6	9
	2.3. Высокие размеры перевозок на начальной и конечной станции МИЛ	675	$t_{\text{ср}}$	2–8	1–6	4
3. Совместные зависимые переменные	3.1. Где высокие размеры перевозок, там большие размеры грузовой и коммерческой работы	675	$t_{\text{ср}}$	6–8	3–6	7
	3.2. Транзитный участок МИЛ без грузовой и коммерческой работ	675	$t_{\text{ср}}$	4–8	0	6
	3.3. Сезонная и временная неравномерность перевозок	675	$t_{\text{ср}}$	6–8	3–6	7
4. Изменение нормативных значений продолжительности операций	4.1. Сокращение времени на обработку одного транзитного поезда	675	$t_{\text{ср}} > 7 \%$	6–8	3–6	6
	4.2. Сокращение времени на обработку одного вагона с грузовыми и коммерческими операциями	675	$t_{\text{ср}} > 25 \%$	6–8	5–10	6
5. Резкие изменения объемов перевозок	5.1. Больше 8 пар поездов в сутки	675	$t_{\text{ср}}$	10–12	1–6	12 (загруженность превышает норму $T_{\text{э}}$ , значит, при дежурном по станции требуется оператор)
	5.2. Одна станция участка МИЛ — «узкое место»	675	$t_{\text{ср}}$	1–8	1–6	11
	5.3. Внеплановые задержки в продвижении грузопотоков	675	$t_{\text{ср}} + 10 \%$	1–8	1–6	12

Таблица 3

Размеры перевозок по участку

Станции участка МИЛ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$T_3$	510	150	150	180	195	150	150	150	225	150	150	510
$f(i)$	1		2				3				4	

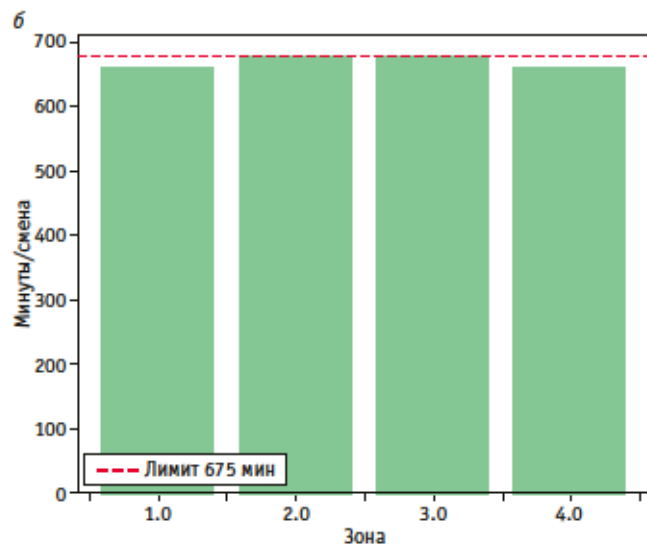
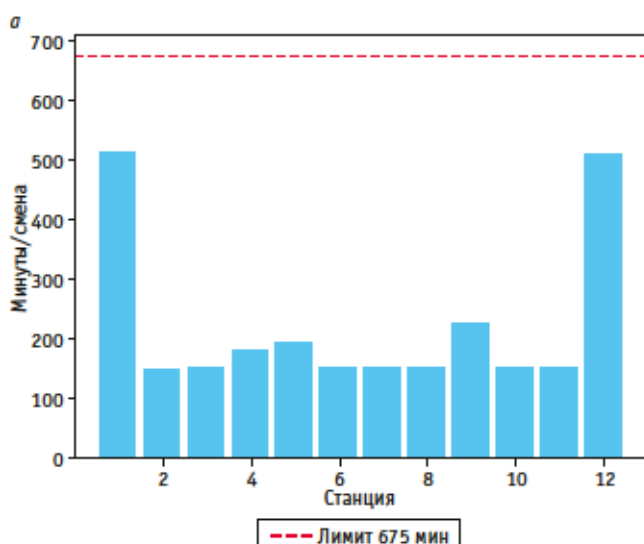


Рис. 3. Загруженность дежурных по станциям без объединения (а) и при объединении (б) зон управления

не превышала предельно допустимого значения и общее количество отрезков было минимальным [10, 11]. Минимальное число зон на участке МИЛ определяется по выражениям  $f(0) = 0$ ;  $f(j) = \min_{1 \leq i \leq j: y(i,j)=1} \{f(i-1) + 1\}$ ;  $j = 1, \dots, n$ , где  $n$  — количество станций участка МИЛ;  $i, j$  — границы зон управления;  $f(i)$  — количество возможных зон управления после объединения.

4. Проверка результатов на соответствие накладываемым ограничениям выполняется при допустимой норме загруженности в диапазоне  $576 \leq T_3 \leq 675$  мин.

5. Моделирование работы МИЛ при различных сценариях реализуется в соответствии с планом модельных экспериментов (табл. 2).

Расчет по предлагаемой методике реализован на языке программирования Python с использованием библиотек Matplotlib и NumPy. Для примера в табл. 3 приведены результаты моделирования по сценарию 2.3.

6. Графическая интерпретация полученных результатов и выводов представлена на рис. 3а, 3б и 4.

В целом результаты моделирования различных сценариев функционирования МИЛ показали, что загруженность дежурных по станции зависит от размеров перевозок и грузовой работы [см. выражение (1)], поэтому при изменении размеров

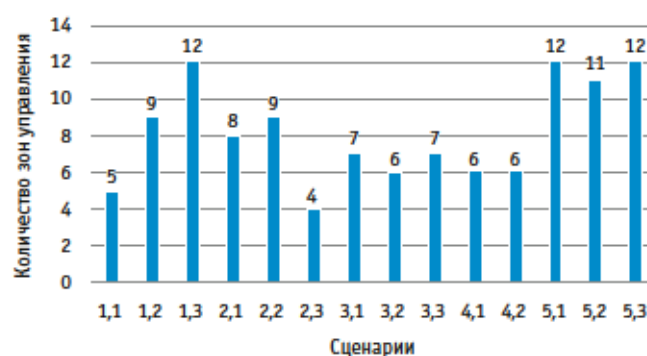


Рис. 4. Распределение зон управления при различных сценариях функционирования МИЛ

перевозок целесообразно оперативно корректировать распределение зон и функций управления. Объединение зон управления имеет ступенчатую структуру, поэтому крайние станции участка могут быть недогруженными, что следует учитывать при формировании диспетчерских кругов. Поскольку изменение поездной и грузовой работы на станциях МИЛ влияет на загруженность соседних станций, то зоны управления целесообразно объединять на крупных станциях, имеющих максимальные размеры поездной и маневровой работы.



## Сведения об авторах:

**Константин Евгеньевич Ковалев**,  
кандидат технических наук, доцент кафедры  
«Логистика и коммерческая работа» Петербургского государственного  
университета путей сообщения Императора Александра I

**Алексей Викторович Новичихин**,  
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Логистика  
и коммерческая работа» Петербургского государственного университета  
путей сообщения Императора Александра I

## Authors information:

**Konstantin E. Kovalev**,  
PhD in Engineering, Associate Professor of Logistics  
and Commercial Work Department,  
Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University

**Alexey V. Novichikhin**,  
DSc in Engineering, Professor,  
Head of Logistics and Commercial Work Department,  
Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University

## Литература

1. Эффективность эксплуатации и обслуживания малоинтенсивных железнодорожных линий / С. П. Вакуленко, А. В. Колин, Н. Ю. Евренова : монография. Москва : ВИНТИ РАН, 2018. 218 с.
2. Шарапов С. Н., Лялько М. В. Классификация и специализация железнодорожных линий — основа оптимизации эксплуатационных расходов // Железнодорожный транспорт. 2016. № 7. С. 50–60. ISSN 0044-4448.
3. Числов О. Н., Мизгирева Е. Е. К вопросу моделирования инфраструктурно-технологического взаимодействия в транспортных узлах // Вестник транспорта Поволжья. 2023. № 3 (99). С. 86–91. ISSN 1997-0722.
4. Ковалев К. Е. Метод распределения функций и зон управления между оперативным персоналом основных участков работы : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Санкт-Петербург, 2015. 194 с.
5. Катцын Д. В., Кокурин И. М., Ковалев К. Е. Распределение зон управления и функций оперативного персонала // Мир транспорта. 2014. Т. 12. № 3 (52). С. 210–219. ISSN 1992-3252.
6. Беллман Р. Динамическое программирование. Москва, 1960. 400 с.
7. Boddy M., Dean T. Solving time-dependent planning problems // Proceedings of the 11th International Joint Conference on Artificial Intelligence. Detroit, 1989. Pp. 979–984.
8. Coffman E. G., Lueker G. S. Probabilistic Analysis of Packing and Partitioning Algorithms. New York : John Wiley & Sons, 1991. 202 p.
9. Garey M. R., Johnson D. S. Computers and Intractability. A Guide to the Theory of NP-Completeness. New York : W. H. Freeman and Company, 1997. 348 p.
10. Бурков В. Н. Основы математической теории активных систем. Москва : Наука, 1977. 327 с.
11. Новиков Д. А. Теория управления организационными системами. Москва, 2005. 584 с.

## References

1. Vakulenko S. P., Kolin A. V., Evreenova N. Yu. Efficiency of operation and maintenance of low-intensity railway lines : monograph. Moscow : VINITI RAS, 2018. 218 p. (In Russian).
2. Sharapov S. N., Lyalko M. V. Classification and specialization of railway lines — the basis for optimizing operating costs. *Railway Transport*. 2016. No. 7. Pp. 50–60. ISSN 0044-4448. (In Russian).
3. Chislov O. N., Mizgireva E. E. On the issue of modeling infrastructure and technological interaction in transport hubs. *Bulletin of transport of the Volga region*. 2023. No. 3 (99). Pp. 86–91. ISSN 1997-0722. (In Russian).
4. Kovalev K. E. Method of distribution of functions and control areas between the operational staff of the main work areas : PhD in Engineering Thesis. St. Petersburg, 2015. 194 p. (In Russian).
5. Kattsyn D. V., Kokurin I. M., Kovalev C. E. Distribution of management areas and functions of operating personnel. *World of Transport and Transportation*. 2014. Vol. 12. No. 3 (52). Pp. 210–219. ISSN 1992-3252. (In Russian).
6. Bellman R. Dynamic programming. Moscow, 1960. 400 p. (In Russian).
7. Boddy M., Dean T. Solving time-dependent planning problems. *Proceedings of the 11th International Joint Conference on Artificial Intelligence*. Detroit, 1989. Pp. 979–984.
8. Coffman E. G., Lueker G. S. Probabilistic Analysis of Packing and Partitioning Algorithms. New York : John Wiley & Sons, 1991. 202 p.
9. Garey M. R., Johnson D. S. Computers and Intractability. A Guide to the Theory of NP-Completeness. New York : W. H. Freeman and Company, 1997. 348 p.
10. Burkov V. N. Fundamentals of the mathematical theory of active systems. Moscow : Science, 1977. 327 p. (In Russian).
11. Novikov D. A. Theory of management of organizational systems. Moscow, 2005. 584 p. (In Russian).

Научная статья  
УДК 656.073.9

## Концепция архитектуры платформы цифровой экосистемы логистической среды цепей поставок с использованием контейнерных перевозок

Сергей Николаевич Глаголев<sup>1</sup>, Александр Сергеевич Трошин<sup>1</sup>,  
Евгений Владимирович Мирошников<sup>1</sup>, Иван Алексеевич Новиков<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова, Белгород, Россия

## Concept of digital ecosystem platform architecture for supply chain logistics environment using container transportation

Sergey N. Glagolev<sup>1</sup>, Alexander S. Troshin<sup>1</sup>, Evgeny V. Miroshnikov<sup>1</sup>, Ivan A. Novikov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov, Belgorod, Russia

### Аннотация

В контексте высокой турбулентности международной конъюнктуры и усиления санкционного давления разработка экосистемных решений с применением цифровых технологий и автоматизации становится особенно важной для минимизации инфраструктурных, технологических и геополитических рисков. Эта задача наиболее актуальна для цепей поставок с использованием контейнерных перевозок, что обусловлено дисбалансом в перемещении контейнеров: дефицитом порожняка в регионах-экспортерах и его избытком в импортирующих центрах. В статье рассмотрена концепция архитектуры платформы цифровой экосистемы логистической среды для решения этой проблемы, проанализированы основные положения использования экосистемного подхода и обоснованы процессы движения информационных потоков в рамках цифровой платформы, формирующие ее архитектуру.

**Ключевые слова:** контейнерные перевозки, цифровая платформа, экосистема, цепи поставок, концепция платформы

### Abstract

In the context of the highly turbulent international environment and increasing sanctions pressure, the development of ecosystem solutions using digital technologies and automation is becoming especially important to minimize infrastructural, technological and geopolitical risks. This task is most relevant for supply chains using container transportation, which is caused by an imbalance in the movement of containers: a shortage of empty limestone in exporting regions and an excess in importing centers. The article examines the concept of the platform architecture of the digital ecosystem of the logistics environment to solve this problem, analyzes the main provisions of the ecosystem approach and substantiates the processes of information flows within the digital platform, forming its architecture.

**Keywords:** container transportation, digital platform, ecosystem, supply chain, platform concept

DOI: 10.20291/1815-9400-2025-4-50-56

Современная геополитическая конъюнктура сформировала ряд вызовов для глобальной логистической системы, в результате чего контейнерные перевозки трансформировались из инструмента экономической интеграции в зону санкционного противостояния. Для России этот процесс выдвинул на первый план необходимость фундаментальной перестройки транспортной парадигмы, так как традиционные модели управления рисками, основанные на экстраполяции исторических данных, в условиях высокой турбулентности неэффективны. Проблема заключается в отсутствии системных механизмов, способных обеспечить устойчивость контейнерных цепочек поставок при инфраструктурных, технологических и геополитических рисках. Соответственно встает необходимость в разработке решений, которые позволят перейти от реактивного управления к проактивному формированию адаптивной среды, где угрозы становятся катализатором модернизации, а не дестабилизирующим фактором.

Санкционное давление с начала 2022 г. выявило противоречия российской контейнерной системы, исторически ориентированной на обслуживание экспортно-сырьевых потоков через европейские морские коридоры. Поскольку наблюдается «увеличение перевалок контейнеров в портах Дальнего Востока, а перевалка в портах Балтики снизилась, в связи с переходом маршрутов (Китай — Санкт-Петербург) на порты Дальнего Востока с перегрузкой на железнодорожный транспорт из-за... роста морского фрахта» [1] (рис. 1), можно говорить о снижении грузооборота портов Финского залива при одновременной перегрузке дальневосточных узлов, что свидетельствует не о временных сложностях, а о системных проблемах в текущей инфраструктурной парадигме.

Снижение грузооборота подтверждают также данные отчета АО «ИЭРТ»: контейнерооборот портов России в 2021 г. составлял 5,6 млн ДФЭ, в то время как в 2022-м и в 2023-м он снизился до 4,3 млн ДФЭ и 5 млн ДФЭ соответственно (рис. 2). Увеличение санкционного давления дестабилизировало существующие логистические цепочки и привело к снижению контейнерооборота. Сравнение с другими странами показывает, что наблюда-



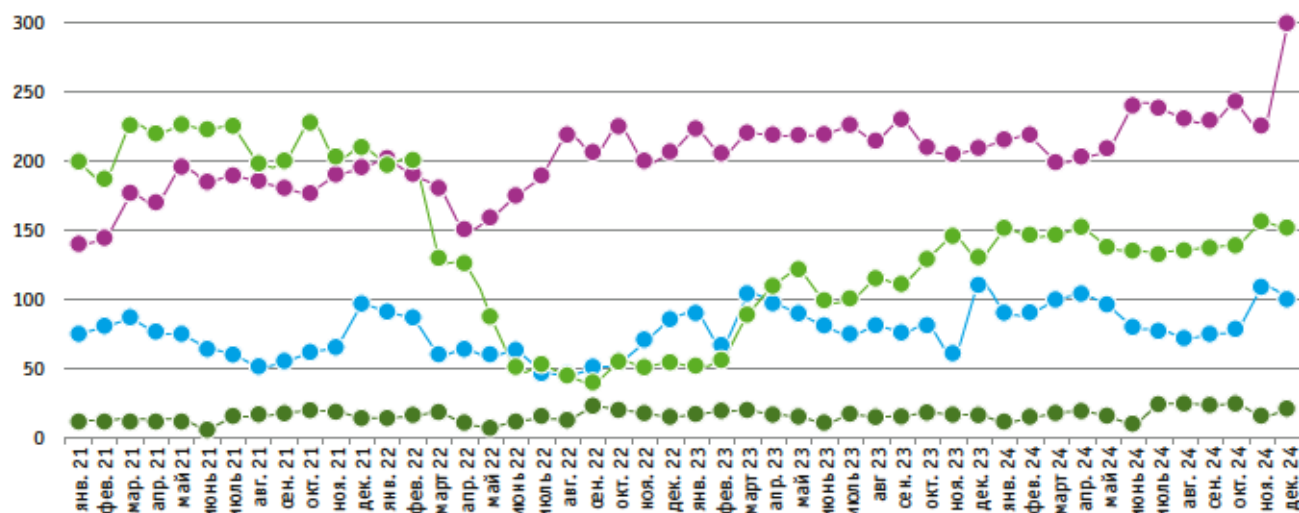


Рис. 1. Помесячная динамика контейнерооборота портов России с разбивкой на бассейны в 2021–2024 гг., тыс. TEU [2]:  
— Балтийский бассейн; — Дальневосточный бассейн; — Азово-Черноморский бассейн; — Арктический бассейн

емая отрицательная динамика является не общим рыночным трендом, а в большей степени связана с геополитической обстановкой. В рассматриваемом периоде динамика грузооборота в контейнерах имеет положительный тренд в Китае и сохраняет средний темп прироста на уровне 4,77 % в год. В США и Индии этот показатель вырос незначительно: соответственно с 62,1 млн ДФЭ до 62,2 млн ДФЭ и с 19,6 млн ДФЭ до 19,7 млн ДФЭ. Контейнерооборот Японии был относительно стабилен: в 2022 г. прирост составил менее 1 % при снижении в 2023 г. до 21,7 млн ДФЭ. Эффект от введения нового пакета санкций отразился на странах ЕС, так как Россия занимала значительную долю в их экспорте. Одновременно с этим европейским логистическим компаниям пришлось перенастраивать свои логистические маршруты, уходя от сотрудничества с Россией и Беларусью, что также стало одной из причин снижения контейнерооборота с 95,7 млн ДФЭ в 2021 г. до 83,4 млн ДФЭ в 2022 г.

С 2022 г. логистическая система России проходит период адаптации для нивелирования шоковых эффектов. В частности, были переориентированы перевозки контейнеров как в экспортном, так и в импортном направлениях (табл. 1). Объемы контейнерных перевозок через порты Финского залива и железнодорожные пункты пропуска (ЖДПП) Ленинградской области в экспортном и импортном направлениях продемонстрировали кол-

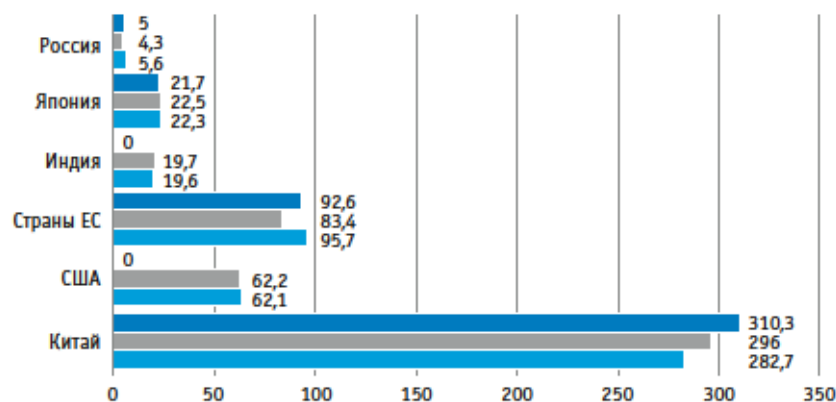


Рис. 2. Контейнерооборот портов отдельных стран, млн ДФЭ [3]:  
— 2023; — 2022; — 2021

лапс, приблизившись к нулевым значениям: в 2024 г. объем импорта через порты Финского залива составил 0,1 млн т, что на 85,7 % ниже значения 2021 г., также на 83,3 % сократился объем экспорта через ЖДПП Ленинградской области — до 0,1 млн т. В то же время показатель импорта железнодорожным транспортом составил 0, а экспорт через порты сократился на 1,8 млн т, или 21,7 % от показателя 2021 г.

Одновременно с этим происходит изменение грузопотоков в сторону Восточного полигона. Статистически значимый прирост наблюдается в импортном направлении через морские порты и ЖДПП: 81,7 % и 63,2 % соответственно. Экспортные потоки также показывают положительную динамику, но с более низкими темпами. Объем экспор-

та через порты Дальнего Востока вырос с 4,7 млн т до 5,2 млн т (прирост 10,6 %), в то время как экспортный поток железнодорожным транспортом в 2024 г. вырос на 34,4 % относительно 2021 г., что свидетельствует о переходе на сухопутные маршруты. Однако в связи с процессом переориентации логистические цепочки стали длиннее и дороже, что увеличивает стоимость товаров.

Проведенный анализ статистических данных подтверждает, что существующая модель логистической инфраструктуры не отвечает новой экономической реальности, т.е. переориентации на Азию.

Кроме того, проблема усугубляется технологической зависимостью, поскольку уход западных контейнерных линий и поставщиков программного обеспечения создал критическую уязвимость на-

Таблица 1

Переориентация перевозок контейнеров в экспортном/импортном сообщении России по видам транспорта, млн т [3]

Экспорт/импорт контейнеров через порты Финского залива и ЖДПП Ленинградской области				
Период	Порты		ЖДПП	
	Экспорт	Импорт	Экспорт	Импорт
2021 г.	8,3	0,7	0,6	0,1
2024 г.	6,5	0,1	0,1	0
Δ 2024 к 2021 г.	-1,8	-0,6	-0,5	-0,1
Экспорт/импорт контейнеров через порты и ЖДПП Восточного полигона				
Период	Порты		ЖДПП	
	Экспорт	Импорт	Экспорт	Импорт
2021 г.	4,7	6,0	6,1	1,9
2024 г.	5,2	10,9	8,2	3,1
Δ 2024 к 2021 г.	+0,5	+4,9	+2,1	+1,2

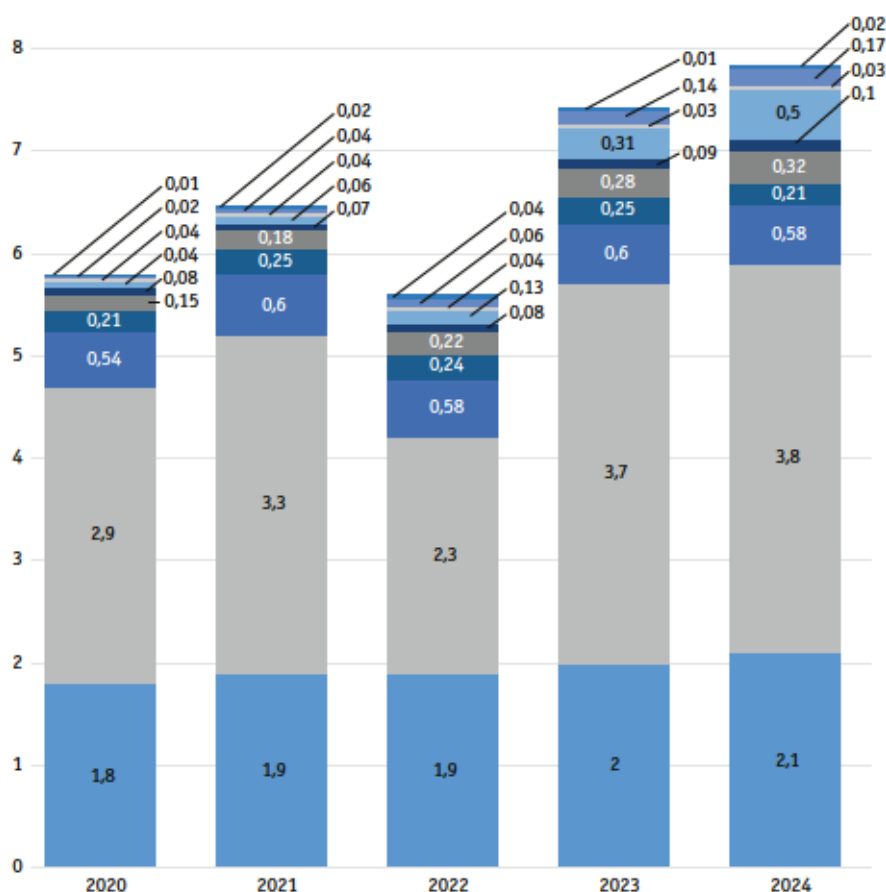


Рис. 3. Структура контейнерных перевозок по сети ОАО «РЖД» по номенклатуре грузов, млн ДФЭ [3]:

— порожние контейнеры; — прочие грузы; — лесные грузы; — черные металлы; — минерально-строительные материалы; — нефтяные грузы; — удобрения; — рудные грузы; — хлебные грузы; — уголь каменный

циональной логистики. В таких условиях традиционные подходы к управлению рисками, основанные на линейном прогнозировании, не обеспечивают достоверность предоставляемых данных, поэтому требуется создание адаптивной среды, способной к саморегуляции логистических процессов.

На наш взгляд, одним из факторов, усугубляющих обозначенную проблему, является сырьевая модель экономики страны, когда доминирование экспорта нефти, газа и металлов формирует устойчивые диспропорции в торговом балансе. В контейнерном сегменте это выражается в неравномерном соотношении между импортом (высокомаржинальные товары в контейнерах) и экспортом (сырье в традиционных вагонах), результатом которого является дефицит порожняка в регионах-экспортерах и его избыток в импортных центрах [4]. Например, в связи с переориентацией перевозок контейнеров и в экспортном, и в импортном сообщении России с портов Финского залива на порты и пограничные переходы Дальнего Востока возникла «дополнительная нагрузка на широтные направления сети: дисбаланс экспорта/импорта привел к необходимости подсыла порожних фитинговых платформ на Дальний Восток; возвращена технология перевозки контейнеров в полувагонах; возникла острая потребность в контейнерных перегрузочных терминалах на Западно-Сибирской железной дороге; введены ограничения на минимальную длину контейнерных поездов (71 у.в.)» [3].

Динамика перевозок по сети ОАО «РЖД» свидетельствует, что доля контейнеризации в железнодорожном сообщении растет (рис. 3). При этом увеличивается физический объем порожних контейнеров: с 1,8 млн ДФЭ в 2020 г. до 2,1 млн ДФЭ в 2024 г., но их доля в структуре сокращается, что также может свидетельствовать о нарастающем дефиците порожних контейнеров и, как следствие, о структурной нехватке «возвратного» контейнерного парка.

Рыночные механизмы не справляются с этой проблемой из-за фрагментации информации и отсутствия единой платформы управления контейнерным парком. Наиболее оптимальный вариант для ее решения — разработка и создание



цифровой экосистемы, поскольку такая организационная форма, как отмечено в работах [5, 6], «отвечает требованиям цифровой трансформации логистических систем» и является «наиболее адаптивной к динамике современных субъектов хозяйствования». Эффективное взаимодействие между участниками экосистемы можно обеспечить за счет создания цифровой платформы [7, 8] с учетом регламентов информационного обмена, унификации и стандартизации форматов. Архитектура предлагаемой платформы представляет собой многоуровневую систему с саморегулирующимися механизмами, которую условно можно представить в виде трех взаимосвязанных контуров, объединенных центральным узлом (рис. 4). Система функционирует по принципу нейронной сети: внешние воздействия генерируют сигналы, которые обрабатываются на разных уровнях, формируя адаптивные реакции. Ключевое отличие предлагаемой концепции работы платформы от существующих подходов состоит в отказе от точечного прогнозирования в пользу создания гибких механизмов, где, например, дисбаланс контейнеров в российских портах становится не проблемой, а основанием для активации балансирующих механизмов.

Необходимо уточнить, что в основе предлагаемой концепции лежат три следующих принципа. Во-первых, децентрализация принятия решений: вместо единого центра управления создается сеть взаимосвязанных узлов (хабов), способных автономно реагировать на локальные риски. Во-вторых, самообучение на основе данных, т.е. система накапливает информацию о прошлых событиях (например, таких, как штормы, забастовки, санкции) и использует ее для прогнозирования и адаптации. В-третьих, визуализация сложных процессов, поскольку представление многомерных данных в интуитивно понятной форме позволяет принимать обоснованные решения, не прибегая к сложным математическим моделям, интерпретация результатов которых часто вызывает затруднения.

В предлагаемой концепции выделение контуров реагирования связано с организацией реагирования платформы на возмущения внешней и внутренней среды по временным горизонтам и масштабам воздействия. В частности, внешний контур отвечает за долгосрочную адаптацию к геополитическим и рыночным изменениям, а ключевым элементом является такой, где каждый маршрут оценивается с точки зрения геополитической устойчивости, инфраструктурной готовности

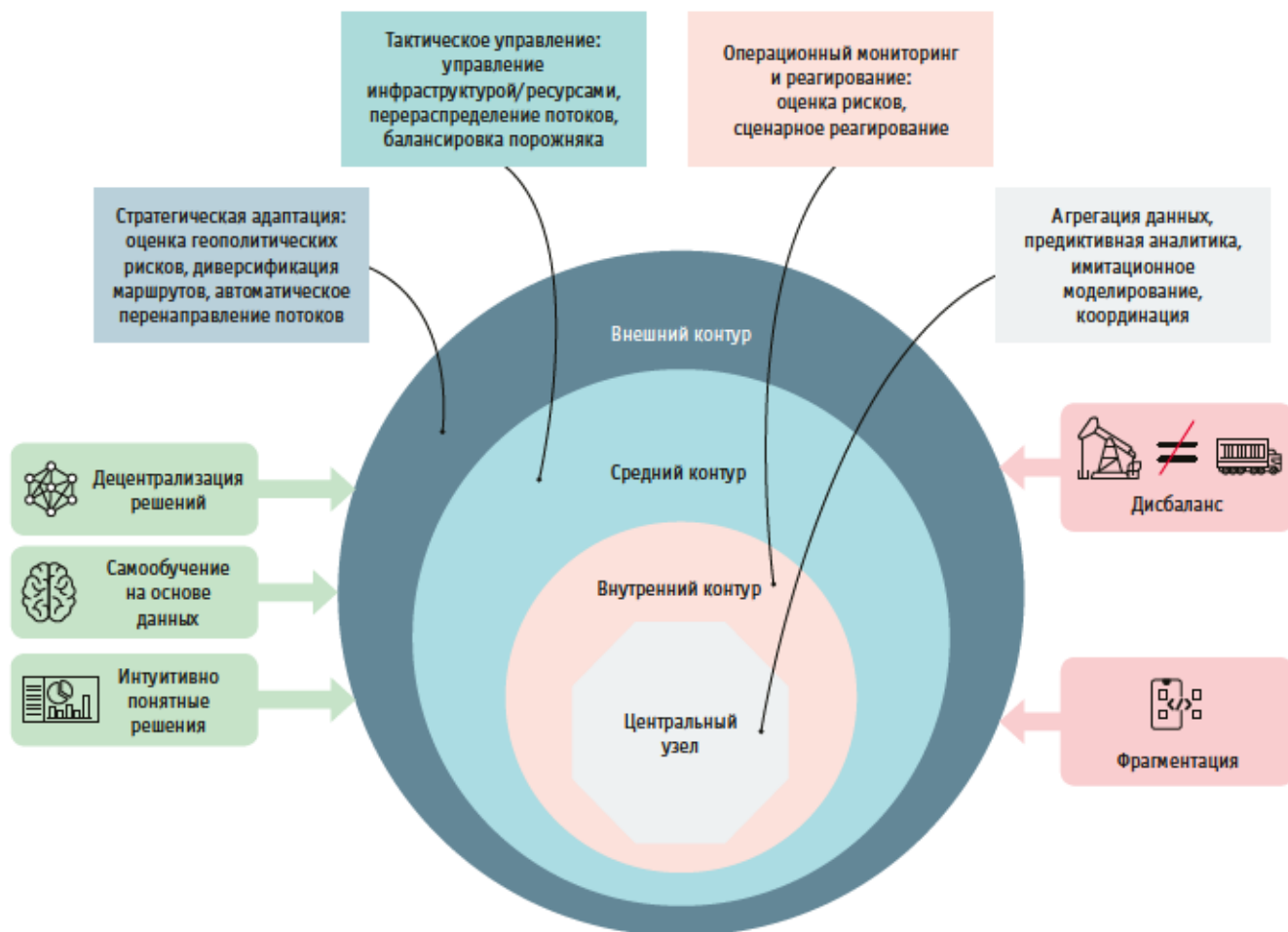


Рис. 4. Концепция архитектуры платформенного решения по обеспечению функционирования цифровой экосистемы логистической среды (составлено авторами)



Рис. 5. Топология размещения транспортно-логистических центров [3]

и экономической эффективности. При превышении пороговых значений риска потоки движения грузов автоматически перенаправляются. Внешний контур отвечает за диверсификацию маршрутов, снижая зависимость от любого одного направления и превращая геополитические риски в инструмент оптимизации логистической сети. Обособленный пример использования этого подхода описан в работе [9], где авторами рассматривается проект XL-train, в рамках которого «из двух китайских поездов формируется один или из трех два на инфраструктуре колеи 1520 мм с увеличением длины поезда, полной загрузкой вагонов, за счет чего оптимизируется пропускная способность железных дорог с ростом прибыли путем снижения издержек».

Средний контур платформы фокусируется на управлении инфраструктурными и ресурсными ограничениями через сеть мультимодальных хабов в Новосибирске, Екатеринбурге, Казани и Ростове-на-Дону (рис. 5). Каждый хаб выполняет функции перераспределения потоков, консолидации грузов и обеспечения сервисных услуг. На данном уровне особое внимание уделяется системе управления порожними контейнерами, которая отражает интенсивность потоков и сигнализирует о дефиците или избытке в конкретном регионе. Описанные функции платформы позволяют решить системную проблему, где рыночные механизмы не справляются с дисбалансом из-за существующих геополитических ограничений и высокого уровня «монополизации морских перевозок» [4].

Предполагается, что данный механизм будет работать по принципу «рынка внутри системы», т.е. цена на перемещение

пустых контейнеров динамически меняется в зависимости от спроса и предложения, стимулируя операторов оптимизировать логистику. Мультимодальные хабы также выполняют функцию поглощения колебаний спроса. Например, при резком росте импорта через порты Дальнего Востока хаб в Новосибирске временно накапливает контейнеры, а затем равномерно распределяет их по центру России, снижая нагрузку на транспортную сеть, что является важной составляющей с учетом значительных расстояний и неравномерного распределения производственных мощностей на территории Российской Федерации.

Внутренний контур консолидирует данные с датчиков IoT на контейнерах, транспортных средствах, терминалах, пограничных пунктах и т.д. [10], и затем эти данные анализируются системой для оценки уровня рисков. При выявлении угроз (отклонение от маршрута, повреждение груза, задержки на границе) система разрабатывает варианты реагирования, используя в качестве методологической базы метод сценариев и дерево решений [11]. Основой функционирования данного уровня системы является технологическое развитие производственных мощностей контейнеров, которое «в ближайшие годы будет сконцентрировано на превращении контейнеров из просто «тар» для перевозки грузов в автономное интеллектуальное устройство» [3]. Согласно прогнозу (рис. 6), объем мирового рынка IoT на транспорте в настоящее время составляет 139,6 млрд долл. США, а к 2034 г. вырастет на 485,4 % и составит 817,2 млрд долл. США.

Так, альтернативой умному контейнеру в настоящее время являются электронные навигационные пломбы. «С 2025 года



их использование стало обязательным при ввозе, вывозе либо транзите автотранспортом через территорию России и Беларуси ряда товарных позиций...» [3], что позволяет «исключить необходимость отдельного документационного сопровождения контейнерной перевозки и автоматизировать последовательную передачу данных о контейнере между участниками перевозочного процесса» [3].

Центральный узел связывает контуры между собой, выполняя функции агрегации данных, предиктивной аналитики и координации действий всех контуров. На этом уровне архитектуры предлагаемого цифрового решения одним из основных методов является имитационное моделирование, которое позволяет проводить апробацию разработанных решений и на основании полученных результатов выбирать наиболее оптимальный, что минимизирует ошибки в реальных операциях [12].

Дальнейшая разработка концепции платформенного решения по обеспечению функционирования цифровой экосистемы логистической среды позволит качественно изменить ряд параметров, характеризующих состояние цепей поставок. Это окажет положительное влияние на состояние всей логистической системы страны, сделав маршруты с участием российских посредников более востребованными за счет наличия конкурентных преимуществ.

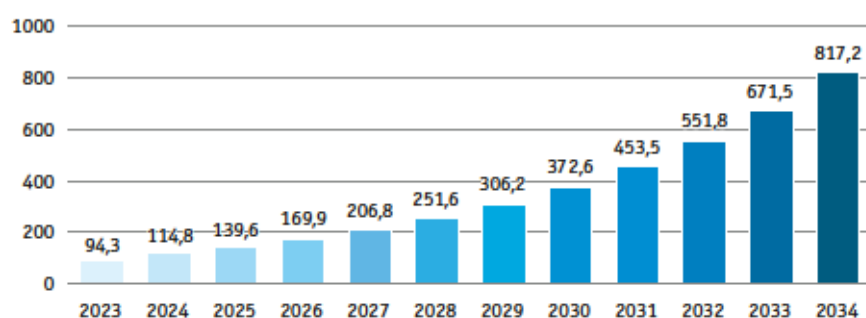


Рис. 6. Объем мирового рынка IoT на транспорте, \$ млрд США [3]

Результатами практических мероприятий реализации цифровой экосистемы в логистической среде служат оптимизация материальных и информационных потоков за счет IT-решений и, как следствие, рост ее эффективности с экономической точки зрения.

Таким образом, сделан вывод о том, что в настоящее время процессы контейнерных перевозок испытывают ряд системных проблем, вызванных санкционным давлением в результате осложнения геополитической ситуации. Решить эти проблемы возможно, минимизировав риски за счет перехода к экосистемной модели взаимодействия участников цепей поставок. Такая организационная форма позволит создать адаптивную среду, способную к саморегуляции логистических процессов. Разработанная концепция архитектуры платформенного решения по обеспечению функционирования

цифровой экосистемы логистической среды представляет собой концептуальную рамку для перестройки контейнерной логистики России в условиях санкционного давления. Ее ключевое преимущество заключается в синтезе стратегического видения, тактической адаптации и операционной гибкости в единой цифровой среде. Дальнейшая разработка и практическая реализация предложенной модели позволит не только оптимизировать цепи поставок с использованием контейнерных перевозок, но и создаст конкурентные преимущества для всей логистической системы страны.

*Работа выполнена в рамках реализации федеральной программы поддержки университетов «Приоритет 2030» с использованием оборудования на базе Центра высших технологий БГТУ им. В. Г. Шухова.*

#### Сведения об авторах:

**Сергей Николаевич Глаголев**, доктор экономических наук, профессор, ректор Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова

**Александр Сергеевич Трошин**, доктор экономических наук, доцент, заведующий кафедрой мировой экономики и финансового менеджмента Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова

**Евгений Владимирович Мирошников**, кандидат технических наук, доцент кафедры электроэнергетики и автоматики Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова

**Иван Алексеевич Новиков**, доктор технических наук, профессор, директор транспортно-технологического института Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова

#### Authors information:

**Sergey N. Glagolev**, DSc in Economics, Professor, Rector of Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov

**Alexander S. Troshin**, DSc in Economics, Associate Professor, Head of World Economy and Financial Management Department, Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov

**Evgeny V. Miroshnikov**, PhD in Engineering, Associate Professor of Electric Power Engineering and Automation Department, Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov

**Ivan A. Novikov**, DSc in Engineering, Professor, Head of Transport and Technological Institute, Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov

## Литература

1. Гашкова Л. В., Морозова О. Ю. Современное состояние рынка международных контейнерных перевозок в России // Вестник Алтайской академии экономики и права. 2022. № 9–1. С. 53–61. DOI: <https://doi.org/10.17513/vaael.2391>.
2. Контейнерооборот портов России по итогам 2024 года. URL: <https://www.infranews.ru/novosti/66655-konteynerooborot-portov-rossii-po-itogam-2024-goda-vyros-na-13-do-5-6-mln-teu/>.
3. Контейнеры. Дайджест. URL: <http://iedt.ru/analitika>.
4. Ходов Л. Г. Контейнерные перевозки — узкое место в мировой торговле // Горизонты экономики. 2022. № 1 (67). С. 165–167. ISSN 2219-3650.
5. Особенности региональных интегрированных логистических систем (на примере АПК Белгородской области) / А. С. Трошин, И. А. Новиков, Н. О. Блудян, В. Ю. Линник // Транспорт Урала. 2024. № 4 (83). С. 59–66. DOI: 10.20291/1815-9400-2024-4-59-66.
6. Войтешик А. А. Развитие цифровой экосистемы в логистике // Развитие логистики и управления цепями поставок : материалы III Международной научно-практической студенческой конференции (в рамках Международного молодежного форума «Креатив и инновации'2022»), Минск, 25 ноября 2022 г. Минск, 2023. С. 55–60.
7. Макарова Н. Н., Тимофеева Г. В., Суркова В. В. Концепты деятельности цифровых экосистем транспортно-логистического обслуживания предпринимательских структур АПК: территориальный аспект // Развитие территорий. 2022. № 3 (29). С. 8–13. DOI: 10.32324/2412-8945-2022-3-08-13.
8. Информационные системы как инструмент обновления локомотивного парка / С. Н. Глаголев, М. Ю. Карелина, И. А. Новиков, А. С. Трошин // Вестник УрГУПС. 2024. № 3 (63). С. 117–126. DOI: 10.20291/2079-0392-2024-3-117-126.
9. Юдникова Е. С. Методологические аспекты организации контейнерных железнодорожных перевозок транспортными организациями // Известия Байкальского государственного университета. 2021. Т. 31. № 1. С. 80–89. DOI: 10.17150/2500-2759.2021.31(1).80-89.
10. Абрамов В. И., Файзуллина А. М. Интернет вещей в логистике: характеристики, преимущества, практики развития // Вестник Московского университета имени С. Ю. Витте. Серия 1. Экономика и управление. 2024. № 3 (50). С. 98–105. DOI: 10.21777/2587-554X-2024-3-98-105.
11. Основные методы, используемые в логистике. URL: [https://thisislogistics.blogspot.com/2018/04/blog-post\\_67.html](https://thisislogistics.blogspot.com/2018/04/blog-post_67.html).
12. Мороз Е. О. Совершенствование проектирования транспортно-логистических систем на основе имитационного моделирования // Вестник молодежной науки. 2020. № 2 (24). 7 с. ISSN 2541-8254.

## References

1. Gashkova L. V., Morozova O. Yu. The current state of international container transportation market in Russia. *Bulletin of Altai Academy of Economics and Law*. 2022. No. 9–1. Pp. 53–61. DOI: <https://doi.org/10.17513/vaael.2391>. (In Russian).
2. Container turnover of Russian ports by the end of 2024. URL: <https://www.infranews.ru/novosti/66655-konteynerooborot-portov-rossii-po-itogam-2024-goda-vyros-na-13-do-5-6-mln-teu/>. (In Russian).
3. Containers. Digest. URL: <http://iedt.ru/analitika>. (In Russian).
4. Khodov L. G. Container shipping is a bottleneck in global trade. *Horizons of economics*. 2022. No. 1 (67). Pp. 165–167. ISSN 2219-3650. (In Russian).
5. Troshin A. S., Novikov I. A., Bludyan N. O., Linnik V. Yu. Features of regional integrated logistics systems (on the example of agro-industrial complex of Belgorod region). *Transport of the Urals*. 2024. No. 4 (83). С. 59–66. DOI: 10.20291/1815-9400-2024-4-59-66. (In Russian).
6. Vaiteschyk H. Development of a digital ecosystem in logistics. *Development of logistics and supply chain management : proceedings of the 3th International scientific and practical student conference (within the framework of the International Youth Forum «Creativity and Innovation'2022»)*, Minsk, November 25, 2022. Minsk, 2023. Pp. 55–60. (In Russian).
7. Makarova N. N., Timofeeva G. V., Surkova V. V. Concepts of digital ecosystems of transport and logistics services for business structures of agro-industrial complex: territorial aspect. *Territory Development*. 2022. No. 3. Pp. 8–13. DOI: 10.32324/2412-8945-2022-3-08-13. (In Russian).
8. Glagolev S. N., Karelina M. Yu., Novikov I. A., Troshin A. S. Information systems as a tool for updating the locomotive fleet. *Herald of the USURT*. 2024. No. 3 (63). Pp. 117–126. DOI: 10.20291/2079-0392-2024-3-117-126. (In Russian).
9. Judnikova E. S. Methodological aspects of container rail traffic managed by transport organizations. *Bulletin of Baikal State University*. 2021. Vol. 31. No. 1. Pp. 80–89. DOI: 10.17150/2500-2759.2021.31(1).80-89. (In Russian).
10. Abramov V. I., Fayzullina A. M. Internet of things in logistics: characteristics, advantages, development practices. *Bulletin of Moscow Witte University. Series 1: Economics and Management*. 2024. No. 3 (50). Pp. 98–105. DOI: 10.21777/2587-554X-2024-3-98-105. (In Russian).
11. The main methods used in logistics. URL: [https://thisislogistics.blogspot.com/2018/04/blog-post\\_67.html](https://thisislogistics.blogspot.com/2018/04/blog-post_67.html). (In Russian).
12. Moroz E. O. Improvement of design of transport and logistics systems on the basis of simulation modeling. *Journal of youth science*. 2020. No. 2 (24). 7 p. ISSN 2541-8254. (In Russian).



Научная статья

УДК 656.225

## Повышение уровня маршрутизации угля за счет организации маршрутообразования на опорных станциях

Елена Дмитриевна Псеровская<sup>1</sup>, Данил Анатольевич Басманов<sup>1</sup><sup>1</sup>Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск, Россия

## Increasing the level of coal routing through the organization of route formation at combination stations

Elena D. Pserovskaya<sup>1</sup>, Danil A. Basmanov<sup>1</sup><sup>1</sup>Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

### Аннотация

Авторами проанализировано состояние перевозок угля железнодорожным транспортом в направлении Восточного полигона в условиях переориентации грузопотоков, выявлены резервы повышения уровня их маршрутизации. Предложена технология формирования маршрутных поездов на опорных железнодорожных станциях, определены ее особенности по сравнению со ступенчатой маршрутизацией, составлен перечень критериев для отнесения железнодорожных станций к опорным. Рассмотрены три возможных варианта доставки вагонов на опорную станцию.

**Ключевые слова:** Восточный полигон, переориентация грузопотоков, перевозки угля, организация вагонопотоков, маршрутизация перевозок

### Abstract

The authors analyzed the state of coal transportation by rail in the direction of the Eastern polygon in the context of the reorientation of cargo flows, identified reserves for increasing the level of their routing. A technology for forming block trains at reference railway stations is proposed, its features are determined in comparison with stepwise routing, and a list of criteria for classifying railway stations as reference stations is compiled. Three possible options for delivering cars to the reference station are considered.

**Keywords:** Eastern polygon, reorientation of cargo flows, coal transportation, organization of car traffic, routing freight

DOI: 10.20291/1815-9400-2025-4-57-61

На протяжении последних 10 лет особое внимание уделяется развитию инфраструктуры железнодорожного транспорта Восточного полигона. При этом в условиях переориентации грузопотоков с запада на восток, которая с начала 2022 г. стала носить массовый характер, особо остро ощущается дефицит пропускных и провозных способностей на данном направлении, что неоднократно отмечали представители и ОАО «РЖД», и крупных компаний-грузоотправителей [1, 2].

Наибольшие трудности в сложившихся условиях стали испытывать российские угледобывающие предприятия, в частности Кузбасского региона: за период с 2021 по 2024 г. добыча угля на Кузбассе сократилась на 18,39 %, а объем перевозок железнодорожным транспортом — на 21,70 % (рис. 1) [3].

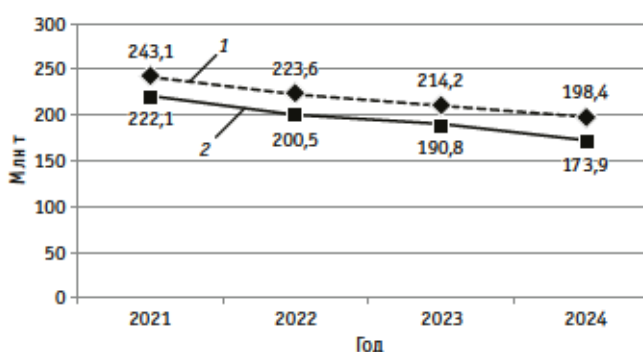


Рис. 1. Динамика добычи угля и его отгрузки железнодорожным транспортом в Кузбасском регионе:  
1 — объем добычи, млн т;  
2 — объем отгрузки железнодорожным транспортом, млн т

Падение объемов добычи угля неизбежно сказывается на уровне его конкурентоспособности на мировых рынках, что в первую очередь обусловлено двумя факторами:

- 1) высокой долей постоянных затрат в себестоимости добычи угля (более 50 % для разрезов и свыше 75 % для шахт);
- 2) устойчивой тенденцией к снижению цен на уголь на мировом рынке (рис. 2) [4].

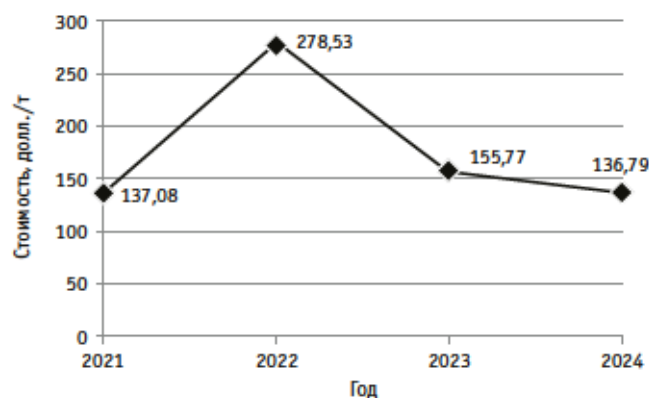


Рис. 2. Динамика цен на уголь на мировом рынке

В результате за 2024 г. количество убыточных предприятий угольной промышленности Кузбасса увеличилось на 22,5 %, а общие доходы угольных компаний сократились на 66,2 %.

Поскольку Кузбасский регион имеет огромное значение не только для Западной Сибири, но и для всей страны, Министерством энергетики Российской Федерации была подготовлена антикризисная программа, направленная на поддержку угольной промышленности Кузбасса, спасение предприятий угольной отрасли от банкротства и на сохранение объемов экспорта [5]. Одно из направлений программы — совершенствование технологии перевозок и снижение их себестоимости (рис. 3).

В технологии перевозок грузов железнодорожным транспортом важное место занимает совершенствование системы организации вагонопотоков. Сегодня самый эффективный метод — это формирование прямых отправительских маршрутов. Под прямым отправительским маршрутом понимается состав поезда установленной массы или длины, сформированный одним грузоотправителем на пути необщего пользования или по договору с перевозчиком либо владельцем инфраструктуры на железнодорожной станции отправления, следующий на одну станцию назначения не менее чем через одну техническую станцию без переработки, предусмотренной действующим планом формирования поездов [6].

В ходе проведенного анализа структуры отправок каменного угля со станций Западно-Сибирской железной дороги было

установлено, что уровень отправительской маршрутизации в восточном направлении не достиг максимального значения. Устойчивые объемы угля оформляются повагонными и групповыми отправлениями, что является определенным резервом для дальнейшего совершенствования системы организации вагонопотоков. Достаточно эффективным решением здесь может стать формирование маршрутных поездов на специально выделенных опорных железнодорожных станциях.

Предлагаемая технология формирования маршрутов во многом схожа со ступенчатой маршрутизацией, теоретические основы которой были заложены во времена СССР. В частности, отдельное внимание ступенчатой маршрутизации уделяли в своих монографиях Н. Е. Боровой и В. Т. Осипов, рассматривая передовой опыт Южно-Уральской, Восточно-Сибирской и Куйбышевской железных дорог [7, 8]. Резкому росту количества ступенчатых маршрутов на этих дорогах в эпоху СССР способствовали организация работы по подаче вагонов под погрузку, выполнение операций по погрузке и соединению групп вагонов по заранее разработанным и согласованным графикам. В условиях командно-административной системы существенно упрощался процесс закрепления потребителей продукции за производителями, а у начальников отделений железной дороги имелись возможности по согласованию с грузоотправителями выполнять сгущение подачи вагонов под погрузку.

С переходом от командно-административной (плановой) к рыночной экономической системе общее стремление перевозчика к повышению уровня маршрутизации перевозок грузов сохранилось, но в то же время новые условия стали оказывать значительное воздействие на этот процесс: появились трудности с планированием объемов и сроков предъявления грузов разными грузоотправителями для формирования ступенчатых маршрутов [9, 10].

Предлагаемая технология организации маршрутов на опорных станциях имеет ряд особенностей:

1) при анализе возможности отнесения железнодорожных станций к опорным следует уделять внимание не только крупным участковым и сортировочным станциям, но и небольшим грузовым и промежуточным станциям при условии удовлетворения их параметров определенной системе критериев;

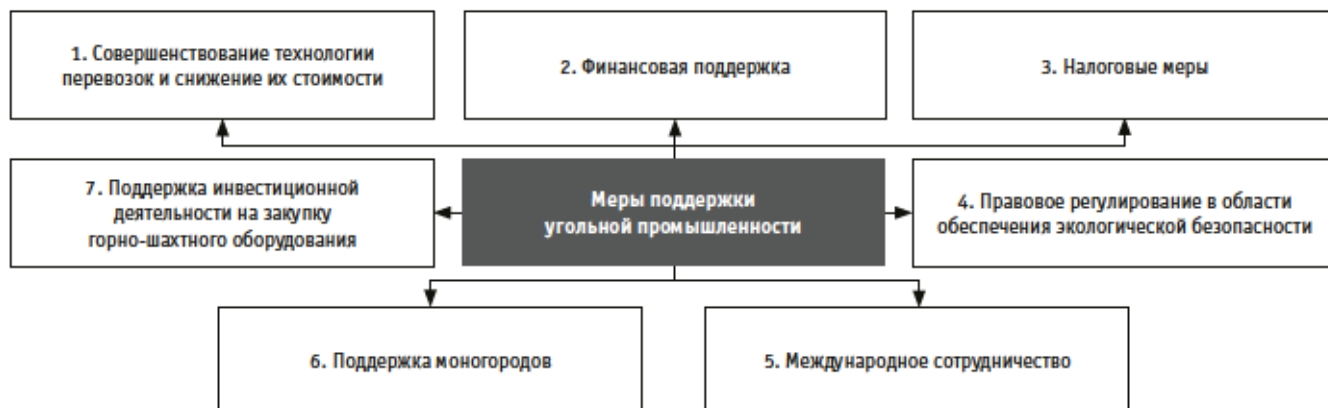


Рис. 3. Меры поддержки угольной промышленности



Таблица 1

Критерии отнесения железнодорожной станции к опорной

№ п/п	Критерий	Требуемое значение
1	Количество приемо-отправочных (без учета главных), сортировочных (при наличии) путей	Не менее 2 путей
2	Длина приемо-отправочных, сортировочных (при наличии) путей	Не менее 1050 м
3	Резерв свободного времени в работе приемо-отправочных, сортировочных (при наличии) путей	1 путь: 1440 мин/сут (постоянное накопление вагонов) 2 путь: до 295 мин/состав* (маневровые операции)
4	Количество маневровых локомотивов	Не менее 1 локомотива
5	Резерв свободного времени в работе маневрового локомотива	До 295 мин/состав*
6	Наличие вытяжного пути	Да
7	Резерв свободного времени в работе вытяжного пути	До 295 мин/состав*
8	Наличие осматрщика-ремонтника вагонов	Да
9	Наличие приемосдатчика груза и багажа	Да**

\*Значение определено расчетным путем для многогруппного состава.

\*\*Допускается проведение коммерческого осмотра иным работником, прошедшим обучение и проверку знаний по коммерческой эксплуатации [11].

2) в отличие от ступенчатой маршрутизации, где процесс планирования подвода порожних вагонов не предусматривает договорных отношений перевозчика с грузоотправителями, технология организации маршрутов на опорных станциях предполагает заключение дополнительных соглашений между перевозчиком и грузоотправителями;

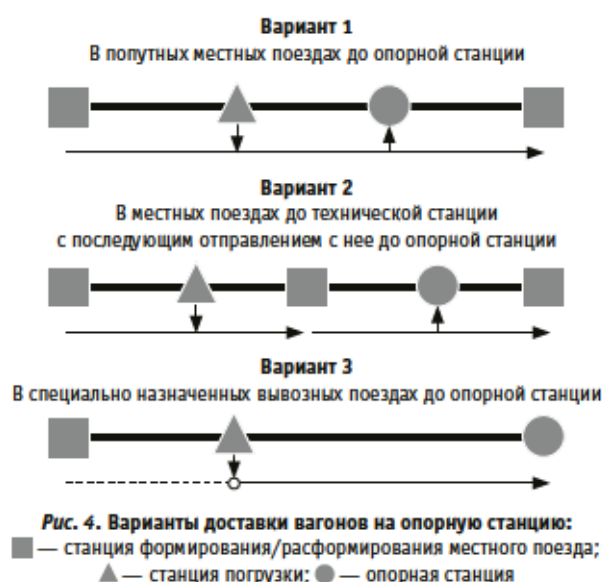
3) при рассмотрении грузовой базы следует делать упор на каменный уголь, который в недостаточной степени охвачен отправительской маршрутизацией с мест погрузки Кузбасского региона.

Система критериев отнесения железнодорожной станции к опорной должна учитывать и техническое оснащение станций, и текущий уровень ее загруженности. Перечень необходимых критериев приведен в табл. 1.

Как и при ступенчатой маршрутизации, при маршрутизации с опорных станций эффективность технологии напрямую зависит от своевременного поступления групп вагонов на опорную станцию, в противном случае возрастают риски повышения простаивания вагонов в ожидании накопления на маршрут. Одним из инструментов, которые позволяют обеспечить своевременность предъявления грузоотправителями вагонов к перевозке, может стать, как уже отмечалось, заключение отдельного соглашения между перевозчиком и грузоотправителем. Это соглашение должно содержать условия, которые выгодны для грузоотправителя. К таким условиям можно отнести:

- 1) гарантированное согласование перевозчиком заявленных грузоотправителем объемов грузов в суточном клиентском плане погрузки (СКПП) в даты, предусмотренные графиками подач по заявке на перевозку грузов и отраженные в соглашении;
- 2) предоставление дополнительной скидки с тарифа на перевозку грузов [12].

В случае невыполнения грузоотправителем обязательств по соглашению и непредъявления груза к перевозке перевоз-



чику должна выплачиваться компенсация, оговоренная в соглашении между сторонами.

Технология доставки вагонов со станций погрузки на опорную станцию зависит от категории и маршрутов следования местных поездов на обслуживаемых участках, а также от мощности маршрутизируемого вагонопотока. Рассмотрим возможные варианты данной технологии, представленные на рис. 4, подробнее.

Вариант 1 — самый оптимальный, так как не требует дополнительных затрат на назначение отдельного местного поезда для развоза вагонов со станций погрузки на опорную станцию.

Вариант 2 — самый неэффективный из рассматриваемых, так как предполагает дополнительную переработку вагонов

на ближайшей технической станции, что приводит к увеличению времени в пути до опорной станции и к дополнительной нагрузке на техническую станцию. Использование этого варианта целесообразно в тех случаях, когда при классической технологии следования вагона в соответствии с планом формирования поездов затраты времени на накопление на технической станции до установленной массы или длины поезда соответствующей категории существенно выше, чем суммарные затраты времени, т. е.:

- 1) на технической станции в ожидании отправления в местном поезде до опорной станции;
- 2) в пути следования от технической до опорной станции;
- 3) на опорной станции в ожидании накопления до установленной массы или длины маршрутного поезда.

В то же время перед применением варианта 2 важно рассмотреть техническую и технологическую возможность формирования маршрутных поездов непосредственно на ближайшей технической станции.

Вариант 3 является самым быстрым по времени следования вагонов до опорной станции, но, с другой стороны, требует дополнительных затрат на организацию специально назначенного вывозного поезда или выделение диспетчерского локомотива, что может быть весьма затруднительно на отдельных наиболее загруженных участках. Применение этого варианта будет обоснованным при достаточно устойчивом вагонопотоке, обеспечивающем необходимый уровень использования нитки графика движения по массе и/или дли-

не поезда, а также при относительно небольшой длине обслуживаемых участков.

Таким образом, по результатам проведенного исследования можно сделать следующие выводы.

1. Переориентация грузопотоков с запада на восток России существенно повысила нагрузку на инфраструктуру железнодорожного транспорта Восточного полигона, которая оказалась не до конца готовой к новым условиям работы.
2. Невозможность вывоза продукции угольными предприятиями Кузбасского региона в полном объеме привела к падению производства, сокращению получаемых доходов и к сложному экономическому положению в регионе.
3. Существующий уровень маршрутизации перевозок угля имеет определенные резервы для использования организационно-технологических мероприятий, к которым относится маршрутизация вагонопотоков на опорных станциях.
4. Предложенный вариант маршрутизации вагонопотоков с опорных станций по сравнению со ступенчатой маршрутизацией имеет существенные отличия. В связи с этим по результатам выполненного исследования определены основные критерии отнесения станций к опорным и сделан вывод о необходимости установления договорных отношений между перевозчиком и грузоотправителями.
5. В зависимости от мощности маршрутизируемого вагонопотока и организации работы с местными поездами на участках в границах района тяготения к опорной станции рассмотрены варианты развоза вагонов по опорным станциям.

#### Сведения об авторах:

**Елена Дмитриевна Псеровская,**  
кандидат технических наук, заведующая кафедрой  
«Логистика, коммерческая работа и подвижной состав»  
Сибирского государственного университета путей сообщения

**Данил Анатольевич Басманов,**  
аспирант кафедры «Логистика, коммерческая работа и подвижной состав»  
Сибирского государственного университета путей сообщения

#### Authors information:

**Elena D. Pserovskaya,**  
PhD in Engineering,  
Head of Commercial Work and Rolling Stock Department,  
Siberian Transport University

**Danil A. Basmanov,**  
postgraduate student of Commercial Work and Rolling Stock Department,  
Siberian Transport University

#### Литература

1. Глава Минэнерго Цивилев: дефицит пропускной способности Восточного полигона оценивается в 130–140 млн тонн в год. URL: <https://clck.ru/3MVbtN>.
2. Перевозчики рассказали об оперативном решении логистических проблем на Восточном полигоне. URL: <https://company.rzd.ru/ru/9401/page/78314?id=207132>.
3. Показатели. URL: <https://mupk42.ru/ru/industry/pokazateli/>.
4. Уголь — Цены [2008–2025 Данные] 2026–2027 прогноз. URL: <https://ru.tradingeconomics.com/commodity/coal>.
5. Устюжанцева О. В. Угольная промышленность Кузбасса: социально-политическое измерение. История // Вестник Томского государственного университета. 2023. № 84. С. 79–87. DOI: 10.17223/19988613/84/10.
6. Об утверждении Инструкции по планированию, организации и учету перевозок грузов маршрутами : распоряжение ОАО «РЖД» от 21.10.2015 г. № 2509р. URL: <https://www.con>

#### References

1. Energy Minister Isvilev: the capacity deficit of the Eastern Polygon is estimated at 130–140 million tons per year. URL: <https://clck.ru/3MVbtN>. (In Russian).
2. The carriers spoke about the operational solution of logistical problems at the Eastern Polygon. URL: <https://company.rzd.ru/ru/9401/page/78314?id=207132>. (In Russian).
3. Indicators. URL: <https://mupk42.ru/ru/industry/pokazateli/>. (In Russian).
4. Coal — Prices [2008–2025 Data] 2026–2027 Forecast. URL: <https://ru.tradingeconomics.com/commodity/coal>. (In Russian).
5. Ustyuzhantseva O. V. Coal industry of Kuzbass: socio-political dimension. *Tomsk State University Journal of History*. 2023. No. 84. Pp. 79–87. DOI: 10.17223/19988613/84/10. (In Russian).
6. On approval of the Instructions on planning, organization and accounting of cargo transportation by routes : the Order of JSC Russian Railways dated 21.10.2015 No. 2509r. URL: <https://www.con>



consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req-doc&base-EXP&n-641879#lQIqSrU6axhcuyY7.

7. Боровой Н. Е. Маршрутизация перевозок грузов. Москва : Транспорт, 1978. 215 с.
8. Осипов В. Т. Маршрутизация перевозок грузов. Москва : Транспорт, 1973. 199 с.
9. Никифорова О. А. Совершенствование маршрутизации перевозок с мест погрузки в условиях рыночных отношений // Известия ПГУПС. 2007. № 3 (12). С. 27–39. ISSN 1815-588X.
10. Никифорова О. А. Эффективность маршрутизации вагонопотоков с мест погрузки : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Санкт-Петербург, 2008. 167 с.
11. О вводе в действие Регламента многоступенчатого контроля по обеспечению безопасности движения при приеме груза и порожних вагонов к перевозке, в пути следования и при выдаче груза (вместе с Регламентом многоступенчатого контроля по обеспечению безопасности движения поездов при приеме груза и порожних вагонов к перевозке, в пути следования и при выдаче груза) : распоряжение ОАО «РЖД» от 28.11.2017 г. № 2451р. URL: <https://clck.ru/3NSLuM>.
12. Прейскурант № 10-01 «Тарифы на перевозки грузов и услуги инфраструктуры, выполняемые российскими железными дорогами» (Тарифное руководство № 1. Ч. 1 и 2). URL: <https://docs.cntd.ru/document/901868848>.

sultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req-doc&base-EXP&n-641879#lQIqSrU6axhcuyY7. (In Russian).

7. Borovoy N. E. Cargo transportation routing. Moscow : Transport, 1978. 215 p. (In Russian).
8. Osipov V. T. Routing of cargo transportation. Moscow : Transport, 1973. 199 p. (In Russian).
9. Nikiforova O. A. Improvement of transportation routing from loading sites in market conditions. *Proceedings of Petersburg Transport University*. 2007. No. 3 (12). Pp. 27–39. ISSN 1815-588X. (In Russian).
10. Nikiforova O. A. Efficiency of routing car traffic from loading sites : PhD in Engineering Thesis. St. Petersburg, 2008. 167 p. (In Russian).
11. On the entry into force of the Regulations for multi-stage control of traffic safety when accepting cargo and empty cars for transportation, en route and upon delivery of cargo (together with the Regulations for multi-stage control of train safety when accepting cargo and empty cars for transportation, en route and upon delivery of cargo) : the Order of JSC Russian Railways dated 28.11.2017 No. 2451r. URL: <https://clck.ru/3NSLuM>. (In Russian).
12. Price List No. 10-01 «Tariffs for cargo transportation and infrastructure services performed by Russian Railways» (Tariff Guide No. 1. Parts 1 and 2). URL: <https://docs.cntd.ru/document/901868848>. (In Russian).

Научная статья

УДК 656.078

# Методика формирования индивидуального рейтинга грузоотправителей

Дмитрий Станиславович Завалишин<sup>1,2</sup>, Артем Дамирович Хазимуллин<sup>3</sup>, Галина Адольфовна Тимофеева<sup>1,4</sup>

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

<sup>2</sup>Институт математики и механики им. Н. Н. Красовского Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия

<sup>3</sup>Свердловский территориальный центр фирменного транспортного обслуживания, Екатеринбург, Россия

<sup>4</sup>Институт радиоэлектроники и информационных технологий Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

## Methodology for forming an individual rating of shippers

Dmitry S. Zavaliushin<sup>1,2</sup>, Artem D. Khazimullin<sup>3</sup>, Galina A. Timofeeva<sup>1,4</sup>

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

<sup>2</sup>N. N. Krasovskii Institute of Mathematics and Mechanics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia

<sup>3</sup>Sverdlovsk Territorial Center of Branded Transport Services, Ekaterinburg, Russia

<sup>4</sup>Institute of Radioelectronics and Information Technologies of Ural State University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

### Аннотация

Разработаны подходы построения экспертной системы для рейтинговой оценки грузоотправителей на основе анализа действующих правил и регламентов приема груза к перевозке на железнодорожном транспорте. Рейтинг базируется на введении балльной оценки по набору показателей, в качестве которых выбраны тарифный класс груза, объем отгружаемых грузов, наличие обоюдной претензионной работы и судебных исков, желаемое направление транспортировки грузов, его соотношение с лимитирующими и развивающимися направлениями. Рейтинг грузоотправителей позволит принимать к перевозке оптимальные для перевозчика грузы, не создавая противоречий с существующими нормативными актами. В ситуации, когда в соответствии с очередью недискриминационного доступа два грузоотправителя имеют одинаковый приоритет, предлагается проводить дополнительное ранжирование по индивидуальному рейтингу грузоотправителя. Таким образом, авторами предложена методика ранжирования грузоотправителей, внедрение которой позволит повысить экономическую эффективность железнодорожного перевозчика как полноценного субъекта рыночных отношений без ущерба социальных функций, возложенных на него государством.

**Ключевые слова:** многокритериальная оптимизация, рейтинговая оценка, сравнение критериев, грузоотправители, заявка на перевозку грузов, лимитирующие направления, индивидуальные показатели

### Abstract

Approaches have been developed to build an expert system for rating shippers based on an analysis of the current rules and regulations for accepting cargo for transportation by rail. The rating is based on the introduction of a point rating based on a set of indicators, which include the tariff class of cargo, the volume of goods shipped, the presence of mutual claims and lawsuits, the desired direction of cargo transportation, and its ratio to limiting and developing areas. The rating of shippers will allow accepting optimal cargoes for transportation without creating contradictions with existing regulations. In a situation where, according to the non-discriminatory access queue, two shippers have the same priority, it is proposed to conduct additional ranking based on the individual rating of the shipper. Thus, the authors propose a methodology for ranking shippers, the implementation of which will increase the economic efficiency of the railway carrier as a full-fledged subject of market relations without prejudice to the social functions assigned to it by the state.

**Keywords:** multi-criteria optimization, rating assessment, criteria comparison, shippers, freight transportation request, limiting routes, individual indicators

DOI: 10.20291/1815-9400-2025-4-62-67

### ВВЕДЕНИЕ

В связи с переориентацией грузопотоков с запада на восток перед транспортной отраслью Российской Федерации поставлена задача по постоянной разработке управленческих, организационных и технологических решений, которые позволят выполнять социальные обязательства перед государством и поддерживать оптимальный уровень транспортной доступности для хозяйствующих субъектов [1, 2].

Наряду с транспортной отраслью трудности испытывают и грузоотправители (причем более всего снижение пропускных способностей отражается на экспортерах), так как нарушаются цепочки их поставок. Например, за 2024 г. в границах Свердловской железной дороги из общего количества поданных заявок на грузоперевозку (заявка ГУ-12) было согласовано и принято только 60,5 %. Такая ситуация складывается из-за смены направления грузопотоков и возрастающих нагрузок на инфраструктуру [3, 4].

Железнодорожный перевозчик, как экономический субъект и коммерческая организация, тоже находится в сложном положении, потому что должен расходовать свои тяговые и инфраструктурные мощности на выполнение международных межправительственных соглашений, социальных функций и обеспечение обороноспособности страны. Поэтому задача по оптимальному использованию оставшихся мощностей приобретает особую актуальность [5, 6].

Целью исследования, представленного в статье, является разработка (в дополнение к существующим правилам и нормативным документам по приему грузов к перевозке на железнодорожном транспорте)



методики по формированию рейтинговой оценки грузоотправителя, которая позволяет перевозчику принимать оптимальные решения и не противоречит действующим нормативным актам.

## МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ РЕЙТИНГА

В настоящее время прием грузов и их очередность при ограниченных пропускных способностях определяются положениями Устава железнодорожного транспорта<sup>1</sup> и Правилами недискриминационного доступа перевозчиков к инфраструктуре железнодорожного транспорта общего пользования<sup>2</sup>.

В ситуации, когда в соответствии с правилами недискриминационного доступа два грузоотправителя имеют одинаковую очередь, предлагается проводить дополнительное ранжирование по индивидуальному рейтингу. Метод составления рейтинга основан на выборе наиболее важных показателей взаимодействия с грузоотправителями, многокритериальном подходе и методе анализа важности критериев (рис. 1).

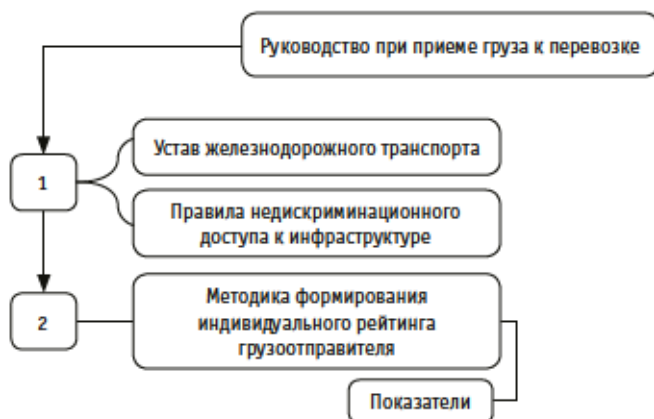


Рис. 1. Структура правил при приеме груза к перевозке

К показателям, формирующим индивидуальный рейтинг грузоотправителя, отнесем следующие:

тарифный класс груза, на основании которого рассчитывается стоимость железнодорожной перевозки (подробно влияние классности грузов на стратегии перевозчика рассмотрено в работах [7, 8]);

объем отгружаемых грузов;

наличие обоюдной претензионной работы, что является косвенной оценкой лояльности грузоотправителя к перевозчику; желаемое направление транспортировки грузов, его соотношение с лимитирующими направлениями.

При формировании индивидуального рейтинга грузоотправителя каждый показатель необходимо привести к единой системе исчисления. Используем для этого распространенную пятибалльную оценку (табл. 1).

Таблица 1

Балльная оценка показателей

Значение	Балл
Неудовлетворительное	1
Ниже среднего	2
Среднее	3
Выше среднего	4
Наилучшее	5

### Тарифный класс груза

На основании тарифной классификации отправляемых грузов рассчитывается тариф на железнодорожную перевозку. Но ввиду того что один из основных производственных показателей железнодорожного транспорта — объем погруженного груза, независимо от класса отгружаемого груза показатель не будет иметь неудовлетворительное значение.

### Претензионная работа

В масштабах хозяйственной деятельности ОАО «РЖД» на всем полигоне железных дорог между перевозчиком и грузоотправителем возникают спорные вопросы, связанные с исполнением сторонами своих обязанностей. Чтобы решить разногласия и выстроить между участниками правовой диалог, проводится претензионная работа, которая стала неотъемлемой составляющей процесса транспортировки грузов. Однако бывают ситуации, когда споры выходят за рамки непосредственных отношений «перевозчик — грузоотправитель». При наличии сразу нескольких вариантов претензионной работы предлагается учитывать наименьший балл.

### Направление транспортировки груза

На полигоне железных дорог реализуется динамическая модель загрузки инфраструктуры (ДМЗИ), задача которой — автоматизировать процесс согласования заявок ГУ-12 по перевозке грузов на основе сведений о занятости инфраструктуры. Подробное описание принципов работы ДМЗИ представлено в [9, 10].

На основании анализа за прошедшие периоды о недостаточности пропускных способностей инфраструктуры на каком-то направлении участок относят к лимитирующим. Срок согласования заявок ГУ-12 на таких участках увеличивается. Например, средний срок согласования заявки ГУ-12 на перевозку грузов со станций отправления Свердловской железной дороги составляет 10 сут, но на различных направлениях в зависимости от отнесения их к лимитирующим сроки сильно разли-

<sup>1</sup>Федеральный закон «Устав железнодорожного транспорта Российской Федерации» от 10.01.2003 № 18-ФЗ. URL: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_40444](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_40444).

<sup>2</sup>Постановление Правительства РФ от 25.11.2003 № 710 (ред. от 27.05.2024) «Об утверждении Правил недискриминационного доступа перевозчиков к инфраструктуре железнодорожного транспорта общего пользования, грузоотправителей к услуге по перевозке грузов железнодорожным транспортом общего пользования». URL: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_45207/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_45207/).

чаются. Поэтому при составлении рейтинга грузоотправителей будем учитывать средний срок согласования заявок ГУ-12 на выбранное направление грузоперевозки.

#### Объем отгружаемых грузов

Это один из ключевых показателей работы железнодорожного транспорта, измеряемый в тоннах за отчетный период (обычно за год). На рис. 2 показаны результаты анализа объемов отгрузки грузоотправителей на железнодорожный транспорт в пределах одного полигона дороги за год (учитывались грузоотправители, чей совокупный объем отгрузки превышал 1 тыс. т). Средний показатель по региону составил 143 тыс. руб.

Из рис. 2 следует, что 87 % грузоотправителей имеют совокупный ежегодный объем отгрузки менее 100 тыс. т, т.е. показатель ниже среднего. Однако необходимо отметить, что 90 % объема всех отгружаемых грузов приходится на долю 13 % грузоотправителей.

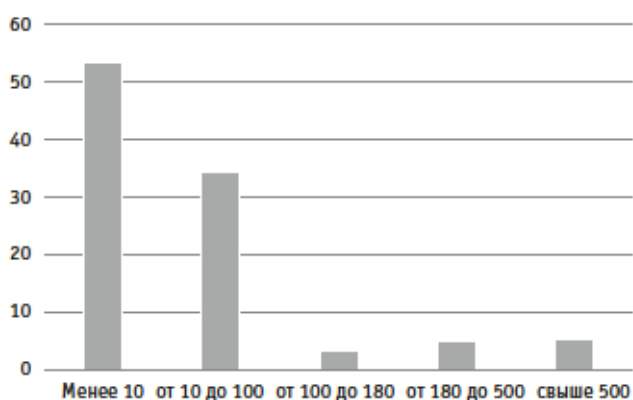
Анализ предложенных показателей по пятибалльной системе оценок приведен в табл. 2.

#### РАНЖИРОВАНИЕ КРИТЕРИЕВ

Отметим, что приведенные показатели не могут быть оценены в равнозначной степени, значит, следует определить вес каждого показателя в общей оценке индивидуального рейтинга грузоотправителей.

Для этого будем использовать метод иерархии Саати [11–13], который широко применяется при выборе решений в многокритериальных задачах логистики и управления на транспорте [14, 15]. Метод включает следующие этапы: построение матрицы сравнений важности критериев, нахождение весовых коэффициентов, оценку согласованности сравнений.

На основании экспертных оценок (в качестве экспертов привлечены специалисты Свердловского территориально-



**Рис. 2. Анализ объемов отгрузки грузоотправителей<sup>3</sup>:**  
по вертикали — доля грузоотправителей от общего числа, %;  
по горизонтали — объем отгрузки одного грузоотправителя, тыс. т/год

го центра фирменного транспортного обслуживания) составим таблицу (матрицу  $\{a_{ij}\}$ ) сравнения важности критериев (табл. 3). Элементы матрицы отражают относительную важность критериев:  $a_{ij} = 5$ , если критерий  $K_j$  значительно важнее критерия  $K_i$ ;  $a_{ij} = 3$ , если критерий  $K_j$  незначительно важнее критерия  $K_i$ ;  $a_{ij} = 1$  при равной значимости критериев  $K_i$  и  $K_j$ . Значения коэффициентов сравнения 7 и 9, отражающие сильное и максимально сильное превосходство соответственно, в анализе не встретились.

Суммарная оценка (рейтинг) грузоотправителя  $X$  рассчитывается следующим образом:

$$f(X) = \lambda_1 \cdot K_1(X) + \lambda_2 \cdot K_2(X) + \lambda_3 \cdot K_3(X) + \lambda_4 \cdot K_4(X), \quad (1)$$

где  $K_i(X)$  — значение  $i$ -го критерия по пятибалльной шкале;  $\lambda_i > 0$  — весовые коэффициенты критериев.

Таблица 2

Показатели для вычисления индивидуального рейтинга грузоотправителя

Оценка	Показатель			
	Тарифный класс отгружаемого груза ( $K_1$ )	История претензионной работы с грузоотправителем ( $K_2$ )	Объем отгружаемых грузов ( $K_3$ ), тыс. т/год	Сроки согласования заявок по направлению грузоперевозки ( $K_4$ ), сут
Неудовлетворительное значение (1 балл)	—	Судебные разбирательства по инициативе грузоотправителя	Менее 10	Свыше 21
Значение ниже среднего (2 балла)	—	Судебные разбирательства по инициативе перевозчика	От 10 до 100	От 15 до 21
Среднее значение (3 балла)	3-й	По инициативе грузоотправителя, штрафы выплачены	От 100 до 180	От 9 до 15
Значение выше среднего (4 балла)	2-й	По инициативе перевозчика, штрафы выплачены	От 180 до 500	От 6 до 9
Наилучшее значение (5 баллов)	1-й	Претензионная работа не проводилась	Свыше 500	Менее 6

<sup>3</sup>Отчет об устойчивом развитии ОАО «РЖД». URL: [https://sr2023.rzd.ru/download/full-reports/csr\\_ru\\_annual-report\\_pages\\_rzd\\_2023.pdf](https://sr2023.rzd.ru/download/full-reports/csr_ru_annual-report_pages_rzd_2023.pdf).



Таблица 3

Оценка важности критериев

Критерий	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_4$	$A_i$	Коэффициент
$K_1$	1	5	2	3	2,34	0,47
$K_2$	0,2	1	0,25	0,33	0,36	0,07
$K_3$	0,5	4	1	3	1,57	0,31
$K_4$	0,33	3	0,25	1	0,71	0,14
Сумма	2,03	13	3,5	7,33	4,97	1

Для расчета коэффициентов важности определим среднее геометрическое для каждой строки табл. 3

$$A = \sqrt[4]{a_1 \cdot a_2 \cdot a_3 \cdot a_4}, \quad (2)$$

вычислим их сумму  $A$  и найдем  $\lambda_i$ :

$$A = \sum_{i=1}^4 A_i; \lambda_i = \frac{A_i}{A} \quad (3)$$

Рейтинг грузоотправителя запишем в виде

$$f(X) = 0,47 \cdot K_1(X) + 0,07 \cdot K_2(X) + 0,34 \cdot K_3(X) + 0,14 \cdot K_4(X) \quad (4)$$

и примем для него значения в интервале [1; 5].

Прежде чем анализировать отдельных клиентов, проверим согласованность экспертных оценок важности критериев. Вычислим суммарный индекс коэффициентов

$$C = A_1 \cdot \lambda_1 + A_2 \cdot \lambda_2 + A_3 \cdot \lambda_3 + A_4 \cdot \lambda_4. \quad (5)$$

В идеальном случае суммарный индекс равен числу критериев, т.е. 4, расчет по формуле (5) дает  $C = 4,04$ .

Найдем коэффициент согласованности (КС) как отношение индекса согласованности (ИС) к индексу рандомизации (ИР).

Индекс согласованности  $ИС = \frac{C-n}{n-1} = \frac{C-4}{3} = 0,018$ ,  
ИР(4) = 0,9 (см. [12]), откуда коэффициент согласованности

$$КС = ИС/ИР = 0,0203.$$

Таким образом, КС меньше 0,1, что говорит о хорошей согласованности оценок важности критериев, приведенных в табл. 3.

#### ПРИМЕР РАСЧЕТА РЕЙТИНГА ГРУЗООТПРАВИТЕЛЕЙ

Пусть компания  $A$  перевозит металлические конструкции с ежегодным объемом отгрузки 12,2 тыс. т. Известно, что между компанией  $A$  и перевозчиком имеется обоюдная история претензионной работы с последующей выплатой штрафных санкций без обращения в судебные инстанции. Среднее время согласования заявки ГУ-12 на выбранное направление 7 сут.

Компания  $B$  перевозит нефть и нефтепродукты с ежегодным объемом отгрузки 106 тыс. т. Претензионная работа проводилась по инициативе грузоотправителя. Среднее время согласования заявки ГУ-12 на выбранное направление 15 сут.

Компания  $C$  перевозит строительные грузы, ежегодный объем отгрузки 212 тыс. т, история претензионной работы отсутствует, а среднее время согласования заявки ГУ-12 на желаемое направление 20 сут.

Показатели компаний и итоговая оценка, рассчитанная по формуле (4), приведены в табл. 4.

Как видно из табл. 4, составленной с использованием предлагаемой методики, предпочтительным грузоотправителем является компания  $A$ , которая имеет незначительный объем отгрузки, но высокодоходный класс отгружаемого груза и направление перевозки, не относящееся к лимитирующим.

Отметим, что весовые коэффициенты важности критериев определены для внутренних железных дорог со значительным объемом отгрузки, не имеющих границ с иностранными железнодорожными администрациями. Для приграничных и транзитных железных дорог коэффициенты могут быть пересмотрены в соответствии со спецификой конкретного полигона.

#### ВЫВОДЫ

Разработана методика формирования индивидуального рейтинга грузоотправителя, внедрение которой позволит повысить эффективность использования перевозчиком ограниченных пропускных способностей с точки зрения коммерческой организации.

Расчет индивидуального рейтинга грузоотправителя может быть интегрирован в работу модели ДМЗИ при согласо-

Таблица 4

Расчет индивидуального рейтинга грузоотправителя

Грузоотправитель	Показатель				
	Тарифный класс отгружаемого груза ( $K_1$ )	История претензионной работы с грузоотправителем ( $K_2$ )	Объем отгружаемых грузов ( $K_3$ )	Желаемое направление грузоперевозки ( $K_4$ )	Итоговый рейтинг
Компания $A$	5	3	2	4	3,74
Компания $B$	4	3	3	2	3,3
Компания $C$	3	5	4	2	3,28

нии заявок ГУ-12 на перевозку грузов. Важно, что предлагаемая методика не нарушает положений Устава и Правил недискриминационного доступа и может быть использована как дополнительный инструмент.

Таким образом, в случаях, когда в одной очереди находятся несколько грузоотправителей, согласно Правилам недискриминационного доступа, перевозчик получает возможность

провести дополнительное ранжирование, учитывающее экономическую эффективность и лояльность грузоотправителей.

*Работа выполнена при финансовой поддержке из федерального бюджета в рамках госзаказа НИР «Моделирование и оптимизация функционального взаимодействия разнотранспортных систем на основе анализа больших данных».*

#### Сведения об авторах:

**Дмитрий Станиславович Завалишин**, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Мировая экономика и логистика» Уральского государственного университета путей сообщения, старший научный сотрудник отдела оптимального управления Института математики и механики им. Н. Н. Красовского Уральского отделения Российской академии наук

**Артём Дамирович Хазимуллин**, кандидат технических наук, начальник отдела по таможенной деятельности Свердловского территориального центра фирменного транспортного обслуживания — структурного подразделения центра фирменного транспортного обслуживания — филиала ОАО «РЖД»

**Галина Адольфовна Тимофеева**, доктор физико-математических наук, профессор, заведующая кафедрой «Естественнонаучные дисциплины» Уральского государственного университета путей сообщения, профессор учебно-научного центра «Информационная безопасность» Института радиоэлектроники и информационных технологий Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина

#### Authors information:

**Dmitriy S. Zavalishchin**, PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor of World Economy and Logistics Department, Ural State University of Railway Transport, Senior Researcher of Optimal Management Department of N. N. Krasovskii Institute of Mathematics and Mechanics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences

**Artem D. Khazimullin**, PhD in Engineering, Head of Customs Department, Sverdlovsk Territorial Center for Branded Transport Services — the structural division of the Center for Branded Transport Services — a branch of JSC «Russian Railways»

**Galina A. Timofeeva**, DSc in Physics and Mathematics, Professor, Head of Natural Science Department, Ural State University of Railway Transport, Professor of Scientific and Educational Center «Information Security» of Institute of Radioelectronics and Information Technologies, Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin

#### Литература

1. Апатцев В. И., Басыров И. М. Предложения по совершенствованию организации регулярного грузового движения на сети ОАО «РЖД» для повышения эффективности контейнерных перевозок // Наука и техника транспорта. 2024. № 2. С. 67–70. ISSN 2074-9325.
2. Козлов П. А., Колокольников В. С., Тушин Н. А. Моделирование международных транспортных коридоров // Транспорт Российской Федерации. 2023. № 1–2 (104–105). С. 32–37. ISSN 1994-831X.
3. Сирина Н. Ф., Герус В. Л. Формирование системы сбалансированных показателей как инструмента управления эффективностью транспортных бизнес-систем // Вестник УрГУПС. 2025. № 1 (65). С. 4–12. DOI: 10.20291/2079-0392-2025-1-4-12.
4. Числов О. Н., Мизгирева Е. Е. Принципы формирования комплексного критерия оценки структуры транспортного узла // Вестник РГУПС. 2024. № 1 (93). С. 122–131. DOI: 10.46973/0201-727X\_2024\_1\_122.
5. Лапидус Б. М., Мачерет Д. А., Рышков А. В. Методологические основы экономики товародвижения и перспективы сегментации транспортного рынка // Экономика железных дорог. 2020. № 5. С. 12–21. ISSN 1727-6500.
6. Определение влияния цифровых модулей на показатели работы железнодорожного транспорта методом экспертных оценок / Ж. Янев, С. А. Яговкин, И. Р. Гургенидзе [и др.] // Транспортное дело России. 2024. № 3. С. 234–238. ISSN 2072-8689.

#### References

1. Apattsev V. I., Basyrov I. M. Proposals for Organisational Development of Regular Freight Traffic on Russian Railway Network to Improve Efficiency of Container Transportation. *Science and Technology in Transport*. 2024. No. 2. Pp. 67–70. ISSN 2074-9325. (In Russian).
2. Kozlov P. A., Kolokolnikov V. S., Tushin N. A. Modeling of international transport corridors. *Transport of the Russian Federation*. 2023. No. 1–2 (104–105). Pp. 32–37. ISSN 1994-831X. (In Russian).
3. Sirina N. F., Gerus V. L. Formation for system of balanced indicators as a tool for managing efficiency of transport business systems. *Herald of the USURT*. 2025. № 1 (65). С. 4–12. DOI: 10.20291/2079-0392-2025-1-4-12. (In Russian).
4. Chislov O. N., Mizgireva E. E. Principles of forming a comprehensive criterion for evaluating the structure of transport hub. *Vestnik RGUPS*. 2024. No. 1 (93). Pp. 122–131. DOI: 10.46973/0201-727X\_2024\_1\_122. (In Russian).
5. Lapidus B. M., Macheret D. A., Ryshkov A. V. Methodological basis of the goods movement economy and prospects for effective segmentation of the transport market. *Railway Economy*. 2020. No. 5. Pp. 12–21. ISSN 1727-6500. (In Russian).
6. Yanev Zh., Yagovkin S. A., Gurgeniidze I. R. [et al.]. Determining the influence of digital modules on the performance indicators of railway transport by method of expert assessments. *Transport business of Russia*. 2024. No. 3. Pp. 234–238. ISSN 2072-8689. (In Russian).



7. Тимофеева Г. А., Хазимуллин А. Д. Выбор оптимальных управленческих решений железнодорожного перевозчика с использованием нечеткой логики // Вестник РГУПС. 2024. № 2 (94). С. 173–180. DOI: 10.46973/0201-727X\_2024\_2\_173.
8. Тимофеева Г. А., Хазимуллин А. Д. Вероятностное моделирование поведения грузоотправителей при оценке программ лояльности на железнодорожном транспорте // Транспорт Урала. 2023. № 4 (79). С. 34–40. DOI: 10.20291/1815-9400-2023-4-34-40.
9. Осминин А. Т., Кабанов А. В. Динамическая модель загрузки инфраструктуры ОАО «РЖД» // Железнодорожный транспорт. 2021. № 8. С. 10–19. ISSN 0044-4448.
10. Шапкин И. Н., Осминин А. Т. Цифровые технологии приходят на смену прежней идеологии управления перевозками // Инновационные технологии на железнодорожном транспорте : сборник трудов научно-практической конференции с международным участием. Москва, 20–21 октября 2021 г. Москва : Изд-во РУТ (МИИТ), 2022. С. 413–431.
11. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий. Москва : Радио и связь, 1993. 278 с.
12. Картвелишвили В. М., Лебедюк Э. А. Нечеткий метод анализа иерархий: критерии и практика // Вестник Российского государственного торгово-экономического университета (РГТЭУ). 2013. № 9–10 (79). С. 146–158. ISSN 1814-5361.
13. Баркалов С. А., Карпович М. А., Моисеев С. И. Метод анализа иерархий: подход, основанный на теории латентных переменных // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия : Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2022. Т. 22. № 2. С. 58–66. DOI: 10.14529/ctcr220205.
14. Осинцев Н. А. Многокритериальные методы принятия решений в «зеленой» логистике // Мир транспорта. 2021. Т. 19. № 5. С. 105–114. DOI: 10.30932/1992-3252-2021-19-5-13.
15. Цыганов А. В. Использование метода анализа иерархий в управлении качеством контейнерных перевозок // Надежность и качество сложных систем. 2019. № 2 (26). С. 121–129. DOI: 10.21685/2307-4205-2019-2-14.
7. Timofeeva G. A., Khazimullin A. D. Selecting optimal management decisions for a railway carrier using fuzzy logic. *Vestnik RGUPS*. 2024. No. 2 (94). Pp. 173–180. DOI: 10.46973/0201-727X\_2024\_2\_173. (In Russian).
8. Timofeeva G. A., Khazimullin A. D. Probabilistic modeling of shipper behavior when assessing loyalty programs on railway transport. *Transport of the Urals*. 2023. No. 4 (79). Pp. 34–40. DOI: 10.20291/1815-9400-2023-4-34-40. (In Russian).
9. Osminin A. T., Kabanov A. V. Dynamic model of loading infrastructure of JSC «Russian Railways». *Railway Transport*. 2021. No. 8. Pp. 10–19. ISSN 0044-4448. (In Russian).
10. Shapkin I. N., Osminin A. T. Digital technologies move to replace the previous ideology of transportation management. *Innovative technologies in railway transport: proceedings of scientific and practical conference with international participation, Moscow, October 20–21, 2021*. Moscow : Publishing House of RUT (MIIT), 2022. Pp. 413–431. (In Russian).
11. Saati T. Decision making. Analytic hierarchy process. Moscow : Radio and communications, 1993. 278 p. (In Russian).
12. Kartvelishvili V. M., Lebedyuk E. A. Fuzzy analytic hierarchy process: criteria and practice. *Vestnik RSTEU*. 2013. No. 9–10 (79). Pp. 146–158. ISSN 1814-5361. (In Russian).
13. Barkalov S. A., Karpovich M. A., Moiseev S. I. Analytic hierarchy process: An approach based on the theory of latent variables. *Bulletin of the South Ural State University. Ser.: Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2022. Vol. 22. No. 2. Pp. 58–66. DOI: 10.14529/ctcr220205. (In Russian).
14. Osintsev N. F. Multi-Criteria Decision-Making Methods in Green Logistics. *World of Transport and Transportation*. 2021. Vol. 19. No. 5. Pp. 105–114. DOI: 10.30932/1992-3252-2021-19-5-13. (In Russian).
15. Tsyganov A. V. Use of the analytic hierarchy process in quality management of piggyback transportations. *Reliability and Quality of Complex Systems*. 2019. No. 2 (26). Pp. 121–129. DOI: 10.21685/2307-4205-2019-2-14. (In Russian).

Научная статья

УДК 656.21

## Технология железнодорожных перевозок собственными локомотивами на примере перевозок железорудного сырья

Алексей Тимофеевич Попов<sup>1</sup>, Ольга Анатольевна Суслова<sup>1</sup>,  
Матвей Александрович Чехов<sup>1</sup>, Алексей Иванович Малахов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Липецкий государственный технический университет, Липецк, Россия

## Technology of railway transportation by own locomotives, on example of transportation of iron ore raw materials

Alexey T. Popov<sup>1</sup>, Olga A. Suslova<sup>1</sup>, Matvey A. Chekhov<sup>1</sup>, Alexey I. Malakhov<sup>1</sup>

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

### Аннотация

В статье представлены результаты исследования по оптимизации доставки железорудного сырья на металлургические комбинаты с использованием локомотивов, находящихся в собственности металлургического предприятия, вместо подвижного состава, принадлежащего ОАО «РЖД». Для снижения временных затрат на маневровые работы, проводимые на сортировочных станциях, предложено использовать вертушки — неделимые поездные формирования установленного веса и длины. Приведена формула срока окупаемости предлагаемой технологии без учета и с учетом дисконтирования для условий стабильной экономики и инфляции 8 %. Сделан вывод, что железнодорожные перевозки собственными локомотивами металлургического комбината целесообразны на незначительные расстояния и при большом количестве вагонов в одной вертушке.

**Ключевые слова:** магистральный транспорт, железорудное сырье, металлургический комбинат, парк собственных локомотивов, срок окупаемости

### Abstract

The article presents the results of a study on optimizing the delivery of iron ore raw materials to metallurgical plants using locomotives owned by a metallurgical enterprise instead of rolling stock owned by Russian Railways. In order to reduce the time spent on shunting operations carried out at marshalling yards, it is proposed to use indivisible train formations of a set weight and length, traveling without disbanding from the loading point to the unloading point and back in an empty state. The formula for the payback period of the proposed technology is given without taking into account and taking into account discounting for conditions of a stable economy and inflation of 8 %. It is concluded that the technology of railway transportation by the metallurgical plant's own locomotives is appropriate for short distances and a large number of cars in one indivisible train formation.

**Keywords:** mainline transport, iron ore raw materials, metallurgical plant, fleet of own locomotives, payback period

DOI: 10.20291/1815-9400-2025-4-68-73

### ВВЕДЕНИЕ

На российском рынке черных металлов многие предприятия, выпускающие чугун, полностью обеспечены железорудным сырьем (ЖРС). Это обусловлено тем, что все они располагают собственными железорудными активами и потому независимы в плане сырьевого обеспечения [1]. Кроме того, перевозки ЖРС от места добычи и обработки до территории металлургического комбината носят долгосрочный характер, что позволяет соблюдать темпы производства и в перспективе наращивать выпуск готовой продукции.

В России доля производства черных металлов составляет 7 % от мирового [2]. По производству стали, согласно данным за 2017 г., Российская Федерация занимала четвертое место (70 млн т/год) [3]. Эти показатели свидетельствуют, что черная металлургия является одной из ключевых отраслей в экономике страны. Более того, к 2030 г. ожидается существенное наращивание объемов производства чугуна. Рост будет обеспечен за счет совершенствования технологий производства стали и металлопроката. Ключевым фактором развития отрасли выступает увеличение потребления черных металлов отечественными компаниями [1]. Несомненно, при таких больших объемах производства требуется ритмичная и быстрая доставка железорудного сырья от места его добычи и обработки до территории металлургического комбината. Вместе с тем есть проблемы, которые не позволяют осуществлять это в полной мере, что приводит к нарушению темпов производства и снижению выпуска готовой продукции.

Обширные территории, сложные климатические условия и тесная интеграция транспортной системы России с промышленностью обуславливают ведущую роль всепогодных видов магистрального транспорта, в частности железнодорожного [4]. ОАО «РЖД» является крупнейшим работодателем в России, а его вклад в ВВП составляет 6,42 % [5]. Однако в настоящее время все чаще наблюдается отставание уровня развития магистрального железнодорожного транспорта от нарастающих с каждым годом мощностей производства в черной металлургии. Одна из наиболее острых проблем — нехватка



локомотивов на всей сети российских железных дорог. По этой причине многие поезда, сформированные на станциях отправления и прошедшие технический и коммерческий осмотр, не могут выполнить перевозку из-за отсутствия тяги, что приводит к дополнительным простоям и задержкам в поставках [6]. Кроме того, согласно данным ОАО «РЖД», в настоящее время средний возраст парка электровозов и тепловозов составляет 27 лет, на устаревших локомотивах возникают различные виды поломок, что требует проведения внеплановых ремонтов. Также эксплуатация возрастного локомотивного парка может привести к чрезвычайным происшествиям и на станциях, и на перегонах. В связи с этим обеспечение безопасности перевозок имеет большое значение, так как своевременная доставка напрямую влияет на производственную деятельность предприятия [7].

Цель исследования, представленного в публикуемой статье, — обеспечить строгое соблюдение темпов подачи ЖРС к металлургическим предприятиям путем исключения простоя локомотивов на станциях отправления из-за нехватки тяги. Предлагаемая авторами технология позволит высвободить принадлежащие внешней сети локомотивы, которые можно использовать в других перевозках.

В статье рассматривается модель для случаев, когда при перевозках ЖРС используются вагоны, принадлежащие металлургическому комбинату. Чтобы сократить время доставки и организовать более равномерный подход маршрутов с рудой к промышленно-транспортной системе (ПТС) предприятия, предлагается сформировать парк локомотивов, принадлежащих металлургическому комбинату. Кроме того, для снижения временных затрат на маневровые работы, проводимые на сортировочных станциях, целесообразно использовать вертушки — неделимые поездные формирования установленного веса и длины, следующие без расформирования и от пункта загрузки до пункта выгрузки, и обратно в порожнем состоянии [8]. Все это позволит решить перечисленные проблемы, но остается задача, связанная с рентабельностью предлагаемой технологии и сроками ее окупаемости. Рассмотрим ее.

### СРОК ОКУПАЕМОСТИ ПРЕДЛАГАЕМОЙ ТЕХНОЛОГИИ БЕЗ УЧЕТА ДИСКОНТИРОВАНИЯ

Прежде всего определим срок окупаемости без учета дисконтирования.

Участковый оборот локомотива [9]:

$$T_{\text{ОБ}}^y = \frac{2L}{v_y} + t_{\text{об}}, \quad (1)$$

где  $L$  — длина тягового плеча (маршрута доставки), км;  $v_y$  — средняя участковая скорость на тяговом плече, км/ч;  $t_{\text{об}}$  — время нахождения локомотива в обратном депо на территории металлургического комбината и на территории горнодобывающей компании, ч.

Коэффициент потребности [9]:

$$K = \frac{T_{\text{ОБ}}^y}{24}. \quad (2)$$

Эксплуатируемый парк с учетом запаса в 15 % [9]:

$$M = 1,15Kn, \quad (3)$$

где  $n$  — количество пар поездов в сутки.

Объединяя (1), (2) и (3), получаем

$$M = \frac{1,15 \cdot n \cdot \left( \frac{2L}{v_y} + t_{\text{об}} \right)}{24}. \quad (4)$$

Капитальные вложения рассчитаем по формуле

$$\Delta K = M \cdot Q_{\text{л}} = \frac{1,15 \cdot n \cdot Q_{\text{л}} \cdot \left( \frac{2L}{v_y} + t_{\text{об}} \right)}{24}, \quad (5)$$

где  $Q_{\text{л}}$  — стоимость одного локомотива, руб.

Годовые эксплуатационные расходы до внедрения проекта:

$$\Xi_1 = 365 \cdot n \cdot \Pi^{\text{РЖД}}, \quad (6)$$

где  $\Pi^{\text{РЖД}}$  — плата за доставку ЖРС и возврат порожних вагонов с использованием локомотива РЖД, руб.

$$\Pi^{\text{РЖД}} = \Pi_{\text{гр}}^{\text{РЖД}} + \Pi_{\text{пор}}^{\text{РЖД}}, \quad [10] \quad (7)$$

где  $\Pi_{\text{гр}}^{\text{РЖД}}$  и  $\Pi_{\text{пор}}^{\text{РЖД}}$  — соответственно плата за перевозку собственных (арендованных) вагонов с сырьем локомотивом РЖД и за возврат порожних собственных (арендованных) вагонов локомотивом РЖД, руб.

$$\Pi_{\text{гр}}^{\text{РЖД}} = \Pi_{\text{г}} \cdot m \cdot k_{\text{гр}} \cdot k_1 \cdot k_{\text{отпр}}, \quad (8)$$

где  $\Pi_{\text{г}}$  — тарифная ставка за перевозку одного универсального вагона в зависимости от расстояния перевозки (схема № 8), руб.;  $m$  — количество вагонов в вертушке;  $k_{\text{гр}}$  — дополнительный поправочный коэффициент, применяемый для определения платы за перевозку ряда грузов в зависимости от расстояния (табл. 1);  $k_1$  — дополнительный поправочный коэффициент, применяемый для определения платы за перевозку грузов первого тарифного класса;  $k_{\text{отпр}}$  — дополнительный поправочный коэффициент, применяемый для определения платы за перевозку отправительскими маршрутами [10].

Таблица 1

Дополнительные поправочные коэффициенты для ряда грузов

Наименование груза	Позиции и коды ЕТСНГ	Размер коэффициента
Руда железная и марганцевая	141, 142	0,95

$$P_{\text{пор}}^{\text{РЖД}} = P_{25} \cdot m \cdot k_{\text{отпр}}, \quad (9)$$

где  $P_{25}$  — тарифная ставка за перевозку одного порожнего универсального вагона в зависимости от расстояния перевозки (схема № 25), руб. [10].

Объединяя формулы (6)–(9), получаем

$$\Theta_1 = 365 \cdot n \cdot m \cdot k_{\text{отпр}} \cdot (P_8 \cdot k \cdot k_1 + P_{25}). \quad (10)$$

Годовые эксплуатационные расходы после внедрения проекта:

$$\Theta_2 = n \cdot 365 \cdot P^{\text{собс}} + 12 \cdot M \cdot 1,3 \cdot (4 \cdot Z_{\text{п}} + 5 \cdot Z_{\text{м}}), \quad (11)$$

где  $P^{\text{собс}}$  — плата за доставку ЖРС и возврат порожних вагонов с использованием собственных локомотивов, руб., определяется по табл. 2;  $Z_{\text{п}}$  — зарплата помощника машиниста, руб.;  $Z_{\text{м}}$  — зарплата машиниста, руб.

Таблица 2

Тарифные схемы, применяемые при определении платы за перевозку грузов отправлениями в составе поездного формирования, не принадлежащего перевозчику РЖД

Вид подвижного состава	Номер тарифных схем
Тепловозная тяга	
Тепловоз	110
Груженный вагон	111
Порожний вагон	112
Электрическая тяга	
Электровагон	113
Груженный вагон	114
Порожний вагон	115

Умножение зарплат на коэффициент 1,3 обусловлено обязанностью работодателя перечислять страховые взносы в размере 30 % от заработной платы сотрудников.

$$P^{\text{собс}} = (P_{\text{гр}}^{\text{собс}} + P_{\text{пор}}^{\text{собс}}) \cdot m + 2 \cdot P_{\text{лок}}^{\text{собс}}, \quad [10] \quad (12)$$

где  $P_{\text{гр}}^{\text{собс}}$  и  $P_{\text{пор}}^{\text{собс}}$  — тарифы за перевозку одного груженого и одного порожнего вагона, руб.;  $P_{\text{лок}}^{\text{собс}}$  — тариф за использование собственного локомотива, руб.

Для тепловозной тяги [10]:

$$P_{\text{гр}}^{\text{собс}} = P_{111} \cdot k_1; \quad (13)$$

$$P_{\text{пор}}^{\text{собс}} = P_{112} \cdot k_1. \quad (14)$$

Объединяя формулы (12)–(14), получаем плату за доставку ЖРС и возврат порожних вагонов с использованием собственных тепловозов:

$$P_{\text{т}}^{\text{собс}} = (P_{111} + P_{112}) \cdot m \cdot k_1 + 2 \cdot P_{110}. \quad (15)$$

Для электрической тяги [10]:

$$P_{\text{гр}}^{\text{собс}} = P_{114} \cdot k_1; \quad (16)$$

$$P_{\text{пор}}^{\text{собс}} = P_{115} \cdot k_1. \quad (17)$$

Объединяя формулы (12), (16) и (17), получаем плату за доставку ЖРС и возврат порожних вагонов с использованием собственных электровагонов:

$$P_{\text{э}}^{\text{собс}} = (P_{114} + P_{115}) \cdot m \cdot k_1 + 2 \cdot P_{113}. \quad (18)$$

Тогда годовые эксплуатационные расходы после внедрения проекта для тепловозной тяги составят

$$\Theta_2^{\text{т}} = ((P_{111} + P_{112}) \cdot m \cdot k_{\text{гр}} \cdot k_1 + 2 \cdot P_{110}) \cdot n \cdot 365 + 12 \cdot M \cdot 1,3 \cdot (4 \cdot Z_{\text{п}} + 5 \cdot Z_{\text{м}}) \quad (19)$$

Для электрической тяги:

$$\Theta_2^{\text{э}} = ((P_{114} + P_{115}) \cdot m \cdot k_1 + 2 \cdot P_{113}) \cdot n \cdot 365 + 12 \cdot M \cdot 1,3 \cdot (4 \cdot Z_{\text{п}} + 5 \cdot Z_{\text{м}}) \quad (20)$$

Простой метод расчета срока окупаемости проекта представляет собой упрощенную базовую методику, которая предназначена для оперативного определения и быстрого принятия решения о целесообразности инвестирования в бизнес. Рассчитывается как отношение капитальных вложений к разности ежегодных эксплуатационных расходов до и после внедрения [11]. Объединяя формулы (4), (5), (10), (19), получаем срок окупаемости без учета дисконтирования для тепловозной тяги:

$$t_{\text{ок}} = \frac{\Delta K}{\Theta_1 - \Theta_2}; \quad (21)$$

$$t_{\text{ок}} = \frac{1,15 \cdot Q_{\text{л}} \cdot \left( \frac{2L}{v_y} + t_{\text{об}} \right)}{24 \cdot (365 \cdot m \cdot k_{\text{отпр}} \cdot (P_8 \cdot k_1 + P_{25}) - \frac{1,15 \cdot Q_{\text{л}} \cdot \left( \frac{2L}{v_y} + t_{\text{об}} \right)}{-(P_{111} + P_{112}) \cdot m \cdot k_1 + 2 \cdot P_{110}} \times \frac{1,15 \cdot Q_{\text{л}} \cdot \left( \frac{2L}{v_y} + t_{\text{об}} \right)}{\times 365 - 0,5 \cdot 1,15 \cdot \left( \frac{2L}{v_y} + t_{\text{об}} \right) \cdot 1,3 \cdot (4 \cdot Z_{\text{п}} + 5 \cdot Z_{\text{м}})})} \quad (22)$$



Для электрической тяги:

$$t_{\text{ок}} = \frac{1,15 \cdot Q_{\text{л}} \cdot \left( \frac{2L}{v_y} + t_{\text{об}} \right)}{24 \cdot (365 \cdot m \cdot k_{\text{отпр}} \cdot (\Pi_8 \cdot k_1 + \Pi_{25}) - 1,15 \cdot Q_{\text{л}} \cdot \left( \frac{2L}{v_y} + t_{\text{об}} \right)) - ((\Pi_{114} + \Pi_{115}) \cdot m \cdot k_1 + 2 \cdot \Pi_{113}) \times 1,15 \cdot Q_{\text{л}} \cdot \left( \frac{2L}{v_y} + t_{\text{об}} \right)} \times 365 - 0,5 \cdot 1,15 \cdot \left( \frac{2L}{v_y} + t_{\text{об}} \right) \cdot 1,3 \cdot (4,3_{\text{п}} + 5 \cdot 3_{\text{м}})) \quad (23)$$

Как видно из формул (22) и (23), срок окупаемости не зависит от числа пар поездов, проезжаемых в сутки, а определяется лишь расстоянием перевозок и количеством вагонов в вертушке.

### ДИСКОНТИРОВАННЫЙ СРОК ОКУПАЕМОСТИ

Определим срок окупаемости с учетом дисконтирования.

Используем следующие показатели:

NPV (Net Present Value) — чистая приведенная стоимость;

DPP (Discounted Payback Period) — дисконтированный срок окупаемости;

$CF_t$  — денежный поток в  $t$  периоде [12],  $CF = \Xi_1 - \Xi_2$ ;

$\frac{1}{(1+r)^t}$  — коэффициент дисконтирования.

$DPP = \min(N)$ , при котором  $\sum_{t=1}^N \frac{CF_t}{(1+r)^t} > \Delta K$  [12].

Финансовые показатели проекта в  $t$  периоде приведены в табл. 3.

Получаем, что  $\Delta K - \frac{CF}{(1+r)^1} - \frac{CF}{(1+r)^2} - \dots - \frac{CF}{(1+r)^{DPP}} = 0$  — это чистая приведенная стоимость (NPV).

$$\Delta K - CF \cdot \left( \frac{1}{(1+r)^1} + \frac{1}{(1+r)^2} + \dots + \frac{1}{(1+r)^{DPP}} \right) = 0;$$

$$\Delta K - CF \cdot \frac{\frac{1}{1+r} \cdot \left( 1 - \frac{1}{1+r} \right)^{DPP}}{1 - \frac{1}{1+r}} = 0;$$

$$\Delta K - CF \cdot \frac{1 - \left( \frac{1}{1+r} \right)^{DPP}}{r} = 0;$$

$$\left( \frac{1}{1+r} \right)^{DPP} = 1 - \frac{\Delta K \cdot r}{CF};$$

$$DPP = \log_{\frac{1}{1+r}} \left( 1 - \frac{\Delta K \cdot r}{CF} \right).$$

Тогда дисконтированный срок окупаемости

$$DPP = \log_{\frac{1}{1+r}} (1 - t_{\text{ок}} \cdot r). \quad (24)$$

При расчетах принимается, что цена тепловоза составляет 200 млн руб., стоимость электровоза — 150 млн руб., участковая скорость равна 45 км/ч, суммарное время нахождения локомотива в оборотных депо 2 ч, зарплата помощника машиниста 75 тыс. руб., зарплата машиниста 100 тыс. руб. На основании расчетов в программе Microsoft Excel построены две поверхности, показывающие дисконтированный срок окупаемости при различных значениях  $L$  и  $m$  для тепловозной (рис. 1а) и электрической тяги (рис. 1б).

### ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕВОЗОК СОБСТВЕННЫМИ ЛОКОМОТИВАМИ

Анализ графиков, построенных с помощью математического моделирования в программе Microsoft Excel, показывает, что полученные поверхности имеют выпуклости и впадины.

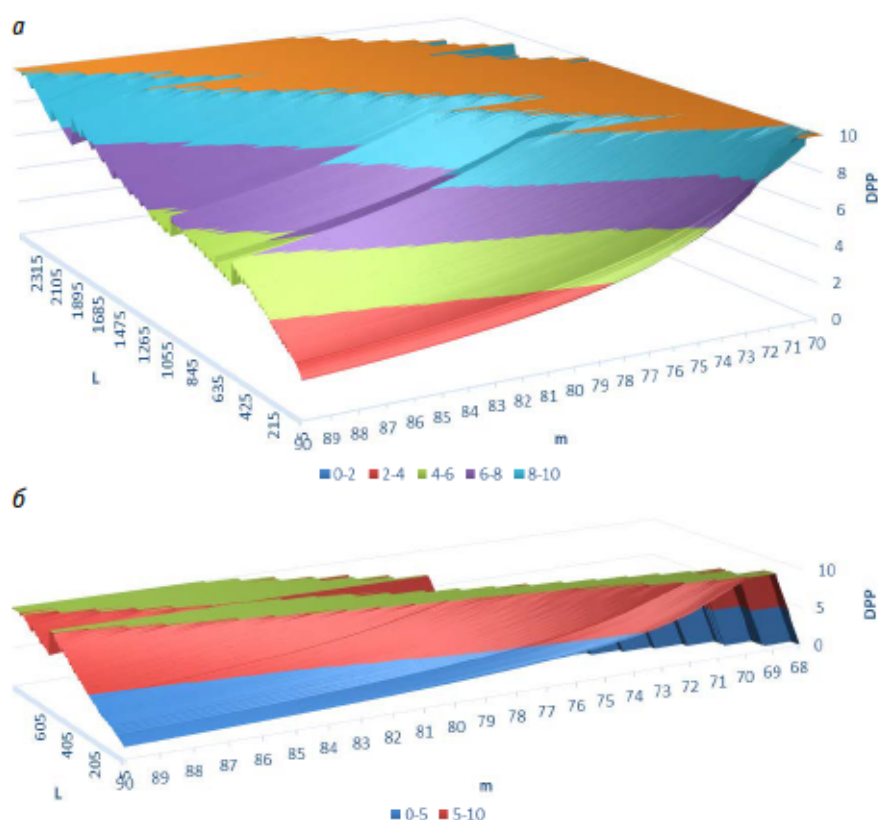
Таблица 3

Финансовые показатели проекта в  $t$  периоде

Показатель	0	1	2	...	DPP
Капитальные вложения	$\Delta K$	0	0	...	0
Денежный поток		CF	CF	...	CF
Коэффициент дисконтирования		$\frac{1}{(1+r)^1}$	$\frac{1}{(1+r)^2}$	...	$\frac{1}{(1+r)^{DPP}}$
Дисконтированный денежный поток		$\frac{CF}{(1+r)^1}$	$\frac{CF}{(1+r)^2}$	...	$\frac{CF}{(1+r)^{DPP}}$
Накопленное дисконтированное денежное сальдо		$\Delta K - \frac{CF}{(1+r)^1}$	$\Delta K - \frac{CF}{(1+r)^1} - \frac{CF}{(1+r)^2}$	...	$\Delta K - \frac{CF}{(1+r)^1} - \frac{CF}{(1+r)^2} - \dots - \frac{CF}{(1+r)^{DPP}}$

Это обусловлено сложной непрямой зависимостью тарифных ставок в Прейскуранте 10–01 от расстояния перевозки. Однако даже с учетом нелинейности графиков можно сделать вывод, что при перевозках до 300 км более окупаемой будет электровозная, а при перевозках от 300 км — тепловозная тяга. Кроме того, чем больше объем выполненной перевозочной работы, тем меньше удельный расход электроэнергии [13] и дизельного топлива [14], т.е. большее количество вагонов в одной вертушке позволяет сократить срок окупаемости. При рассмотрении конкретного участка доставки ЖРС необходимо выполнить тяговый расчет массы состава на каждом перегоне с учетом всех факторов, влияющих на движение поездов. Затем по полученным данным определить ограничивающий перегон и, наконец, по тяговому расчету массы состава на ограничивающем перегоне составить поезд полученной массы. В таком случае перевозочная работа будет максимальной, а срок окупаемости минимальным.

Поскольку промышленный транспорт и производство тесно связаны, это позволяет избежать лишних простоев вагонов, задержек в выпуске готовой продукции и т.п. [15]. При внедрении технологии перевозки собственными локомотивами появляется возможность связать магистральный транспорт с промышленным за счет введения жесткого графика следования маршрутов с ЖРС так, чтобы он совпадал с контактным графиком внутризаводских перевозок. Тогда все три компонента — магистральный транспорт, промышленный транспорт и производство — будут взаимосвязаны, следовательно, образуется единый технологический процесс работы металлургического комбината.



**Рис. 1. График зависимости дисконтированного срока окупаемости проекта от длины тягового плеча ( $L$ ) и количества вагонов в одной вертушке ( $m$ ):**  
а — для тепловозной, б — для электрической тяги

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, внедрение собственных локомотивов вместо локомотивов, принадлежащих внешней сети, в доставку ЖРС от места его добычи до металлургического комбината является целесообразным и рациональным при небольшой дальности перевозки и большом количестве вагонов в одной вертушке. Предлагаемый проект рассчитан на долгосрочную перспективу в условиях стабильной экономики и инфляции

в размере 8 % и имеет большое народнохозяйственное значение, так как при использовании комбинатом собственной тяги у РЖД высвобождаются дополнительные локомотивы, которые можно задействовать на других перевозках. Кроме того, применение рассмотренной технологии позволит сократить простои и вагонов металлургического комбината, и вагонов, находящихся в собственности РЖД и операторских компаний, вызванные ожиданием локомотива.

### Сведения об авторах:

**Алексей Тимофеевич Попов**, кандидат технических наук, профессор кафедры «Организация перевозок» Липецкого государственного технического университета

**Ольга Анатольевна Суслова**, кандидат технических наук, доцент, и.о. заведующего кафедрой «Организация перевозок» Липецкого государственного технического университета

**Матвей Александрович Чехов**, студент кафедры «Организация перевозок» Липецкого государственного технического университета

**Алексей Иванович Малахов**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Организация перевозок» Липецкого государственного технического университета

### Authors Information:

**Alexey T. Popov**, PhD in Engineering, Professor of Transportation Organization Department, Lipetsk State Technical University

**Olga A. Suslova**, PhD in Engineering, Associate Professor, Acting Head of Transportation Organization Department, Lipetsk State Technical University

**Matvey A. Chekhov**, student of Transportation Organization Department, Lipetsk State Technical University

**Alexey I. Malakhov**, PhD in Engineering, Associate Professor of Transportation Organization Department, Lipetsk State Technical University



## Литература

1. Авдеев Г. И. Российский рынок железорудного сырья // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2021. № 1-6 (175). С. 111–115. ISSN 0869-3188.
2. Состояние и тенденции развития российской металлургии / Е. И. Абалтусова, В. С. Лебедеко, П. В. Самсонова, А. В. Ткаченко // Modern Science. 2022. № 5-3. С. 14–21. ISSN 2414-9918.
3. Прогноз производства черных металлов на 2017–2020 гг. / А. А. Бродов, Н. Х. Мухатдинов, В. А. Углов, Т. П. Москвина // Проблемы черной металлургии и материаловедения. 2017. № 1. С. 5–9. ISSN 1997-9258.
4. Попов А. Т., Макарова Е. А. Потоковое взаимодействие промышленной транспортной системы и магистрального железнодорожного транспорта // Проблемы и перспективы студенческой науки. 2017. № 1 (1). С. 25–27. ISSN 2541-9579.
5. Пономарева Т. К., Фассакхов М. А. Железнодорожный транспорт России: состояние и перспективы развития // Вестник экономики и менеджмента. 2020. № 1. С. 29–34. ISSN 2500-0098.
6. Марочкин А. И., Жечкова А. В., Эрлих Н. В. Нерешенные проблемы на сети ОАО «РЖД» // Техника и технологии наземного транспорта : материалы IV Международной студенческой научно-практической конференции, Нижний Новгород, 14 декабря 2022 г. Нижний Новгород, 2022. С. 101–104.
7. Афанасьев В. С., Попов А. Т. Надежность работы железнодорожного транспорта // Современные проблемы транспортного комплекса России. 2012. Т. 2. № 1. С. 274–279. ISSN 2222-9396.
8. Эрлих Н. В. Собственное поездное формирование как эффективный способ организации перевозочного процесса на взаимовыгодной основе // Вестник транспорта Поволжья. 2018. № 5 (71). С. 60–67. ISSN 1997-0722.
9. Козлов П. А., Вакуленко С. П., Колокольников В. С. Оптимизация оборота локомотивов при заданных поездопотоках // Железнодорожный транспорт. 2016. № 10. С. 34–37. ISSN 0044-4448.
10. Попов А. Т., Малахов А. И. Оптимизация технологии работы операторской компании по перевозкам сырья металлургического производства : монография. Липецк : ЛГТУ, 2006. 165 с.
11. Гарбуз А. Б. Исследование методов расчета периода окупаемости проектов (оценка эффективности, дисконтированный срок окупаемости, срок окупаемости проектов) // Научный альманах Центрального Черноземья. 2022. № 2–3. С. 134–138. ISSN 2313-5581.
12. Управленческий учет / Э. А. Аткинсон, Р. Д. Банкер, Р. С. Каплан, М. С. Юнг. СПб. : Диалектика, 2019. 880 с.
13. Френкель С. Я., Янченко А. А., Комаринцев О. А. Моделирование расхода электроэнергии магистральными локомотивами // Проблемы безопасности на транспорте : материалы XI международной научно-практической конференции, Гомель, 25–26 ноября 2021 г. Ч. 1. Гомель : Изд-во БелГУТ, 2021. С. 176–177.
14. Шаповалов В. А. Моделирование расхода топлива грузовыми тепловозами // Беларусь в современном мире : материалы XV международной научной конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых, Гомель, 19–20 мая 2022 г. Гомель : Изд-во ГГТУ им. П. О. Сухого, 2022. С. 306–308.
15. Попов А. Т. Оптимизация взаимодействия технологического железнодорожного транспорта и производства (на примере металлургического комбината) : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва, 1984. 237 с.

## References

1. Avdeev G. I. Russian iron ore market. *Mineral Resources of Russia. Economics & Management*. 2021. No. 1-6 (175). Pp. 111–115. ISSN 0869-3188. (In Russian).
2. Abaltusova E. I., Lebedenko V. S., Samsonova P. V., Tkachenko A. V. The state and development trends of Russian metallurgy. *Modern Science*. 2022. No. 5-3. Pp. 14–21. ISSN 2414-9918. (In Russian).
3. Brodov A. A., Mukhatdinov N. Kh., Uglov V. A., Moskvina T. P. Forecast of ferrous metals production for 2017–2020 years. *Problems of ferrous metallurgy and materials science*. 2017. No. 1. Pp. 5–9. ISSN 1997-9258. (In Russian).
4. Popov A. T., Makarova E. A. Streaming interaction of industrial transport system and mainline railway transport. *Problems and prospects of student science*. 2017. No. 1 (1). Pp. 25–27. ISSN 2541-9579. (In Russian).
5. Ponomareva T. K., Fassakhov M. A. Russian railway transport: state and prospects of development. *Bulletin of Economics and Management*. 2020. No. 1. Pp. 29–34. ISSN 2500-0098. (In Russian).
6. Marochkin A. I., Zhechkova A. V., Erlich N. V. Unresolved problems on the Russian Railways network. *Land Transport Equipment and Technologies : proceedings of the 4th International scientific and practical conference of students, Nizhny Novgorod, December 14, 2022*. Nizhny Novgorod, 2022. Pp. 101–104. (In Russian).
7. Afanasyev V. S., Popov A. T. Reliability of railway transport. *Modern Problems of Russian Transport Complex*. 2012. Vol. 2. No. 1. Pp. 274–279. ISSN 2222-9396. (In Russian).
8. Erlich N. V. Own train formations as an effective way of organizing the transportation process on a mutually rewarding basis. *Bulletin of transport of the Volga region*. 2018. No. 5 (71). Pp. 60–67. ISSN 1997-0722. (In Russian).
9. Kozlov P. A., Vakulenko S. P., Kolokolnikov V. S. Optimization of locomotive turnover at specified train flows. *Railway Transport*. 2016. No. 10. Pp. 34–37. ISSN 0044-4448. (In Russian).
10. Popov A. T., Malakhov A. I. Optimization of the technology of the operator's company for the transportation of metallurgical raw materials : monograph. Lipetsk : LSTU, 2006. 165 p. (In Russian).
11. Garbuz A. B. Research of methods for calculating the payback period of projects (efficiency assessment, discounted payback period, payback period of projects). *Scientific Almanac of the Central Chernozem region*. 2022. No. 2–3. Pp. 134–138. ISSN 2313-5581. (In Russian).
12. Atkinson A. A., Banker R. D., Kaplan R. S., Young M. S. Managerial accounting. St. Petersburg : Dialectics, 2019. 880 p. (In Russian).
13. Frenkel S. Ya., Yanchenko A. A., Komarintsev O. A. Modeling of electricity consumption by mainline locomotives. *Problems of safety in transport : proceedings of the 11th International scientific and practical conference, Gomel, November 25–26, 2021. Part 1*. Gomel : Publishing House of BelSUT, 2021. Pp. 176–177. (In Russian).
14. Shapovalov V. A. Modeling of fuel consumption by freight locomotives. *Belarus in the modern world : proceedings of the 15th International scientific conference of students, undergraduates, postgraduates and young scientists, Gomel, May 19–20, 2022*. Gomel : Publishing House of Sukhoi State Technical University of Gomel, 2022. Pp. 306–308. (In Russian).
15. Popov A. T. Optimization of interaction between technological railway transport and production (on the example of a metallurgical combine) : PhD in Engineering Thesis. Moscow, 1984. 237 p. (In Russian).

Научная статья

УДК 656.2

## Многофакторность задач логистического оператора в логистической транспортной системе по обработке скоропортящихся грузов

Дмитрий Васильевич Ушаков<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Российский университет транспорта (МИИТ), Москва, Россия

## Multifactorial tasks of a logistics operator in a logistics transport system for handling perishable goods

Dmitriy V. Ushakov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia

### Аннотация

Наиболее характерными особенностями перевозок скоропортящихся грузов в логистических транспортных системах являются регламентированный диапазон температуры и фактор сезонности. Для каждого вида скоропортящегося груза крайне важно определить соответствующий тип изотермического состава с учетом всех особенностей конкретной перевозки. В статье представлены комплекс факторов, которые следует учитывать при выборе вида изотермического состава, и альтернативные варианты решений.

**Ключевые слова:** логистическая транспортная система, скоропортящийся груз, перевозка, изотермический подвижной состав, рефрижераторный контейнер

### Abstract

The most characteristic features of the transportation of perishable goods in logistics transport systems are the regulated temperature range and seasonality factor. For each type of perishable cargo, it is extremely important to determine the appropriate type of isothermal composition, taking into account all the features of a particular shipment. The article presents a set of factors that should be considered when choosing the type of isothermal composition, and alternative solutions.

**Keywords:** logistics transport system, perishable cargo, transportation, insulated rolling stock, refrigerated container

DOI: 10.20291/1815-9400-2025-4-74-78

Организация управления парком изотермических транспортных средств (ИТС) в логистических транспортных системах, ориентированных на обработку скоропортящихся грузов, является ключевой задачей транспортных компаний, осуществляющих свою деятельность в сфере перевозок рефрижераторной продукции. От того, насколько успешно решается эта задача, будут зависеть уровень конкурентоспособности компании на соответствующих рынках и, следовательно, степень востребованности в услугах предприятия.

В течение всего года логистический оператор, работающий на рынке перевозок скоропортящихся грузов, сталкивается с необходимостью поиска оптимальных решений, касающихся выбора видов изотермического состава, их количества, а также своевременного предоставления ИТС в места погрузки в соответствии с динамикой изменения грузовой базы в регионах формирования (производства) скоропортящейся продукции.

Специфика отечественной логистической инфраструктуры железнодорожного транспорта такова, что наиболее благоприятные пункты для загрузки скоропортящейся продукции находятся на расстоянии 9,5 тыс. км друг от друга, это крайние точки Транссибирской железнодорожной магистрали — Москва и Владивосток. Предоставление соответствующего ИТС под погрузку в один из вышеуказанных пунктов вовремя, т.е., с одной стороны, без задержек, а с другой — без дорогостоящих простоев ИТС в ожидании погрузки, относится к числу ключевых задач логистического оператора на рынке перевозок скоропортящихся грузов.

Различные диапазоны регламентируемых температурных режимов для перевозки скоропортящихся грузов [1] служат определяющим фактором при выборе соответствующих типов ИТС для конкретного вида скоропортящейся продукции (табл. 1).

Нормы законодательных актов, регулирующие права и обязанности участников перевозочного процесса скоропортящихся грузов в современной трактовке возлагают ответственность за выбор изотермического транспортного средства на грузополучателя. Так, согласно «Правилам перевозок железнодорожным транспортом скоропортящихся грузов», «грузоотправитель с учетом требований технических регламентов на отдельные виды пищевой продукции, документов по стандарти-



Таблица 1

Температурные режимы для перевозки некоторых скоропортящихся грузов

Группа грузов	Наименование груза	Температурный режим перевозки, °С
Продукты растительного происхождения	Фрукты, ягоды, овощи, грибы	От 0 до +1 (для отдельных видов до +15)
	Тропические и субтропические плоды	От +2 до +4
Продукты животного происхождения	Охлажденные мясо животных и птиц, рыба	От -1 до 0
	Молоко	От +2 до +6
	Яйца	От 0 до +3
	Замороженные грузы	Не выше -12
Продукты переработки	Молочные продукты	От 0 до +8
	Колбасные изделия копченые и полукопченые	От -3 до 0
	Колбасные изделия вареные	От 0 до +6
	Жиры различные	От -3 до 0
	Замороженные продукты	Не выше -18
Живые растения	Цветы, саженцы, зелень	От +1 до +8

зации, устанавливающих требования к перевозке, хранению и сроку годности груза, самостоятельно выбирает режим перевозки груза, а также вагон (контейнер) для перевозки» [2].

Одна из задач, которую надо решить логистическому оператору, — выбрать вид изотермического подвижного состава в зависимости от расстояния перевозки (рис. 1). Очевидно, что чем меньше расстояние, тем меньше вероятность наступления угрозы нанести ущерб качеству перевозимого скоропортящегося груза [3].



Рис. 1. Факторы влияния на выбор вида изотермического подвижного состава в зависимости от расстояния перевозки: РК — рефрижераторный контейнер; РВ — вагон рефрижераторной секции; ТК — термос-контейнер; ВТ — вагон-термос

Вместе с тем для целого ряда скоропортящихся грузов в определенный период года даже при перевозке на относительно небольшое расстояние в несколько сот километров необходим высокотехнологичный вид изотермического подвижного состава — рефрижераторный контейнер.

В частности, при транспортировке мороженой рыбопродукции в летние месяцы даже незначительное отклонение температуры от заданной (например, от -18 °С до -12 °С) может привести к необратимой порче перевозимого груза. И хотя на последующих этапах доставки могут быть созданы идеальные условия для хранения (-18 °С и ниже), из-за особенностей протекания физико-химических процессов в толще рыбы избежать влияния негативных последствий на уровень качества перевозимого груза невозможно.

С другой стороны, нет необходимости использовать высокоэнергетический рефрижераторный контейнер при перевозке, например, яблок, температура хранения которых в среднем (в зависимости от сорта) составляет от 0 до +6 °С, на небольшие и средние расстояния весной или осенью, когда температура окружающей среды соответствует диапазону, требуемому для перевозки скоропортящегося груза.

Таким образом, изотермическое транспортное средство (ИТС<sub>г</sub>) можно использовать в соответствии с определенным расстоянием доставки, соответствующим диапазону температур и сезону времени года:

$$\text{ИТС}_g \in TR_g(S_{ni}; TC_{t_{1i}-t_{2i}}^{\circ}; Y_{d_{1i}-d_{2i}}), \quad (1)$$

где  $TR_g$  — перевозка скоропортящегося груза;  $S_{ni}$  — расстояние перевозки;  $TC_{t_{1i}-t_{2i}}^{\circ}$  — диапазон температур, требуемый для перевозки груза;  $Y_{d_{1i}-d_{2i}}$  — сезон времени года (порядковый номер дня в году как начало сезона).

Соответственно для рефрижераторного контейнера

$$RK \in TR_{rk}(S_{\max}; TC_{-25...+25}^{\circ}; Y_{1-365}). \quad (2)$$

В формуле (2) диапазон температур, требуемый для перевозки груза, обозначен от -25 °С до +25 °С. Он характерен для всех моделей современных рефрижераторных контейнеров

и охватывает практически все регламентируемые диапазоны для всех видов скоропортящихся грузов. То есть в рефрижераторном контейнере можно перевозить любые скоропортящиеся грузы на любые расстояния в любое время года [4].

Безусловно, логистический оператор должен учитывать в процессе эксплуатации парка ИТС и фактор обратной загрузки. Приемлемый уровень рентабельности в процессе эксплуатации парка ИТС может быть достигнут при минимизации порожних пробегов или (в идеальном случае) при их исключении [5].

Одной из наиболее существенных особенностей перевозки скоропортящихся грузов является то, что в подавляющем большинстве случаев при порче перевозимого груза приходит в негодность весь груз, находящийся в грузовом помещении транспортного средства. Причем стоимость перевозимых скоропортящихся грузов может быть достаточно высокой. К такого рода грузам относятся, например, икра лососевых и осетровых рыб, отдельные виды морепродуктов и экзотических фруктов. Во избежание отклонения температуры в процессе транспортировки дорогостоящей скоропортящейся продукции логистический оператор может выбрать более энергозатратный вид подвижного состава, но гарантирующий устойчивость требуемого температурного режима в процессе доставки [6] (рис. 2).

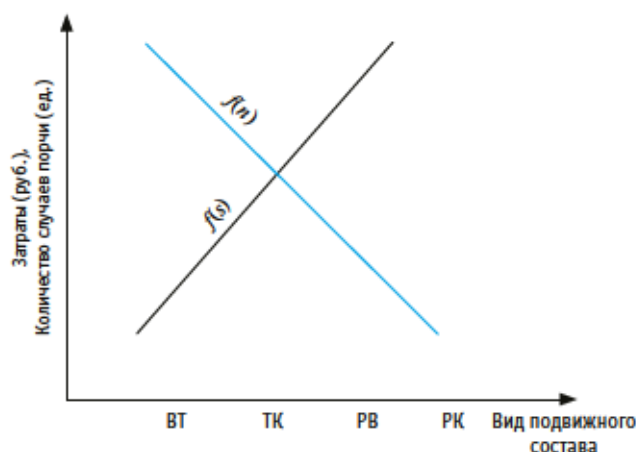


Рис. 2. Зависимости вида изотермического подвижного состава от эксплуатационных затрат и количества случаев порчи груза при транспортировке:

$f(s)$  — величина эксплуатационных затрат изотермического транспортного средства;  
 $f(n)$  — количество случаев порчи груза при транспортировке

Величина эксплуатационных затрат изотермических транспортных средств существенно зависит от наличия встроенной рефрижераторной установки (рефрижераторный контейнер и вагон рефрижераторной секции) или от ее отсутствия (вагон-термос и термос-контейнер). Как следствие, эксплуатационное обслуживание рефрижераторной установки предполагает расход дизельного топлива ( $S_b$ ) и оплату сопровождающим рефрижераторным механикам ( $S_o$ ). Кроме того, эксплуатационные затраты изотермических транспортных средств включают издержки при начально-конечных операциях на железнодорожных станциях отправления и назначения ( $S_s$ ) [7]. Таким образом, можно записать следующее выражение.

$$f(s) = \{S_b; S_o; S_s\}. \quad (3)$$

К основным причинам, влияющим на количество случаев порчи перевозимого скоропортящегося груза, относятся: наличие (или отсутствие) встроенной рефрижераторной установки ( $D_{ref}$ ), обеспечивающей постоянную подачу воздушной смеси в грузовое помещение ИТС; способность корпуса ИТС удерживать требуемую температуру внутри грузового помещения, которая обеспечивается прежде всего уровнем коэффициента теплопередачи корпуса ИТС ( $D_k$ ); человеческий фактор или компетентность рефрижераторных механиков, сопровождающих ИТС в пути следования ( $D_m$ ), т.е.:

$$f(n) = \{D_{ref}; D_s; D_m\}, \quad (4)$$

Фактором, во многом определяющим рентабельность эксплуатации парка ИТС, является рациональное использование его качественного и количественного состава в соответствии с сезонными изменениями объемов скоропортящихся грузов, предназначенных к отправке в регионы назначения. Несмотря на многолетние наблюдения и анализ рынков производства скоропортящейся продукции (сбор урожая, промысел морепродуктов и т. д.), ежегодно целый комплекс факторов вносит определенные коррективы в соответствующие процессы производства продовольственной продукции. Как следствие, общий объем скоропортящихся грузов, готовых к отгрузке, а также время начала, пика и окончания сезона производства того или иного скоропортящегося продукта могут существенно отличаться от планируемых показателей [8, 9].

Крайне нежелательна ситуация, когда совокупная величина грузоподъемности парка ИТС, предоставляемого логистическим оператором в регион отгрузки скоропортящейся продукции, существенно меньше, чем общий объем грузов, предлагаемых к отгрузке грузовладельцами (рис. 3).

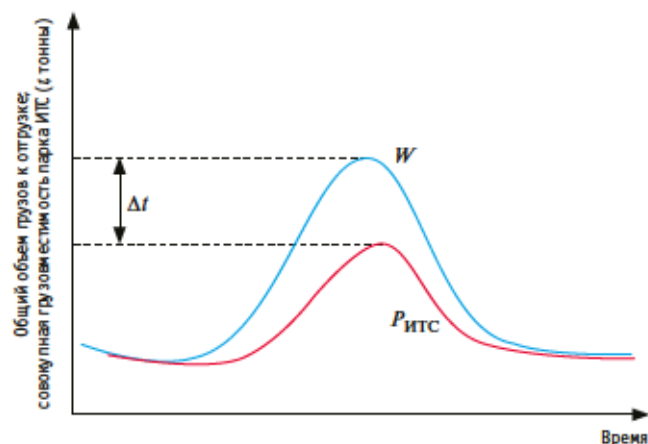


Рис. 3. Соотношение общего объема грузов к отгрузке и совокупной грузоподъемности парка ИТС в ситуации, когда совокупная величина грузоподъемности парка ИТС существенно меньше, чем общий объем грузов, предлагаемых к отгрузке:

$W$  — общий объем грузов к отгрузке;  $P_{ИТС}$  — совокупная грузоподъемность парка ИТС;  $\Delta t$  — объем неотгруженных грузов из-за недостатка тоннажа у логистического оператора



Таким образом, упущенную выгоду логистического оператора из-за несоответствия совокупной грузоподъемности парка ИТС и общего объема скоропортящихся грузов к отгрузке в регионе, можно рассчитать по выражению

$$УВ = (W - P_{ИТС})TR_m = \Delta t \cdot TR_m \quad (5)$$

где  $УВ$  — упущенная выгода, руб.;  $W$  — общий объем скоропортящихся грузов к отгрузке в регионе, т;  $P_{ИТС}$  — совокупная грузоподъемность парка ИТС, предоставляемого к отгрузке, т;  $\Delta t$  — объем неотгруженных грузов вследствие недостатка тоннажа у логистического оператора, т;  $TR_m$  — среднерыночная ставка тарифа на перевозку скоропортящегося груза из региона отгрузки к региону доставки, руб./т.

Кроме того, для логистического оператора важно предоставление подвижного состава вовремя, т.е. в соответствии с динамикой изменения объемов скоропортящихся грузов во время сезона (рис. 4).

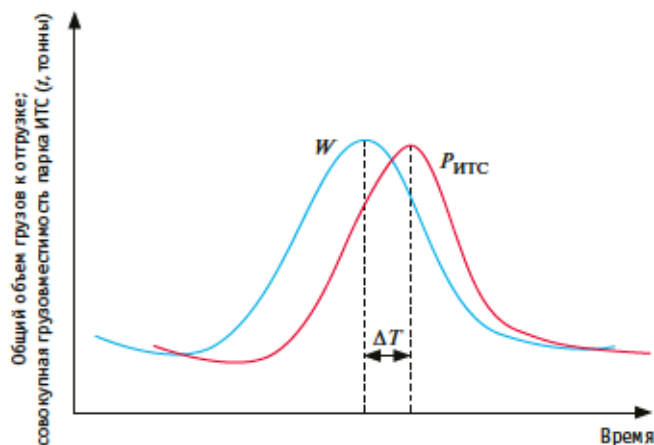


Рис. 4. Сопоставление динамики предоставления парка ИТС логистическим оператором с динамикой изменения объемов скоропортящихся грузов во время сезона:

$W$  — общий объем грузов к отгрузке;  $P_{ИТС}$  — совокупная грузоподъемность парка ИТС;  $\Delta t$  — время запаздывания предоставления подвижного состава парка ИТС под погрузку по отношению к динамике изменения объемов скоропортящихся грузов во время сезона

#### Сведения об авторе:

Дмитрий Васильевич Ушаков, кандидат экономических наук, доцент кафедры «Логистика и управление транспортными системами» Российского университета транспорта (МИИТ)

Значительная задержка предоставления подвижного состава парка ИТС под погрузку по отношению к динамике изменения объемов скоропортящихся грузов во время сезона ( $\Delta t$ ) может привести к следующим негативным последствиям: простоя подвижного состава в ожидании незапланированной погрузки в случае ее возможности; порожнему пробегу в направлении региона новой загрузки при отсутствии возможности незапланированной погрузки; существенному ущербу репутации логистической компании, связанному с непредоставлением ИТС в срок.

Таким образом, можно сформировать критериальный параметрический модуль, характеризующий многофакторность задач при выборе количественного и качественного состава ИТС:

$$ИТС = \left\{ \begin{matrix} t^{\circ}C \\ T \\ S \\ Y \\ RL \\ P \\ Ss \end{matrix} \right\}, \quad (6)$$

где  $t^{\circ}C$  — температурный режим;  $T$  — количество тонн к отгрузке;  $S$  — расстояние перевозки;  $Y$  — время года;  $RL$  — обратная загрузка;  $P$  — стоимость груза;  $Ss$  — период сезона перевозки скоропортящегося груза.

В заключение можно сделать следующий вывод. Существенное влияние фактора сезонности на функционирование логистической транспортной системы, ориентированной на обработку скоропортящейся продукции, предопределяет исключительную значимость правильного и оперативного принятия решения логистическим оператором об относительности качественного и количественного состава парка изотермических транспортных средств в соответствии с сезонными изменениями [10]. Критериальный параметрический модуль, характеризующий многофакторность задач логистического оператора на рынке перевозок скоропортящихся грузов, может стать эффективным инструментом для решения вопросов подобного рода.

#### Author's Information:

Dmitriy V. Ushakov, PhD in Economics, Associate Professor of Logistics and Management of Transport Systems Department, Russian University of Transport (MIIT)

#### Литература

1. Яровая М. В., Шевырев Л. Ю. Особенности транспортировки скоропортящихся грузов // Тенденции развития науки и образования. 2020. № 64-1. С. 64–67. DOI: 10.18411/lj-08-2020-11.
2. Правила перевозок железнодорожным транспортом скоропортящихся грузов : утв. приказом Министерства транспорта Российской Федерации от 04.03.2019 г. № 66. URL: <https://docs.cntd.ru/document/553937031?ysclid=L3oafxxr40>.

#### References

1. Yarova M. V., Shevirev L. Yu. Features of transportation of perishable goods. *Trends in the development of science and education*. 2020. No. 64-1. Pp. 64–67. DOI: 10.18411/lj-08-2020-11. (In Russian).
2. Rules for transportation of perishable goods by railways : approved by the Order of the Ministry of Transport of the Russian

3. Черняева К. Н., Сивакс А. Н. Проблема контроля качества во время перевозки скоропортящихся грузов // Проблемы развития предприятий: теория и практика. 2018. № 2. С. 182–188.
4. Бондаренко М. Рефрижераторные контейнеры как определяющий фактор построения цепи поставок скоропортящихся грузов // Инновационные технологии на железнодорожном транспорте : труды XXVI Всероссийской научно-практической конференции, Красноярск, 3 ноября 2022 г. Красноярск, 2022. С. 100–106.
5. Кобозева Н. Г., Петренко В. Ю. Маркетинговые и операционные проблемы развития рынка перевозок скоропортящихся грузов в Российской Федерации // Экономика устойчивого развития. 2023. № 4 (56). С. 121–123. ISSN 2079-9136.
6. Журавлева И. В. Контроль холодильной цепи при перевозке скоропортящихся грузов // Транспорт: наука, образование, производство («Транспорт-2023») : сборник статей Международной научно-практической конференции, Воронеж, 26–28 апреля 2023 г. Воронеж, 2023. С. 49–53.
7. Нижегородова А. М., Юрышева Д. Д., Власова Н. В. Сравнительный анализ перевозки скоропортящихся грузов железнодорожным и автомобильным транспортом // Молодежь и XXI век — 2022 : сборник трудов конференции, Курск, 17–18 февраля 2022 г. Курск, 2022. С. 142–145.
8. Гришкова Д. Ю., Тесленко И. О. Логистические схемы доставки скоропортящихся грузов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2022. № 2 (74). С. 121–129. DOI: 10.26731/1813-9108.2022.2(74).121-129.
9. Мачерет Д. А., Разуваев А. Д., Ледней А. Ю. Экономическая оценка сезонной неравномерности загрузки железнодорожной инфраструктуры // Мир транспорта. 2020. Т. 18. № 1 (86). С. 94–115. DOI: 10.30932/1992-3252-2020-18-94-115.
10. Полякова Я. Р., Росторгуева А. А. Характеристика процесса транспортировки скоропортящихся грузов в контейнерах и их мировых грузопотоков // Вестник государственного морского университета имени адмирала Ф. Ф. Ушакова. 2002. № 2 (39). С. 67–72. ISSN 2307-2210.
3. Chernyaeva Kh. N., Sivaks A. N. The problem of quality control during the transportation of perishable goods. *Problems of enterprise development: theory and practice*. 2018. No. 2. Pp. 182–188. (In Russian).
4. Bondarenko M. Refrigerated containers as a determining factor in building a perishable cargo supply chain. *Innovative technologies in railway transport : proceedings of the 26th International scientific and practical conference*, Krasnoyarsk, November 3, 2022. Krasnoyarsk, 2022. Pp. 100–106. (In Russian).
5. Kobozeva N. G., Petrenko V. Yu. Marketing and operational problems of development of the market for transportation of perishable goods in the Russian Federation. *Economics of Sustainable Development*. 2023. No. 4 (56). Pp. 121–123. ISSN 2079-9136. (In Russian).
6. Zhuravleva I. V. Control of the refrigeration chain during transportation of perishable goods. *Transport: science, education, production («Transport-2023»)* : proceedings of the International scientific and practical conference, Voronezh, April 26–28, 2023. Voronezh, 2023. Pp. 49–53. (In Russian).
7. Nizhegorodova A. M., Yuryшева D. D., Vlasova N. V. Comparative analysis for transportation of perishable goods by railway and road transport. *Youth and the 21st century — 2022 : proceedings of conference*, Kursk, February 17–18, 2022. Kursk, 2022. Pp. 142–145. (In Russian).
8. Grishkova D. Yu., Teslenko I. O. Logistics schemes for the delivery of perishable goods. *Modern Technologies. System Analysis. Modeling*. 2022. No. 2 (74). Pp. 121–129. DOI: 10.26731/1813-9108.2022.2(74).121-129. (In Russian).
9. Macheret D. A., Razuvaev A. D., Ledney A. Yu. Economic assessment of seasonal unevenness in railway infrastructure loading. *World of Transport and Transportation*. 2020. Vol. 18. No. 1 (86). Pp. 94–115. DOI: 10.30932/1992-3252-2020-18-94-115. (In Russian).
10. Polyakova Ya. R., Rostorgueva A. A. Characteristics of the process of transportation of perishable goods in containers and their world cargo flows. *Bulletin of State Maritime University named after Admiral F. F. Ushakov*. 2002. No. 2 (39). Pp. 67–72. ISSN 2307-2210. (In Russian).



Научная статья

УДК 656.1

## Оценка параметров модели Андервуда с использованием данных радиолокационного детектора транспорта

Игорь Игоревич Тараховский<sup>1</sup>, Александр Юрьевич Михайлов<sup>2</sup><sup>1</sup>ООО «КВАНТ Инжиниринг», Иркутск, Россия<sup>2</sup>Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

## Assessing the parameters of the Underwood model using transport radar data

Igor I. Tarakhovskiy<sup>1</sup>, Alexander Yu. Mikhailov<sup>2</sup><sup>1</sup>KVANT Engineering LLC, Irkutsk, Russia<sup>2</sup>Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

### Аннотация

В статье рассмотрены возможности оценки параметров макроскопической модели транспортного потока на основе эмпирических данных, источником которых является радиолокационный стационарный детектор транспорта. В результате статистического анализа данных установлено, что на горизонтальном участке двухполосной дороги зависимость «скорость — плотность» может быть представлена в виде модели Андервуда. Экспериментально определены значения скорости движения в свободных условиях и критической плотности транспортного потока, при которой достигается максимальная интенсивность движения. На основе этих параметров рассчитаны значения критической скорости и пропускной способности. Представленный в статье метод обработки данных предлагается использовать при выполнении мониторинга дорожного движения, в том числе для оценки уровня обслуживания транспортных потоков.

**Ключевые слова:** радиолокационный детектор, основная диаграмма транспортного потока, модель Андервуда, скорость в свободных условиях, критическая плотность

### Abstract

This article examines the potential for estimating the parameters of a macroscopic traffic flow model based on empirical data from a stationary radar traffic detector. Statistical analysis of the data revealed that the speed-density relationship on a horizontal section of a two-lane road can be represented using the Underwood model. The free flow traffic speed and the critical traffic density at which maximum traffic volume is achieved were experimentally determined. These parameters are used to determine the critical speed and capacity. The data processing method presented in this article is proposed for use in traffic monitoring, including for assessing the level of service of traffic flows.

**Keywords:** radar detector, basic traffic flow diagram, Underwood model, free-flow speed, critical density

DOI: 10.20291/1815-9400-2025-4-79-84

### ВВЕДЕНИЕ

Распоряжение Минтранса России от 27.12.2022 г. № АК-337-Р «Об утверждении методических рекомендаций по проведению мониторинга дорожного движения» [1] предусматривает оценку характеристик дорожного движения с использованием навигационных систем (GPS и ГЛОНАСС) и детекторов транспорта. В документе подробно рассмотрено применение контрольных транспортных средств, имеющих оборудование GPS и ГЛОНАСС, для основных параметров дорожного движения, вместе с тем особенности использования детекторов транспорта не раскрыты.

Транспортные детекторы являются источником массовых данных, поступающих в режиме реального времени. Эти данные могут применяться для оперативного управления дорожным движением, а также для получения зависимостей и значений параметров, характеризующих состояние транспортного потока.

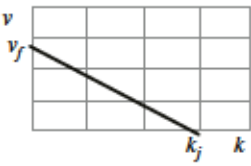
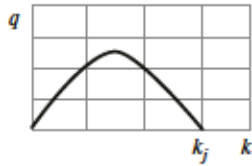
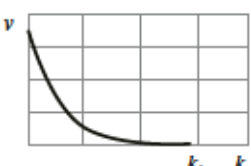
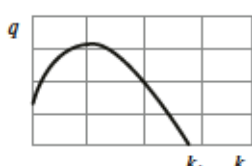
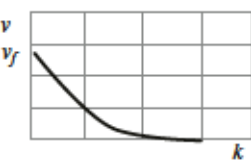
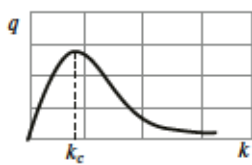
Количество используемых в России индукционных, видео- и радиолокационных детекторов непрерывно растет. Например, в Иркутске и на подходах к нему радиолокационными и видеодетекторами оборудовано 40 участков улично-дорожной сети. Поэтому ООО «КВАНТ Инжиниринг» и Иркутский национальный исследовательский технический университет начали исследования, цель которых — разработка практических рекомендаций по обработке и анализу данных мониторинга дорожного движения, полученных с радиолокационных и видеодетекторов. Так как режимы движения на двухполосных дорогах имеют свою специфику и рассматриваются как отдельный объект [2], одной из задач исследований было получение уравнений макроскопической диаграммы транспортных потоков и их параметров для дорог II технической категории (Иркутск — Качуг, Култукский тракт), являющихся важнейшими подходами к Иркутску.

### ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДА ОЦЕНКИ ПЛОТНОСТИ ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКА

Особенность мониторинга с использованием стационарных радиолокационных детекторов (радаров) и видеодетекторов заключается в том, что в каждый заданный период времени (т.е. в период агрегации) детектором определяются три показателя:

Таблица 1

Модели Гриншильдса, Гринберга и Андервуда

Модель	Уравнение «скорость — плотность»	Зависимости «скорость — плотность», «интенсивность — плотность»		Параметры модели
Гриншильдса (Greenshields Model)	$v = v_f \left(1 - \frac{k}{k_j}\right)$			$v_f, k_j$
Гринберга (Greenberg Model)	$v = v_c \ln \left(\frac{k}{k_j}\right)$			$v_c, k_j$
Андервуда (Underwood Model)	$v = v_f \exp \left(-\frac{k}{k_c}\right)$			$v_f, k_c$

количество проехавших транспортных средств  $n$ ;

интенсивность движения  $q$ , авт/ч;

средняя (т.е. агрегированная) временная скорость потока  $\bar{v}_t$ , км/ч.

Для определения уравнений макроскопической диаграммы и параметров уравнений используется зависимость «скорость — плотность». Поэтому многие специалисты изучали возможность получения значений пространственной скорости по значениям средней временной скорости, поступающим со стационарных детекторов [3–5]. Так, Д. Уодроп (Wardrop J.) [3] установил, что средняя временная скорость  $\bar{v}_t$  является смещенной оценкой средней пространственной скорости  $\bar{v}_s$ :

$$\bar{v}_t = \bar{v}_s + \sigma_s^2 / \bar{v}_s, \quad (1)$$

где  $\sigma_s^2$  — дисперсия средней пространственной скорости  $\bar{v}_s$ .

По данным Д. Уодропа, разность значений  $\bar{v}_t$  и  $\bar{v}_s$  составляла 11 %, согласно результатам более поздних исследований [4, 5], расхождение значительно меньше — 5 %.

Поскольку детекторы получили широкое применение, на практике для определения плотности потока используют отношение интенсивности к скорости  $k = q/v$ . Принимая во внимание свойство (1), некоторые авторы предлагают в случае применения стационарных детекторов использовать термин «квазиплотность» [6]. С учетом сложившейся практики при использовании радиолокационных или видеодетекторов рекомендуется оценивать плотность потока для каждого периода агрегации данных как отношение

$$k = q / \bar{v}_t. \quad (2)$$

На этом этапе исследований рассмотрены данные, поступающие с детектора, установленного на горизонтальном участке (СНТ «Мечта») II технической категории Иркутск — Усть-Ордынский. Продолжительность периода агрегации принята 5 мин.

### ВЫБОР УРАВНЕНИЯ МАКРОСКОПИЧЕСКОЙ ДИАГРАММЫ ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКА

За несколько десятилетий исследований было предложено более десятка макроскопических моделей диаграммы транспортного потока [7–10]. Анализ литературных источников показывает, что для определения параметров макроскопической диаграммы транспортного потока чаще всего используются три модели, представленные в табл. 1 и классифицируемые как однорежимные [8]. Их параметрами являются:

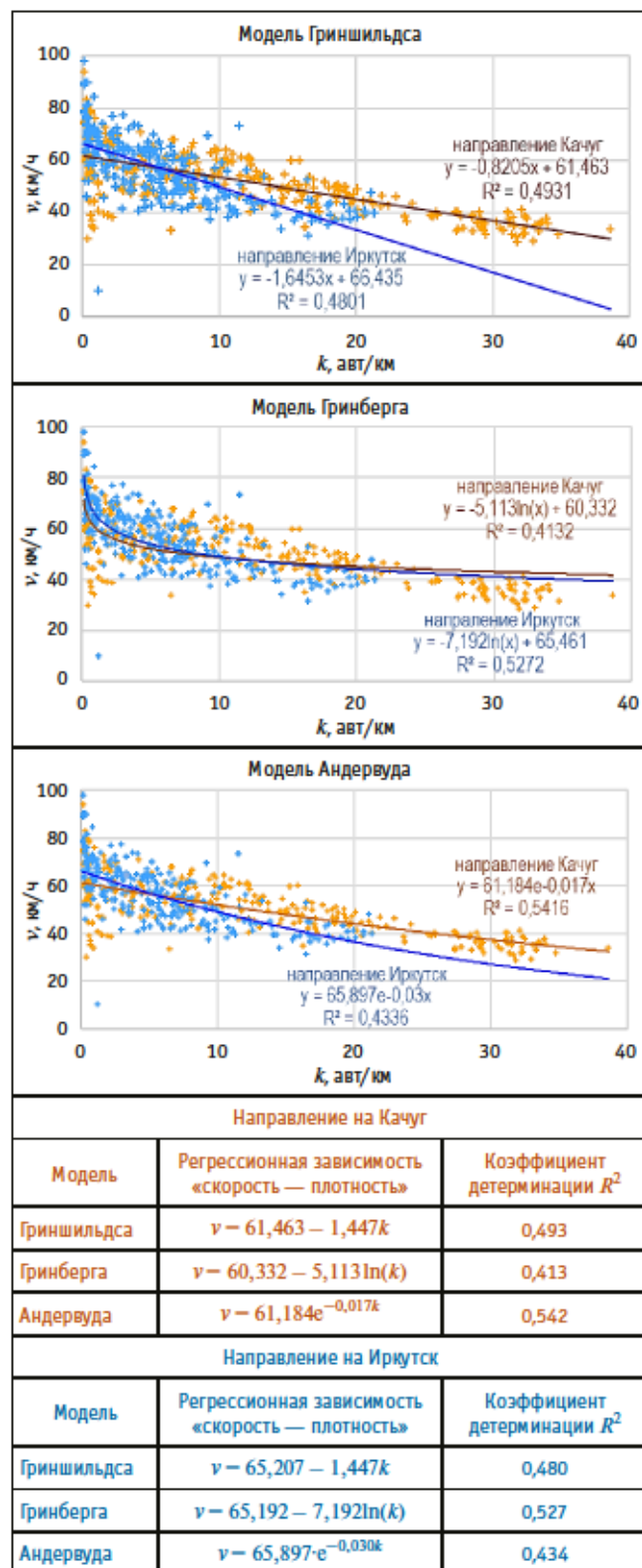
$v_f$  — скорость потока в свободных условиях, авт/км;  
 $k_j$  — максимальная плотность потока (т.е. плотность затора), авт/км;  
 $v_c$  и  $k_c$  — критическая скорость и критическая плотность потока, при которых наблюдается максимальная интенсивность движения.

Поскольку определение вида диаграммы транспортного потока по эмпирическим данным осуществляется с использованием зависимости «скорость — плотность», для исследуемого участка на основе суточных данных (02.09.2024 г.) были получены линейные и нелинейные регрессионные зависимости «скорость — плотность», представленные в табл. 2.



Таблица 2

Результаты регрессионного анализа (данные 02.09.2024 г.)



Как видно из табл. 2, более высокие коэффициенты детерминации имеет модель Андервуда. Преимущество этой модели состоит в том, что ее параметрами являются значения критической скорости  $v_c$  и критической плотности  $k_c$ , при которых наблюдается максимальная интенсивность движения  $q_{\max}$  (т.е. достигается значение пропускной способности). Поэтому модель Андервуда выбрана для дальнейшего использования.

Основное уравнение транспортного потока, согласно модели Андервуда:

$$q = kv = kv_f \exp\left(-\frac{k}{k_c}\right). \quad (3)$$

При подстановке в уравнение (3) полученных значений (см. табл. 2, направление движения на Качуг) скорость движения в свободных условиях составляет  $v_f = 61,18$  км/ч, критическая плотность потока  $k_c = 1/0,017 = 58,82$  авт/км. Соответственно зависимость «интенсивность — плотность» получает вид

$$q = 61,90k \exp\left(-\frac{k}{58,82}\right). \quad (4)$$

Значения параметров транспортного потока на рассматриваемом участке (направление на Качуг), установленные по данным за 02.09.2024 г., следующие:

- скорость потока в свободных условиях  $v_f = 61,18$  км/ч;
- критическая скорость потока  $v_c = 22,78$  км/ч;
- критическая плотность потока  $k_c = 58,82$  авт/км;
- пропускная способность участка  $q_{\max} = 1340$  авт/ч.

При обработке данных за 03.09.2025 г. получены значения  $v_f = 61,83$  км/ч,  $k_c = 62,50$  авт/км, что отличается от значений  $v_f$  и  $k_c$  за 02.09.2024 г. и соответственно дает новые значения параметров  $v_c$  и  $q_{\max}$ . Поскольку значения параметров макроскопической диаграммы, определяемые за суточные периоды, отличаются, принято решение оценить значения  $v_f$  и  $k_c$ , входящих в уравнение (3), по данным за месячный период. С этой целью для рассматриваемого направления движения на Качуг обработаны данные за сентябрь 2024 г. Полученная зависимость «скорость — плотность» имеет более низкое значение коэффициента детерминации (рис. 1), чем в случае использования суточных данных (см. табл. 2).

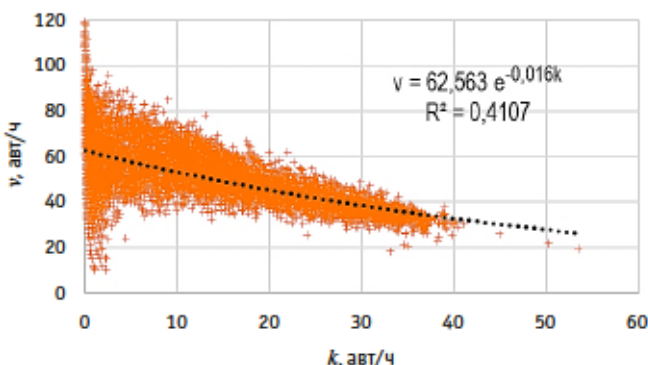


Рис. 1. Зависимость «скорость — плотность» (данные за сентябрь 2024 г., направление движения на Качуг)

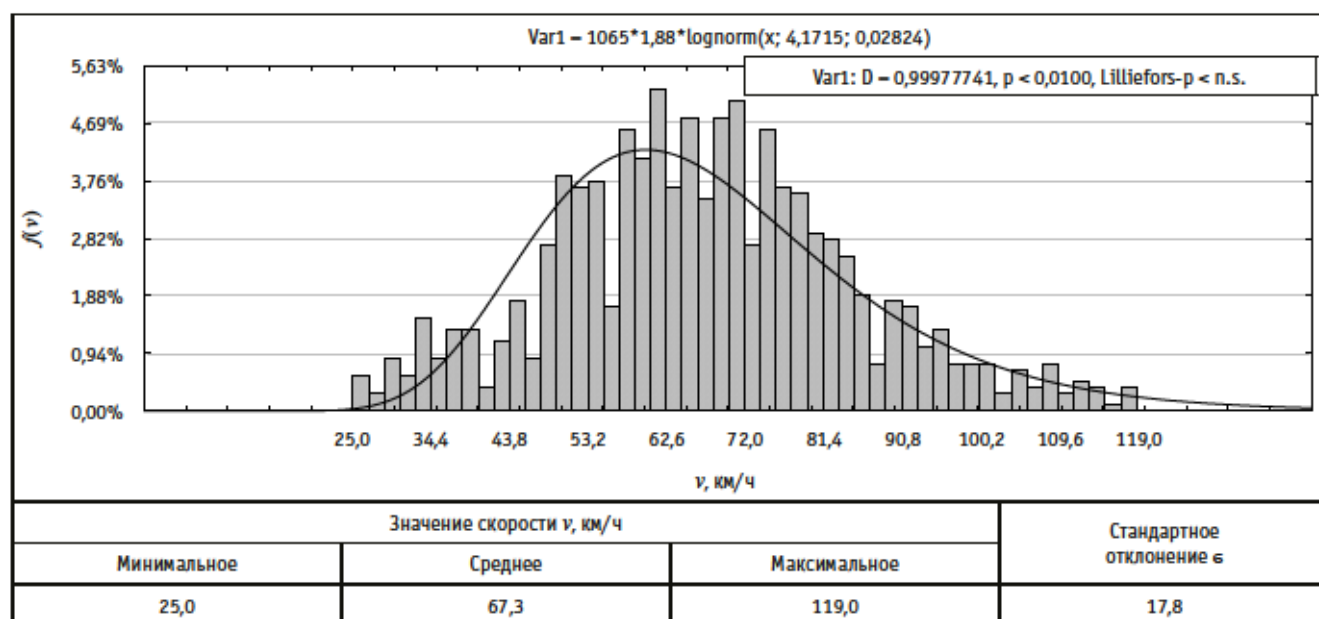


Рис. 2. Вариация значений скорости при плотности потока менее 5 авт/км (данные за сентябрь 2024 г.)

Анализ данных за месячный период показывает, что причиной снижения коэффициента детерминации является большой разброс значений скорости при низкой интенсивности движения (т.е. в условиях свободного движения). Агрегированные с периодом 5 мин значения скорости при плотности потока менее 5 авт/км имеют ассиметричное распределение (т.е. подчиняются логарифмически нормальному распределению) и характеризуются вариационным размахом 94 км/ч (рис. 2).

После исключения из рассмотрения значений скорости при плотности потока менее 5 авт/км получена зависимость с более высоким коэффициентом детерминации  $R^2 = 0,66$  (рис. 3).

Согласно полученному по скорректированным данным уравнению регрессии (см. рис. 3), скорость движения в свободных условиях  $v_c = 69,04$  км/ч, критическая плотность потока  $k_c = 1/0,021 = 47,62$  авт/км. Соответственно уравнение зависимости «интенсивность — плотность» рассмотренного горизонтального участка имеет вид

$$q = 69,04k \exp\left(-\frac{k}{47,62}\right). \quad (5)$$

По результатам этой части эксперимента (см. рис. 3) можно сделать вывод о целесообразности использования месячных данных мониторинга, при этом рекомендуется исключать из рассмотрения данные, полученные при плотности потока до 5 авт/км.

Представляется информативным сравнение результатов выполненного этапа исследования с результатами, опубликованными в зарубежных работах. Например, в [11] были исследованы зависимости «скорость — плотность» для пространственных значений скорости движения на двухполосной дороге регионального значения в Хорватии. Коэффициенты детер-

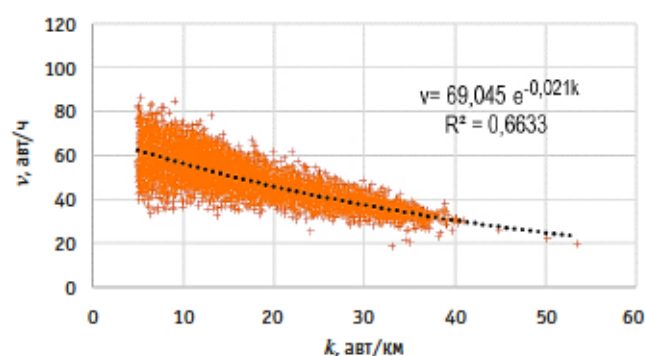


Рис. 3. Скорректированная зависимость «скорость — плотность» (данные за сентябрь 2025 г.)

минации зависимостей варьировали в диапазоне 0,16–0,38, при этом одно из наиболее высоких значений  $R^2 = 0,38$  было получено для экспоненциальной зависимости (т.е. модели Андервуда):

$$q = 54,88k \exp\left(-\frac{k}{69,05}\right). \quad (6)$$

Сравнение результатов настоящего исследования и данных работы [11] позволяет утверждать, что модель Андервуда может быть принята за основу для описания макроскопической диаграммы при движении потока на горизонтальных участках двухполосных дорог.

Вместе с тем вывод о применимости модели Андервуда для горизонтальных участков не распространяется на участки подъемов-спусков, где транспортный поток может обладать другими свойствами (рис. 4).



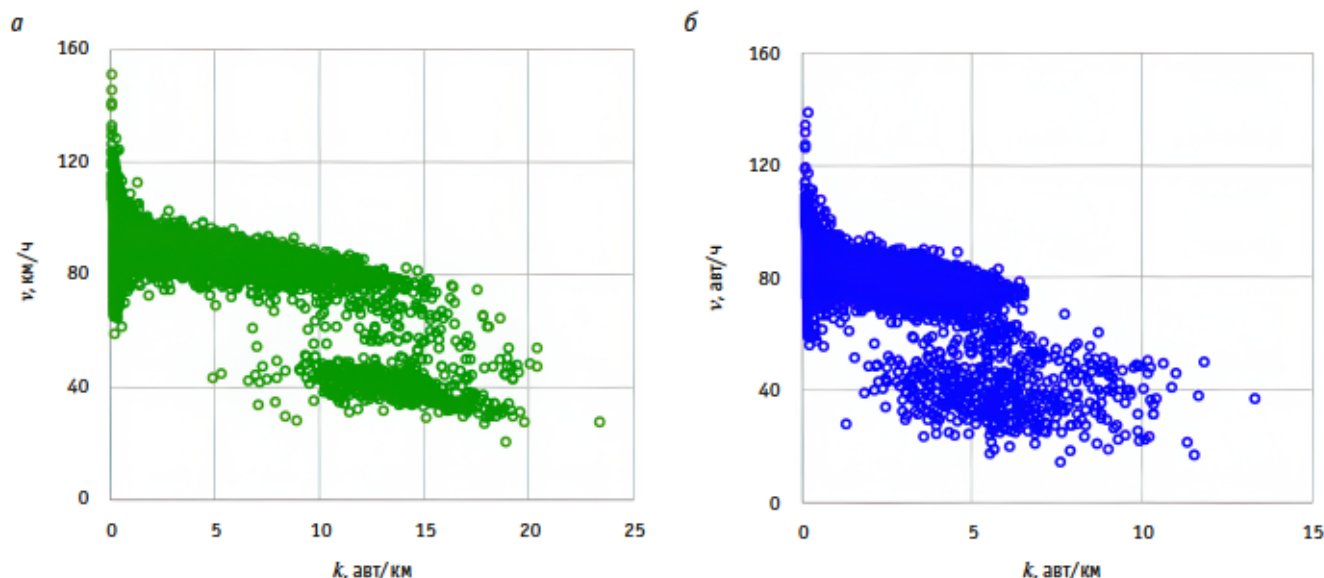


Рис. 4. Зависимости «интенсивность — плотность» на участке подъема 6 км+900 дороги Иркутск — Усть-Ордынский: а — дополнительная полоса обгона (левая); б — правая полоса движения

Зависимости «интенсивность — плотность» для соседнего участка 6 км+900 дороги Иркутск — Усть-Ордынский (см. рис. 4) указывают на наличие нескольких фазовых состояний потока (т.е. нескольких отличающихся режимов движения) [12–14]. В таких случаях можно использовать кластерный анализ с выявлением состояний потока и последующим получением уравнений макроскопической диаграммы для каждого из кластеров.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты выполненного этапа исследований позволяют рекомендовать к использованию модель Андервуда для оценки значений следующих параметров транспортного потока на горизонтальных участках двухполосных дорог:

средней скорости движения транспортного потока в свободных условиях;

критической скорости и критической плотности потока, при которых достигается максимальная интенсивность движения (т.е. пропускная способность).

Для установления параметров модели Андервуда предлагается использовать данные мониторинга за месячный период, за исключением данных, полученных при плотности потока до 5 авт/км.

Дальнейшими этапами исследований станут:

определение влияния продолжительности периода агрегации данных 15 мин на качество оценки параметров макроскопических моделей первого порядка;

установление вида макроскопических моделей второго порядка и их параметров для участков движения на подъем.

Решение этих задач позволит разработать практические рекомендации по оценке параметров движения транспортных потоков на основе данных, поступающих от стационарных детекторов.

### Сведения об авторах:

**Игорь Игоревич Тараховский,**  
директор ООО «КВАНТ Инжиниринг»

**Александр Юрьевич Михайлов,**  
доктор технических наук, профессор кафедры  
«Автомобильный транспорт» Иркутского национального  
исследовательского технического университета

### Authors information:

**Igor I. Tarakhovsky,**  
Head of KVANT Engineering LLC

**Alexander Yu. Mikhailov,**  
DSc in Engineering,  
Professor of Automobile Transport Department,  
Irkutsk National Research Technical University

## Литература

1. Методические рекомендации по проведению мониторинга дорожного движения : утв. распоряжением Минтранса России от 27.12.2022 г. № АК-337-Р. Москва : Минтранс России, 2022. 64 с.
2. Stepanović N., Tubić V., Zdravković S. Determining Free-Flow Speed on Different Classes of Rural Two-Lane Highways // Promet — Traffic & Transportation. 2023. 35 (3). Pp. 315–330.

## References

1. Methodological recommendations for monitoring traffic: approved by the Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation dated 27.12.2022 No. AK-337-R. Moscow: Ministry of Transport of the Russian Federation, 2022. 64 p. (In Russian).
2. Stepanović N., Tubić V., Zdravković S. Determining Free-Flow Speed on Different Classes of Rural Two-Lane Highways. Promet — Traffic & Transportation. 2023. 35 (3). Pp. 315–330.

3. Wardrop J. Some Theoretical Aspects of Road Traffic Research // *Proceedings of the Institute of Civil Engineers*. 1952. Part II. 1. Pp. 325–378.
4. Empirical Differences between Time Mean Speed and Space Mean Speed / V. Knoop, S. Hoogendoorn, Van Zuylen H. In book : *Traffic and Granular Flow'07*. 2009. Pp. 351–356. DOI: 10.1007/978-3-540-77074-9\_36.
5. On the estimation of space-mean-speed from inductive loop detector data / J. Han, J. W. Polak, Barria J. A., R. Krishnan // *Transportation Planning and Technology*. 2013. 3 (1). Pp. 91–104. DOI: 10.1080/03081060903429421.
6. Kucharski J. R., Drabicki A. Estimating Macroscopic Volume Delay Functions with the Traffic Density Derived from Measured Speeds and Flows // *Journal of Advanced Transportation*. 2017(3):1–10. DOI: 10.1155/2017/4629792.
7. Gaddam H. K., Rao K. R. Speed-density functional relationship for heterogeneous traffic data: a statistical and theoretical investigation // *Journal of Modern Transportation*. 2018. 27 (1). Pp. 61–74. DOI: 10.1007/s40534-018-0177-7.
8. Romanowska A., Jamroz K. Comparison of Traffic Flow Models with Real Traffic Data Based on a Quantitative Assessment // *Application Science*. 2021. 11. 9914. DOI: 10.3390/app11219914.
9. Greenberg H. An Analysis of Traffic Flow // *Operations. Research*. 1959. Vol. 7. Issue 1. Pp. 79–85.
10. Underwood R. T. Speed, volume and density relationships // *Quality and Theory of traffic Flow*. Bureau of Highway Traffic, Yale University: New Haven, CT, USA, 1960. Pp. 141–188.
11. Jovanovic B., Ševrović M., Luburić G. Comparative Analysis of Deterministic Fundamental Diagrams Representative of Continuous and Interrupted Traffic Flow on Selected Regional Road in Croatia // *Applied Science*. 2024. 14(2):533. DOI: 10.3390/app14020533.
12. Drake J. S., Schofer J. L., May A. D. A Statistical Analysis of Speed Density Hypotheses // *Highway Research Record*. 1966. 154. Pp. 53–87.
13. Kerner B. S., Konhäuser P. Structure and Parameters of Clusters in Traffic Flow // *Physical Review E — Statistical Physics, Plasmas, Fluids, and Related Interdisciplinary Topics*. 1994. Vol. 50. Pp. 54–83.
14. Easa S. M. Selecting Two-Regime Traffic-Flow Models // *Transportation Research Record*. 1982. Vol. 869. Pp. 25–36.
3. Wardrop J. Some Theoretical Aspects of Road Traffic Research. *Proceedings of the Institute of Civil Engineers*. 1952. Part II. 1. Pp. 325–378.
4. Knoop V., Hoogendoorn S., Van Zuylen H. Empirical Differences between Time Mean Speed and Space Mean Speed. In book: *Traffic and Granular Flow'07*. 2009. Pp. 351–356. DOI: 10.1007/978-3-540-77074-9\_36.
5. Han J., Polak J. W., Barria J. A., Krishnan R. On the estimation of space-mean-speed from inductive loop detector data. *Transportation Planning and Technology*. 2013. 3 (1). Pp. 91–104. DOI: 10.1080/03081060903429421.
6. Kucharski J. R., Drabicki A. Estimating Macroscopic Volume Delay Functions with the Traffic Density Derived from Measured Speeds and Flows. *Journal of Advanced Transportation*. 2017(3):1–10. DOI: 10.1155/2017/4629792.
7. Gaddam H. K., Rao K. R. Speed-density functional relationship for heterogeneous traffic data: a statistical and theoretical investigation. *Journal of Modern Transportation*. 2018. 27 (1). Pp. 61–74. DOI: 10.1007/s40534-018-0177-7.
8. Romanowska A., Jamroz K. Comparison of Traffic Flow Models with Real Traffic Data Based on a Quantitative Assessment. *Application Science*. 2021. 11. 9914. DOI: 10.3390/app11219914.
9. Greenberg H. An Analysis of Traffic Flow. *Operations. Research*. 1959. Vol. 7. Issue 1. Pp. 79–85.
10. Underwood R. T. Speed, volume and density relationships. *Quality and Theory of traffic Flow*. Bureau of Highway Traffic, Yale University: New Haven, CT, USA, 1960. Pp. 141–188.
11. Jovanovic B., Ševrović M., Luburić G. Comparative Analysis of Deterministic Fundamental Diagrams Representative of Continuous and Interrupted Traffic Flow on Selected Regional Road in Croatia. *Applied Science*. 2024. 14(2):533. DOI: 10.3390/app14020533.
12. Drake J. S., Schofer J. L., May A. D. A Statistical Analysis of Speed Density Hypotheses. *Highway Research Record*. 1966. 154. Pp. 53–87.
13. Kerner B. S., Konhäuser P. Structure and Parameters of Clusters in Traffic Flow. *Physical Review E — Statistical Physics, Plasmas, Fluids, and Related Interdisciplinary Topics*. 1994. Vol. 50. Pp. 54–83.
14. Easa S. M. Selecting Two-Regime Traffic-Flow Models. *Transportation Research Record*. 1982. Vol. 869. Pp. 25–36.



Научная статья

УДК 656.13

## Сравнение систем адаптивного круиз-контроля для автономных и управляемых человеком транспортных средств

Николай Иванович Григоренко<sup>1</sup><sup>1</sup>НО «Евразийский фонд привлечения и поддержки инвестиций», Екатеринбург, Россия

## Comparison of adaptive cruise control systems for autonomous and human-controlled vehicles

Nikolay I. Grigorenko<sup>1</sup><sup>1</sup>Non-profit Organization «Eurasian Fund for Attracting and Supporting Investments», Ekaterinburg, Russia

### Аннотация

В статье рассмотрен эксперимент по использованию транспортных средств, оснащенных различными типами систем адаптивного круиз-контроля (АСС), и автомобилей, управляемых человеком. Согласно полученным результатам, датчики АСС способны неизменно обеспечивать оптимальную дистанцию движения и эффективно регулировать расстояние между транспортными средствами. Вместе с тем эксперимент выявил сложное взаимодействие между системами АСС и поведением человека за рулем и подтвердил необходимость учитывать оба фактора при планировании будущего автономных транспортных средств. В целом полученные результаты могут способствовать пониманию и оценке динамики автономного вождения, а также принятию обоснованных решений по интеграции автономных транспортных средств в транспортные системы.

**Ключевые слова:** адаптивный круиз-контроль, транспортные средства, дистанция движения, транспортный поток, пропускная способность

### Abstract

The article discusses an experiment on the use of vehicles equipped with various types of adaptive cruise control (ACC) systems and human-controlled vehicles. According to the results obtained, ACC sensors are able to consistently ensure optimal driving distance and effectively adjust the distance between vehicles. However, the experiment revealed a complex interaction between ACC systems and human driving behavior and confirmed the need to take both factors into account when planning the future of autonomous vehicles. In general, the results obtained can contribute to understanding and evaluating the dynamics of autonomous driving, as well as making informed decisions on the integration of autonomous vehicles into transport systems.

**Keywords:** adaptive cruise control, vehicles, driving distance, traffic flow, capacity

DOI: 10.20291/1815-9400-2025-4-85-91

### ВВЕДЕНИЕ

В последние годы вектор развития автомобилестроения сместился с повышения экономических и экологических показателей двигателей на развитие и внедрение электронных систем управления [1, 2]. Стремительное развитие автономных транспортных средств (АТС) открывает новые перспективы и ставит новые задачи перед существующими видами транспорта.

Объединение инноваций из области искусственного интеллекта, машинного обучения и сенсорной инженерии способствовало развитию беспилотных технологий в транспортной сфере. Эти инновации превратили обычные транспортные средства в передовые системы, способные воспринимать окружающую среду и принимать автономные решения в режиме реального времени. Пока сложно выделить проблемы, с которыми в дальнейшем столкнется беспилотный автомобиль высокого уровня, но автономность можно определить как способность интеллектуальной системы решать конкретные задачи в условиях неопределенности самой системы и ее окружения. При этом система должна справляться с неопределенностью без вмешательства человека и при высоком уровне автоматизации транспортного средства.

Одними из важнейших для АТС являются системы управления, отвечающие за отслеживание маршрута и безопасность вождения. К таким системам относится адаптивный круиз-контроль (АСС), основное преимущество которого заключается в способности значительно снижать утомляемость водителя при длительных поездках или в условиях плотного трафика [3]. Система самостоятельно контролирует скорость и дистанцию до других транспортных средств, что позволяет водителю сосредоточиться на управлении и снижает вероятность возникновения аварийных ситуаций. Например, на автомагистрали водитель может установить желаемую скорость, и система будет автоматически повышать или снижать ее в зависимости от движения впереди идущего транспорта. Это особенно важно в условиях пробок, когда требуется постоянное переключение между торможением и ускорением.

Система адаптивного круиз-контроля способствует поддержанию заданной дистанции до впереди идущего автомобиля и соблюдению скоростного режима. Такая усовершенствованная система помощи водителю (ADAS) изменяет скорость транспортного средства, обеспечивая безопасную дистанцию при движении.

Системы АСС влияют на сокращение временных и пространственных затрат, на увеличение пропускной способности и предотвращение заторов, что в результате способствует повышению безопасности автомобилей и обеспечивает стабильность движения [4, 5].

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Задача исследования заключалась в анализе систем АСС (систем на основе радаров, систем на основе камер, а также гибридных систем управления радаром и камерой) для определения дистанции следования между транспортными средствами при различных скоростных режимах дорожного движения.

Тестирование транспортного средства выполнялось в рамках «Программы экспериментального правового режима в сфере цифровых инноваций в области эксплуатации высокоавтоматизированных транспортных средств» [6]. Основная цель заключалась в оценке эффективности транспортных средств, оснащенных системами АСС. Натурные испытания проводились на участке протяженностью 1,5 км автомагистрали М-9 «Балтия», в эксперименте участвовали три типа транспортных средств, каждое из которых было оснащено разными типами сенсоров АСС (табл. 1).

Таблица 1

Основная информация о транспортных средствах, участвовавших в эксперименте

Транспортное средство	Силовой агрегат	Сенсоры АСС	Длина, мм
Тип 1 — универсал повышенной проходимости	1.6 л (бензин)	Камеры	4690
Тип 2 — компактный кроссовер	2.0 л (бензин)	Камера — радар	4425
Тип 3 — электрохэтчбек	Электромотор на 109 л.с.	Радар	4270

Опишем подробнее сенсоры АСС выбранных транспортных средств.

Тип 1. Оснащен камерами. Переднее расположение камер позволяет охватывать широкий спектр визуальной информации, включая условия движения, разметку полос движения, потенциальные препятствия, и обеспечивает возможность системе АСС принимать обоснованные решения в режиме реального времени.

Тип 2. Оснащен комбинированной системой «камера — радар». Камеры фиксируют визуальную информацию — разметку полосы движения и дорожные знаки, а радар измеряет расстояние и скорость. Эта система с двумя датчиками обеспечивает более надежный и комплексный подход к АСС.

Тип 3. Оснащен сенсорными технологиями. Сенсоры используют радиоволны частотного диапазона 77–81 ГГц. Выбор электрического типа автомобиля для эксперимента не только разнообразит набор транспортных средств, оснащенных АСС, но и подчеркивает адаптируемость этой технологии к электрическим платформам.

Рассмотрим использование транспортных средств, управляемых человеком, в сравнении с транспортными средствами, оснащенными системами АСС. Для наработки экспериментальных данных и проведения всестороннего анализа были собраны данные по различным дорогам в Волоколамске. Ведущий автомобиль проезжал по дороге, собирал данные и накапливал информацию о поведении автомобилей, следующих за ним, которые управлялись исключительно человеком. Отличить транспортное средство, управляемое исключительно человеком, от тех, что оснащены АСС, на дороге сложно, поскольку современные автомобили могут использовать ADAS. Фактически при включении круиз-контроля водителю не требуется нажимать на педаль газа, и в некотором смысле транспортное средство движется автоматически [7]. Управление исключительно человеком характеризуется более неустойчивым поведением при вождении, включая резкие ускорения, смену полосы движения и менее предсказуемые колебания скорости.

## МЕТОДОЛОГИЯ

В ходе исследования собраны данные по автомобилям, оснащенным АСС, и автомобилям, управляемым человеком, позволяющие оценить различия в параметрах транспортного потока между этими двумя типами транспортных средств. Затем были собраны данные при разных дистанциях между автомобилями для получения экспериментальных результатов. На экспериментальном участке автодороги М-9 «Балтия» проведены натурные проезды и собраны данные в соответствии с нормативными документами [8–10]. В каждом экспериментальном проезде по автодороге последовательно участвовали два автомобиля: первый был ведущим, второй — ведомым.

Три тестовых автомобиля, оснащенных системами АСС, участвовали в трех различных сценариях. Сначала в качестве ведомого выступал автомобиль типа 1, во втором сценарии — автомобиль типа 2, в третьем — типа 3. На трассе присутствовали только два тестируемых автомобиля, что обеспечивало точную оценку характеристик АСС. Эксперименты проводились при одинаковых погодных условиях, чтобы избежать какого-либо влияния на работу датчиков АСС. Следует отметить, что во время экспериментов за рулем находились три человека разного возраста. Внутри транспортных средств были сопровождающие, которые наблюдали за ходом экспериментов и помогали собирать данные. Чтобы обеспечить точность результатов на протяжении всего эксперимента, сбор данных о расстоянии следования за автомобилем осуществлялся с помощью устройства RPLIDAR. Устройство крепилось к заднему бамперу ведущего автомобиля, последовательно фиксируя расстояние до переднего бампера следующего автомобиля (рис. 1). Транспортные средства, оснащенные АСС, по очереди выполняли функции ведущих, обеспечивая всестороннюю проверку своих систем.





Рис. 1. Устройство RPLIDAR, закрепленное на задней части головного автомобиля

Попутный транспорт, управляемый человеком, также принимал участие в тестировании с помощью устройства RPLIDAR. Процесс сбора данных начинался, когда случайный автомобиль, управляемый человеком, вплотную приближался к заднему бамперу предшествующего автомобиля, что позволяло сделать необходимые измерения. Чтобы обеспечить объективное сравнение с автомобилями, оснащенными системой ACC, во время записи не учитывались случаи ускорения и замедления.

Данные о дистанции между автомобилями фиксировались при контролируемых и постоянных скоростях движения от 30 до 110 км/ч с интервалом 10 км/ч. Сравнивались девять параметров скоростного режима, три сценария дорожного движения транспортных средств, оснащенных ACC, и один сценарий, когда автомобилем управлял человек. В результате было выполнено не менее 36 тестовых заездов на экспериментальном участке трассы и на дорогах Волоколамского района.

## АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Переходя к анализу параметров транспортного потока, отметим, что в экспериментальном сценарии не тестировались другие средства и системы получения информации от внешних источников [11]. На основе данных о расстояниях между двумя идущими друг за другом транспортными средствами, именуемых зазорами, было проведено сравнение транспортных средств, оборудованных ACC, и транспортных средств, управляемых человеком. Для исследования различий учитывалась взаимосвязь между зазорами и соответствующими скоростями движения. Затем были проанализированы такие параметры транспортного потока, как расстояние в пространственном интервале, время в пути, плотность и поток, которые рассчитывались с использованием следующих уравнений:

$$\begin{aligned} \text{средний интервал движения, м/авт} = \\ = \frac{\text{средний зазор (мм)} + \text{длина автомобиля (мм)}}{1000}; \quad (1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{среднее время движения, с/авт} = \\ = \frac{\text{средняя продолжительность пути (м/авт)}}{\text{скорость (м/с)}}; \quad (2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{средняя плотность, авт/км} = \\ = \frac{1000}{\text{средняя продолжительность пути (м/авт)}}; \quad (3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{среднее время движения, с/авт} = \\ = \text{средняя плотность (авт/ч)} \times \text{скорость (км/ч)}. \quad (4) \end{aligned}$$

Следует отметить, что транспортный поток и пропускная способность — разные понятия в транспортной инженерии, где транспортный поток относится к фактическому движению транспортных средств, а пропускная способность представляет собой максимальную устойчивую скорость потока, с которой может справиться проезжая часть дороги или транспортное средство. В моделях следования за лидером учитывалось предположение о наличии связи между перемещением ведомого автомобиля и перемещением лидера [12]. В данном конкретном анализе применялся уникальный подход: при сборе данных с кратной контролируемой постоянной скоростью учитывались кратчайшие расстояния при использовании параметра ACC. Следовательно, в таких конкретных условиях рассчитывался максимальный транспортный поток, и для целей исследования предполагалось, что он является синонимом термина «пропускная способность».

Средний зазор анализировался с использованием прибора RPLIDAR, непосредственно регистрирующего зазоры между каждыми двумя транспортными средствами. При исследовании были выбраны следующие скоростные режимы: 30, 40 и 50 км/ч, 60, 70 и 80 км/ч, 90, 100 и 110 км/ч. Распределение зазоров для каждого типа транспортного средства интерпретировалось с помощью диаграммы рассеяния (или диаграммы-леденца).

Полученные результаты показали, что люди, управляющие автомобилем, демонстрируют более напористый стиль вождения по сравнению с водителями, использующими средства ACC. Способность человека самостоятельно принимать решения во время вождения является его отличительным преимуществом, позволяющим корректировать дистанцию следования.

Еще одно наблюдение касается различия в распределении данных для транспортных средств, управляемых человеком, на всех тестируемых скоростях. Это различие подчеркивает изменчивость поведения человека за рулем и демонстрирует более широкий спектр реакций на различные дорожные условия, что подтверждают исключительные показатели типа 3. Анализ данных подтверждает значительную степень симметрии в распределении, что указывает на повышенный уровень согласованности результатов. Такая согласованность отражается в сходимости трех показателей, характеризующих тенденцию к почти идентичным значениям. Эта сходимость свидетельствует о надежной и равномерной работе системы ACC автомобиля типа 3, подчеркивая ее эффективность в поддержании стабильной и предсказуемой модели вождения при различных скоростях движения.

Результаты анализа среднего зазора для исследуемых автомобилей приведены на рис. 2.

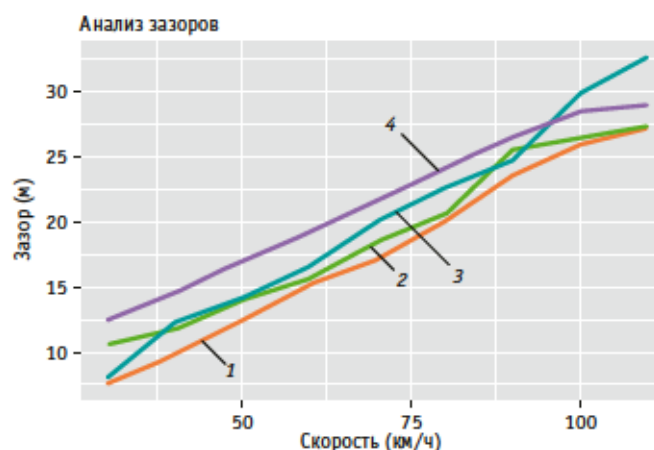


Рис. 2. Средний зазор испытанных автомобилей:  
 1 — водитель; 2 — тип 1; 3 — тип 2; 4 — тип 3

На основании полученных экспериментальных результатов выполнен анализ пространственного перемещения, временного перемещения, плотности и пропускной способности. Средний интервал движения в пространстве рассчитывался по уравнению (1), длина каждого транспортного средства (см. табл. 1) суммировалась со средним зазором для получения значения среднего пробега. Следует отметить, что данные по автомобилям, управляемым человеком, собирались со случайно выбранных транспортных средств, которые во время движения по дорогам обнаруживались лидарным устройством. Среднее время

прохождения рассчитывалось с использованием уравнения (2): каждая средняя скорость движения в пространстве делилась на соответствующую постоянную скорость движения во время эксперимента. Отметим, что этот производный параметр имеет большое значение, так как является важнейшей метрикой для сравнения с результатами, описанными в литературе. Ниже приведен пример расчета среднего пути в пространстве и среднего пути во времени для типа 1 при скорости 30 км/ч:

$$\text{средний пространственный зазор (дистанция)} = 10,537 + 4690 = 15,227 \text{ мм} = 15227 \text{ м}; \quad (5)$$

$$\text{среднее время движения} = \frac{15227}{30/3,6} = 1827 \text{ с}. \quad (6)$$

На заключительном этапе с использованием уравнений (3) и (4) были рассчитаны плотность движения и пропускная способность исследованных на тестированном участке дорожного движения автомобилей. Эти два показателя играют решающую роль в понимании транспортных потоков и управлении ими на дорогах и магистралях. Распределение указанных показателей по нескольким постоянным скоростям движения, выполняемым человеком и автономным транспортным средством, должно прояснить преимущества одного метода вождения перед другим и оценить эффективность сенсоров АСС, использованных в ходе эмпирического тестирования. Как показали результаты, приведенные в табл. 2, автомобили, оснащенные АСС, имеют меньший

Таблица 2

Средняя плотность движения и пропускная способность, полученные на тестовых автомобилях

Скорость, км/ч / параметр		Водитель	Тип 1	Тип 2	Тип 3	Снижение пропускной способности, %		
						тип 1 / водитель	тип 2 / водитель	тип 3 / водитель
30	А	84	66	81	60	21,4	3,5	28,2
	Б	2505	1970	2417	1799	21,4	3,5	28,2
40	А	70	61	60	53	12,9	13,5	24,1
	Б	2796	2436	2417	2121	12,9	13,5	24,1
50	А	59	54	54	47	9,7	8,8	20,4
	Б	2962	2675	2703	2356	9,7	8,8	20,4
60	А	51	49	47	43	3,3	7	16,3
	Б	3058	2956	2846	2559	3,3	7	16,3
70	А	47	43	41	39	7,3	12,1	17,2
	Б	3257	3020	2864	2697	7,3	12,1	17,2
80	А	41	40	37	35	3,2	9,5	14,0
	Б	3276	3170	2965	2816	3,2	9,5	14,0
90	А	36	33	34	33	7,1	3,8	8,9
	Б	3213	2983	3089	2928	7,1	3,8	8,9
100	А	33	32	29	31	2,6	11,3	7,2
	Б	3293	3206	2920	3056	2,6	11,3	7,2
110	А	32	31	27	30	0,8	14,3	4,4
	Б	3473	3444	2976	3319	0,8	14,3	4,4

Примечание. А — плотность, Б — пропускная способность.



процент плотности и пропускной способности, чем автомобили, управляемые человеком. И хотя в некоторых случаях сенсоры АСС могут иметь аналогичные значения пропускной способности, но эти значения никогда не опускаются ниже тех, которые получены при управлении автомобилем человеком. Диапазон между минимальным и максимальным снижением пропускной способности при использовании систем АСС по сравнению с ТС под управлением человеком составляет 0,8–28,2 % (см. табл. 2), причем минимальный процент достигается при самой высокой скорости движения, а максимальный — при самой низкой. Примерные расчеты плотности движения и пропускной способности для типа 1 на скорости 30 км/ч приведены ниже:

$$\text{средняя плотность} = \frac{1000}{15,227} = 65,67 \text{ авт./км}; \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \text{средний расход (пропускная способность)} = \\ = 65,67 \times 30 = 1970 \text{ авт./км}. \end{aligned} \quad (8)$$

На рис. 3 обобщены результаты проведенных экспериментов, иллюстрирующие влияние увеличения зазоров на пропускную способность тестируемого участка дороги (размер точек на графике указывает на временной интервал).

Как видно из рис. 3, пропускная способность практически плавно повышается по мере увеличения скорости и, как следствие, зазора и для автомобилей, управляемых человеком,

и для экспериментальных автомобилей. Что касается типа 1, он следует плавной тенденции, за исключением движения на скорости 90 км/ч, где происходит резкое падение. Это можно объяснить относительно большой разницей во времени, зафиксированной на скорости 80 и 90 км/ч при фиксации 1,136 и 1,207 с соответственно. В отличие от типа 1, тип 2 показал более высокие результаты по осцилляции мощности, так как использовал временные настройки АСС, а не настройки расстояния, как тип 1.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования показали, что контролируемая среда на экспериментальном участке автомагистрали может отличаться от реальных условий вождения. Поведение человека на дорогах общего пользования может зависеть от воздействия множества факторов, таких как дорожные пробки, дорожная инфраструктура и непредсказуемые ситуации. Эти факторы способны повлиять на сопоставление результатов измерений на трассе с результатами измерений на дорогах общего пользования. Полученные в ходе исследования данные могут служить материалом для оценки характеристик и надежности транспортных средств в контролируемых условиях, позволят автопроизводителям выявлять потенциальные недостатки и совершенствовать технологии, а также будут способствовать развитию автономных и подключенных транспортных средств и в конечном счете повысят безопасность на дорогах общего пользования [13].

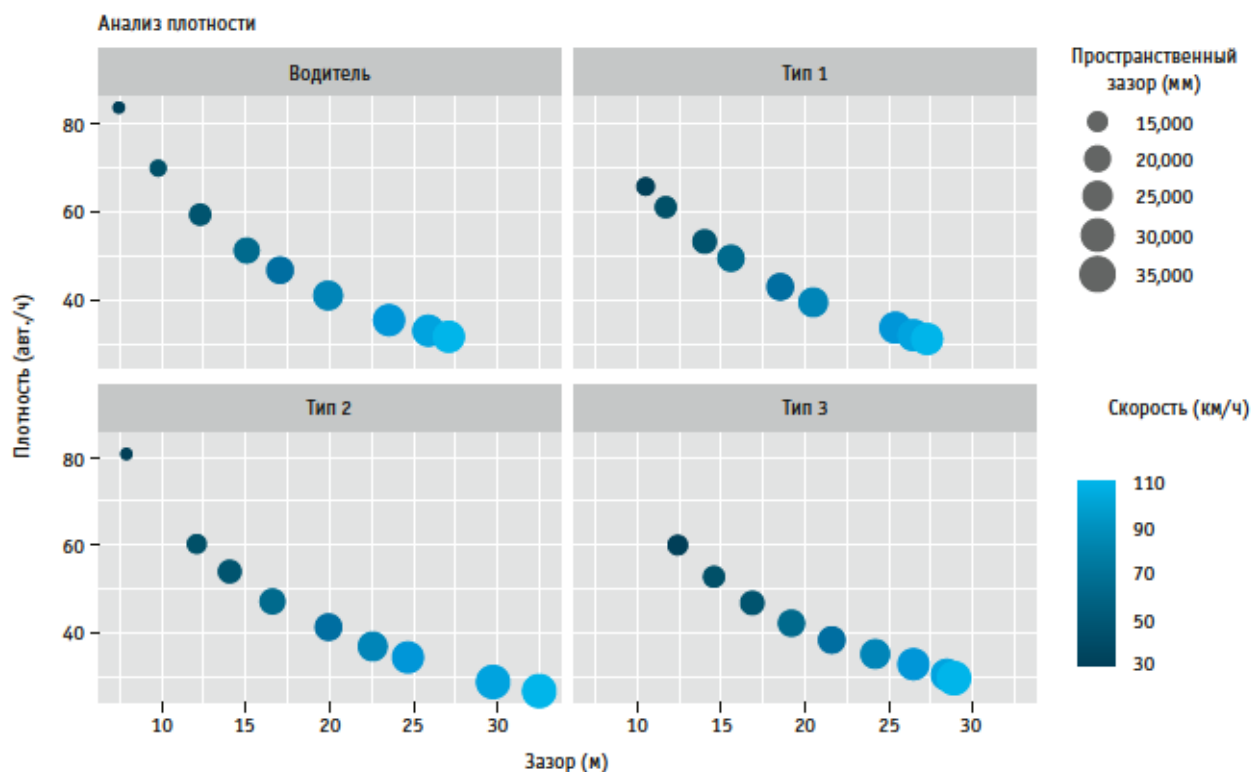


Рис. 3. Показатели среднего зазора, времени движения и плотности дорожного движения на всех тестируемых скоростях

Проведенные натурные эксперименты помогут в изучении динамики движения автомобилей, оснащенных системой АСС, и автомобилей, управляемых человеком, а также в исследовании влияния их продольного движения на транспортный поток и пропускную способность. Полученные результаты показали, что системы АСС способны поддерживать более стабильную дистанцию следования, чем при управлении водителем, и тем самым повышать безопасность движения.

Несмотря на то что в целом при определенных условиях системы АСС могут способствовать более стабильному движению транспортного потока, адаптивность и коммуникативные способности человека все же имеют преимущества, когда возникают сложные и непредсказуемые ситуации. Но по мере

развития технологий понимание и устранение этих различий будет иметь решающее значение для успешной интеграции систем автоматизированного вождения. С помощью кооперативного адаптивного круиз-контроля (CACC) возможно организовать взаимодействие между транспортными средствами. Они смогут двигаться в более тесном контакте, используя обмен данными в режиме реального времени для синхронизации скоростей и поддержания более стабильного и эффективного транспортного потока. В конечном счете интеграция совместных элементов позволит кооперативному адаптивному круиз-контролю превзойти предыдущие версии этой технологии и будет способствовать увеличению пропускной способности дорог и более рациональному управлению автомобилем.

#### Сведения об авторе:

**Николай Иванович Григоренко**,  
кандидат технических наук, научный консультант НО  
«Евразийский фонд привлечения и поддержки инвестиций»

#### Author's Information:

**Nikolay I. Grigorenko**,  
PhD in Engineering, Scientific consultant of Non-profit Organization  
«Eurasian Fund for Attracting and Supporting Investments»

### Литература

1. Гусев С. И., Елифанов В. В. Проблемы внедрения инновационных беспилотных автомобилей в экономическую среду // Вестник УлГТУ. 2021. № 1. С. 44–49. ISSN 1684-7016.
2. Григоренко Н. И. Влияние сенсорных технологий на современные тенденции развития систем управления автономного транспорта // Высокие технологии в строительном комплексе. 2025. № 1. С. 196–207. ISSN 2618-9054.
3. Савин И. В. Система адаптивного круиз-контроля в современных транспортных средствах // Известия ТулГУ. Технические науки. 2020. № 4. С. 313–316. ISSN 2071-6168.
4. Лобачёва Л. П., Сальников С. П. Высокоавтоматизированные транспортные средства и безопасность дорожного движения: отдельные вопросы интеграции // Безопасность дорожного движения. 2023. № 4. С. 53–58. ISSN 2782-2850.
5. Зайцев Э. М. Разработка системы адаптивного круиз-контроля // Наука без границ. 2020. № 3 (43). С. 68–75. ISSN 2500-1191.
6. Об установлении экспериментального правового режима в сфере цифровых инноваций и утверждении Программы экспериментального правового режима в сфере цифровых инноваций по эксплуатации высокоавтоматизированных транспортных средств (с изменениями и дополнениями): Постановление Правительства Российской Федерации от 09.03.2022 г. № 309. URL: <http://government.ru/docs/all/139820/>.
7. Соловьев В. В., Номерчук А. Я. Автоматная модель круиз-контроля для автомобиля // Известия ЮФУ. Технические науки. 2023. № 3 (233). С. 172–188. DOI: 10.18522/2311-3103-2023-3-172-188.
8. ГОСТ Р 58824-2020 (ISO 15622:2018). Автомобильные транспортные средства. Системы адаптивного круиз-контроля. Общие технические требования и методы испытаний. Москва: Стандартинформ, 2020. 24 с.
9. ГОСТ Р ISO 15622-2017. Интеллектуальные транспортные системы. Системы адаптивного круиз-контроля. Требования к эксплуатационным характеристикам и методы испытания. Москва: Стандартинформ, 2017. 22 с.

### References

1. Gusev S. I., Epifanov V. V. Problems of introducing innovative unmanned vehicles into the economic environment. *Bulletin of UISTU* 2021. No. 1. Pp. 44–49. ISSN 1684-7016. (In Russian).
2. Grigorenko N. I. The influence of sensor technologies on modern trends in the development of autonomous transport control systems. *High technologies in construction complex*. 2025. No. 1. Pp. 196–207. ISSN 2618-9054. (In Russian).
3. Savin I. V. Adaptive cruise control system in modern vehicles. *Proceedings of the TSU. Technical sciences*. 2020. No. 4. Pp. 313–316. ISSN 2071-6168. (In Russian).
4. Lobacheva L. P., Salnikov S. P. Highly automated vehicles and road safety: selected integration issues. *Road safety*. 2023. No. 4. Pp. 53–58. ISSN 2782-2850. (In Russian).
5. Zaytsev E. M. Development of adaptive cruise control system. *Science without borders*. 2020. No. 3 (43). Pp. 68–75. ISSN 2500-1191. (In Russian).
6. On the establishment of an experimental legal regime in the field of digital innovation and approval of the Program of an experimental Legal Regime in the field of digital innovation for the operation of highly automated vehicles (with amendments and additions): the Order of the Government of the Russian Federation No. 309 dated 09.03.2022. URL: <http://government.ru/docs/all/139820/>. (In Russian).
7. Soloviev V. V., Nomerchuk A. Ya. Automatic cruise control model for a car. *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*. 2023. No. 3 (233). Pp. 172–188. DOI: 10.18522/2311-3103-2023-3-172-188. (In Russian).
8. GOST R 58824-2020 (ISO 15622:2018). Intelligent transport systems — Adaptive cruise control systems — Performance requirements and test procedures, MOD. Moscow: Standardinform, 2020. 24 p. (In Russian).
9. GOST R ISO 15622-2017: Intelligent transport systems. Adaptive cruise control systems. Performance requirements and test methods. Moscow: Standardinform, 2017. 22 p. (In Russian).



10. ПНСТ 633-2022 Интеллектуальные транспортные системы. Кооперативные адаптивные системы круиз-контроля. Требования к эксплуатационным характеристикам и методы испытания. Москва : Российский институт стандартизации, 2022. 18 с.
11. Жанказиев С. В., Воробьев А. И., Морозов Д. Ю. Технические и технологические особенности автономных транспортных средств // Транспорт Российской Федерации. 2019. № 3 (82). С. 39–43. ISSN 1994-831X.
12. Мосева М. С. О методах сбора и анализа основных характеристик транспортного потока // Т-Сотм: Телекоммуникации и транспорт. 2022. Т. 16. № 2. С. 29–38. DOI: 10.36724/2072-8735-2022-16-2-29-38.
13. Морозов В. В., Карнаухов В. Н., Ярков С. А. Совершенствование модели влияния концентрации транспортного потока на интенсивность движения автомобилей // Интеллект. Инновации. Инвестиции. 2020. № 1. С. 98–105. DOI: 10.25198/2077-7175-2020-1-98.
10. Performance requirements and test methods 633-2022. Intelligent transport systems. Cooperative adaptive cruise control systems. Performance requirements and test procedures. Moscow : Russian Standardization Institute, 2022. 18 p. (In Russian).
11. Zhankaziev S. V., Vorob'ev A. I., Morozov D. Yu. Technical and technological features of driverless vehicles. *Transport of the Russian Federation*. 2019. No. 3 (82). Pp. 39–43. ISSN 1994-831X. (In Russian).
12. Moseva M. S. About methods for collecting and analyzing traffic flow characteristics. *T-Comm: Telecommunications and Transport*. 2022. Vol. 16. No. 2. Pp. 29–38. DOI: 10.36724/2072-8735-2022-16-2-29-38. (In Russian).
13. Morozov V. V., Karnaukhov V. N., Yarkov S. A. Improving the model of the influence of traffic flow concentration on the traffic intensity. *Intellect. Innovations. Investments*. 2020. No. 1. Pp. 98–105. DOI: 10.25198/2077-7175-2020-1-98. (In Russian).

Научная статья  
УДК 621.316.91

## Снижение гальванического влияния обратной рельсовой сети на устройства СЦБ

Евгений Юрьевич Тряпкин<sup>1</sup>, Наталья Константиновна Шурова<sup>1</sup>

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

## Reducing the galvanic influence of the return rail network on the signaling and circuit devices

Evgeniy Yu. Tryapkin<sup>1</sup>, Natalya K. Shurova<sup>1</sup>

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

### Аннотация

Статья посвящена защите оборудования сигнальных точек СЦБ от повреждений, вызванных проникновением повышенного потенциала из рельсовой цепи. Рассмотрены эксперимент по измерению величины потенциалов в рельсовой цепи и механизмы появления повышенного потенциала в рельсах. Приведена оценка экономического эффекта от внедрения предлагаемых мероприятий для участка Дальневосточной железной дороги.

**Ключевые слова:** сигнальная точка, устройства СЦБ, защита, потенциалы в рельсовой цепи, разделительный трансформатор

### Abstract

The article considers the issue of protecting the equipment of signaling points of the signaling system from damage caused by the penetration of increased potential from the track circuit. The experiment conducted to measure the value of potentials in the track circuit and the mechanisms of the appearance of increased potential in the rails are described. An assessment of the economic effect from the implementation of the proposed measures for the section of the Far Eastern Railway is given.

**Keywords:** signaling point, signaling devices, protection, potentials in the track circuit, isolating transformer

DOI: 10.20291/1815-9400-2025-4-92-97

**Ж**елезнодорожный транспорт в Российской Федерации — один из наиболее распространенных способов перевозки грузов, в том числе экспортных. В частности, по данным Федеральной службы государственной статистики [1], в 2022 и 2023 гг. железнодорожные перевозки занимали лидирующую позицию по объему грузооборота — порядка 45 %.

При подобном уровне интенсивности перевозок инфраструктура железнодорожного транспорта испытывает высокую нагрузку, что приводит к отказам оборудования (рис. 1). Некоторые виды отказов, в том числе повреждения сигнальных точек, влияют на безопасность движения поездов.

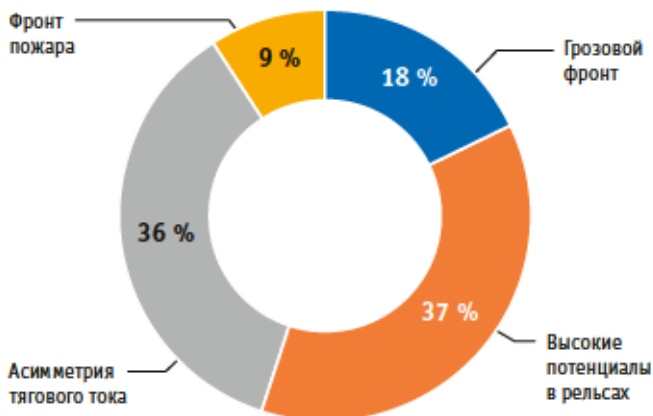


Рис. 1. Причины отказов технических средств СЦБ на участке Дальневосточной железной дороги

Цель выполненного авторами статьи исследования заключалась в разработке предложений по защите оборудования СЦБ от повышенных потенциалов в рельсах, что актуально в связи с возросшей нагрузкой на инфраструктуру железнодорожного транспорта, приводящей к большим экономическим ущербам.

В 2018 г. сотрудниками кафедры «Системы электроснабжения» Дальневосточного государственного университета путей сообщения был выполнен анализ причин повреждения сигнальных точек устройств СЦБ. Измерения проводились



переносными приборами, а также разработанными на базе кафедры специальными мобильными комплексами. В результате было установлено, что причиной повреждения сигнальных точек являются повышенные потенциалы «рельс — земля», которые возникают из-за высокого сопротивления рельсов тяговой составляющей обратного тока [2, 3].

Следующим этапом стало создание расчетной методики для определения потенциалов в рельсах в зависимости от протекающего обратного тягового тока и величины сопротивления рельсовой линии. В рамках решения этой задачи были проанализированы методики определения сопротивления рельсов [4–7] и установлено, что в них не рассматривается протекание тяговой составляющей обратного тока в рельсах. Однако результаты практических исследований показывают, что именно тяговый ток является источником повышенных потенциалов в рельсовой цепи.

Л. Р. Нейман предлагает следующую формулу определения сопротивления рельсов [5]:

$$R_p = \frac{1}{P} \cdot \sqrt{\mu_{ст} P \omega}, \quad (1)$$

где  $l$  — длина рельса, м;  $P$  — периметр сечения рельса, мм;  $\mu_{ст}$  — абсолютная статическая магнитная проницаемость рельсовой стали, Гн/м;  $\omega$  — угловая частота переменного тока, рад/с;  $\rho$  — удельное сопротивление рельсовой стали, Ом·мм<sup>2</sup>/м.

В работах [6, 7] авторы приводят зависимости сопротивления рельса от протекающего тока. Эти зависимости демонстрируют прямую зависимость между сопротивлением и током: при увеличении тока сопротивление также увеличивается.

Направлением дальнейших исследований, выполненных в ДВГУПС, стало определение параметров работы участка рельсовой сети. Для этого были созданы мобильные комплексы длительной регистрации электротехнических параметров, которые работают в режиме единого времени и позволяют синхронизировать по времени измерения параметров территориально распределенных объектов.

Эксперименты проводились на двух участках Дальневосточной железной дороги, где наблюдаются повышенные потенциалы «рельс — земля», в зимний период при температурах окружающего воздуха от 17 до 30 °С ниже нуля. Регистрация параметров производилась согласно стандарту МЭК 61850 с разрешением 256 точек на период основной частоты [3].

Фрагмент графика зарегистрированных значений тока и падений напряжения на участке рельсовой линии и на участке «рельс — земля» представлен на рис. 2.

Из рис. 2 видно, что основной составляющей величин падения напряжения в рельсовой линии и соответственно на участке «рельс — земля» является резкий скачок напряжения при коммутации выпрямительно-инверторного преобразователя электровоза [2].

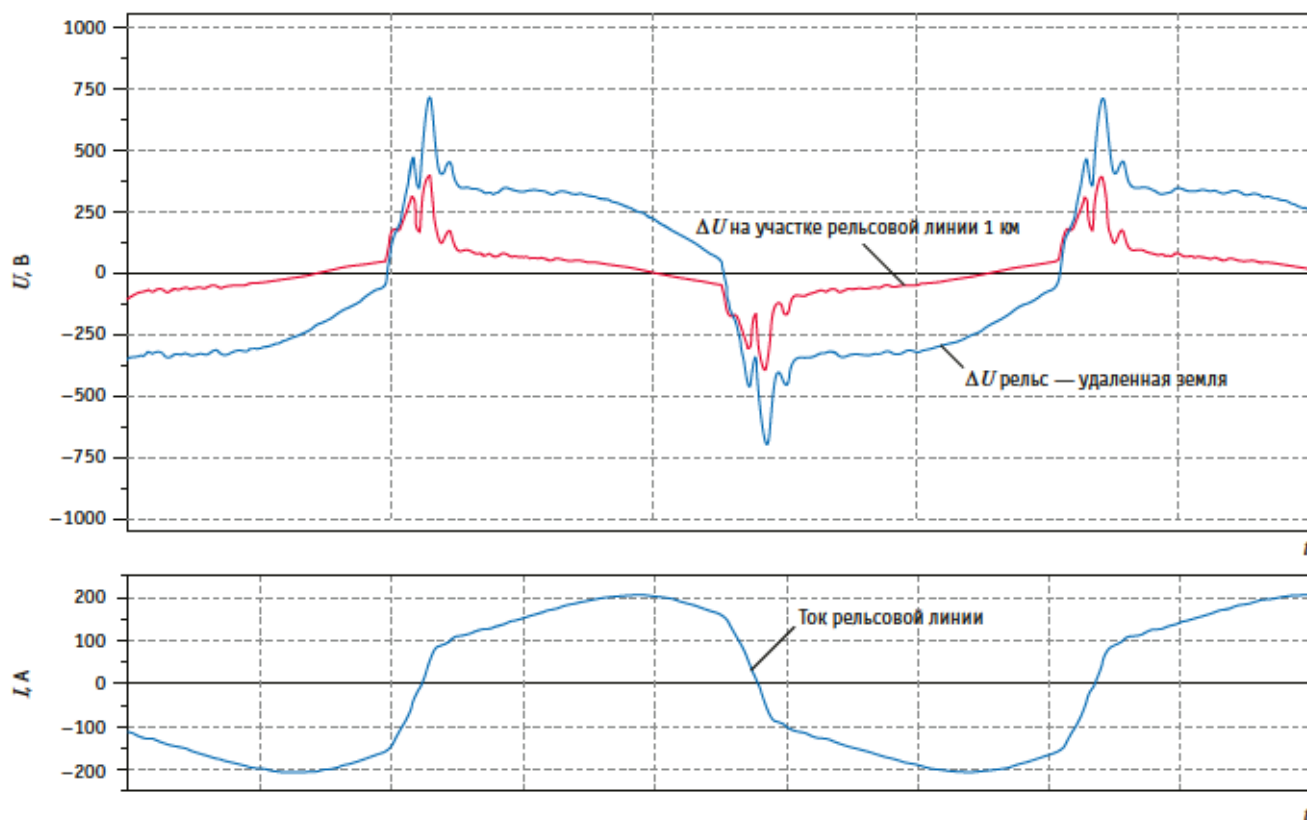


Рис. 2. Фрагмент зарегистрированных значений тока и падений напряжения на участке ДВЖД

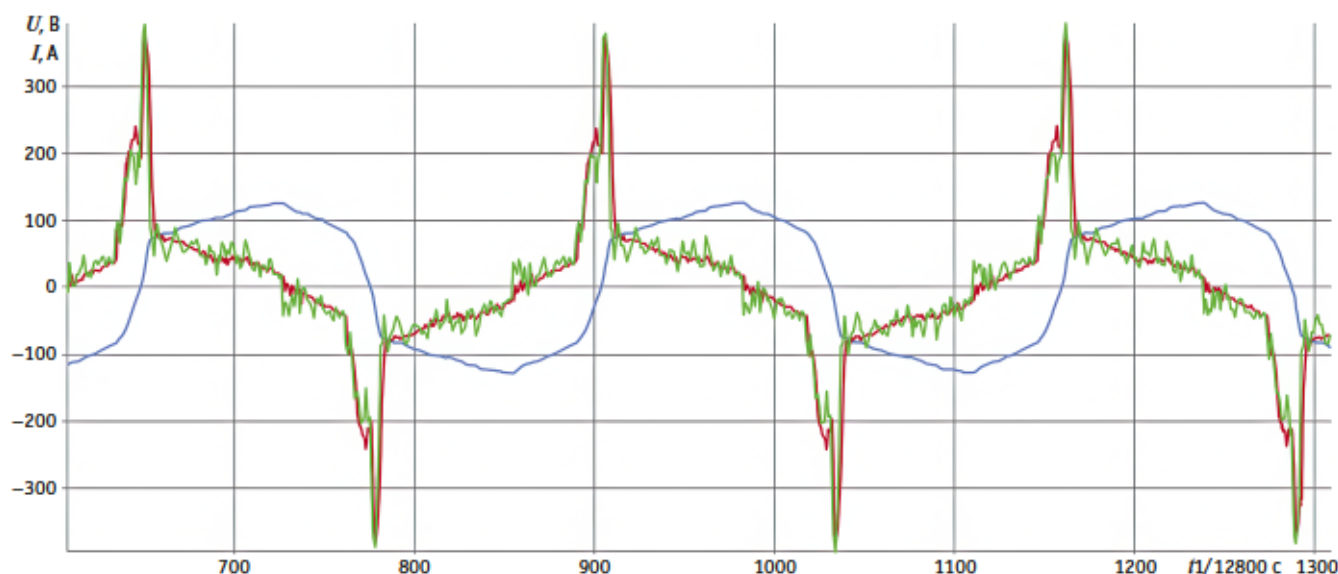


Рис. 3. График функции  $U = f(I)$  участка рельсовой цепи в условиях действующей электромагнитной обстановки: синим цветом показан ток в рельсе; красным — измеренное напряжение в рельсе; зеленым — график функции  $U = f(I)$

Контроль продольных параметров рельсовой линии показал снижение сопротивления при увеличении значений протекающего тока, что не согласуется с данными, опубликованными в других источниках. Это можно объяснить тем, что прежде электромагнитные процессы в рельсах не учитывались.

На основе проведенных исследований была выведена формула для расчета падения напряжения в рельсовых цепях в зависимости от кривой протекающего тока [2]:

$$U = 1,39 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{\partial I}{\partial t} + 0,174 \cdot I - 66,56 \cdot \int_0^t I dt, \quad (2)$$

где  $I$  — ток, протекающий в цепи.

Пример расчета формы огибающей напряжения от формы тока приведен на рис. 3.

Когда причина появления повышенных потенциалов в рельсовых линиях установлена, можно переходить к разработке технических средств по защите оборудования релейных шкафов СЦБ. Прежде всего необходимо составить представление о схеме работы сигнальных точек, подключенных к рельсовой цепи, и определить пути прохода повышенного потенциала через оборудование СЦБ.

Релейный шкаф СЦБ, как устройство, обеспечивающее безопасность движения поездов, относится к потребителям I категории по надежности, которые должны получать электрическую энергию от двух взаимно независимых источников энергии.

Для питания нетяговых потребителей, релейного шкафа СЦБ, могут использоваться территориальные сетевые энергоснабжающие объекты либо собственные источники электроэнергии (например, тяговые подстанции). Непосредственный выбор источников питания для вновь строящихся и реконструируемых объектов осуществляется по критерию минимальных капитальных вложений и эксплуатационных расходов при условии выполнения технических требований [8].

Как правило, основным источником электрической энергии релейного шкафа СЦБ на железных дорогах переменного тока служат воздушная линия СЦБ или линия продольного электропитания (ПЭ) напряжением 6–10 кВ. Резервное питание осуществляется от линии «два провода — рельс» (ДПР) [9]. Эти линии подключаются к разным обмоткам тяговых трансформаторов смежных тяговых подстанций, что позволяет обеспечить требование к независимости источников питания.

Рабочее напряжение релейного шкафа СЦБ — 0,23 кВ [10]. Для понижения напряжения используются комплектные трансформаторные подстанции (КТП) на линиях СЦБ и ПЭ или пониженный трансформатор типа ЗНОМ со стороны линии ДПР.

Проблема повреждения сигнальных точек по причине высоких потенциалов в рельсовой цепи связана с особенностями работы линии ДПР и схемой подключения сигнальной точки к источникам питания и сигнала.

Рельсовая линия одновременно является и рабочим, и защитным заземлением для электрооборудования, обеспечивающего функционирование железнодорожной линии. Подключение к рельсовой сети осуществляется через средние точки дроссель-трансформатора [8].

Таким образом, подключение релейного шкафа СЦБ к рельсовой линии осуществляется минимум в трех точках, это:

- подключение питания от линии ДПР;
- рабочее подключение для передачи и получения сигналов СЦБ;
- защитное заземление корпуса.

Причем проникновение повышенного потенциала из рельсовой линии в релейный шкаф возможно при наличии замкнутого контура. Это обеспечивается схемой питания: подключением устройств с двух сторон к разным заземлителям. Сам релейный шкаф, а также аппаратура линии ДПР в качестве защитного заземления используют рельсовую линию. Комплектная трансформаторная подстанция СЦБ имеет свой



отдельный контур заземления, который подключается к специальному выносному заземлителю. Схема подключения, соответствующая рекомендациям [8, 9], и возможные пути протекания тока представлены на рис. 4. Все подключения оборудования к рельсовой сети осуществляются через среднюю точку дроссель-трансформатора (для упрощения схемы на рис. 4 он не представлен).

Из рис. 4 можно сделать вывод, что существуют три возможных электрических контура для протекания тока, возникающего по причине появления повышенного потенциала в рельсовой цепи:

- через цепь питания и заземления КТП ДПР;
- через искровой промежуток и цепи заземления релейного шкафа СЦБ;
- при пробое дроссель-трансформатора и проходе через приемное реле релейного шкафа СЦБ.

Как видно из рис. 4, проникновение повышенных потенциалов из рельсовой цепи в устройства СЦБ можно было бы значительно уменьшить за счет сокращения количества замкнутых контуров при использовании вместо рельсовой линии выносного защитного заземления электрооборудования. Однако это решение не устраняет всех возможных путей прохода повышенного потенциала через релейный шкаф СЦБ и противоречит рекомендациям «Правил устройства электроустановок» [11], в соответствии с которыми заземление территориально близких электроустановок разных назначений и классов напряжения следует выполнять на общий заземлитель [10].

Кроме того, индивидуальные выносные заземлители усложняют схемы объектов инфраструктуры и могут быть опасны для людей, случайно оказавшихся около заземлителя в момент выравнивания потенциалов между ним и защищаемым объектом при возникновении перенапряжения.

Наиболее оптимальным в данной ситуации является вариант разрыва цепи протекания тока, по которой повышенный потенциал протекает из рельса в цепь заземления КТП СЦБ, т.е. осуществление гальванической развязки. Применение изолирующих трансформаторов предусмотрено правилами проектирования устройств железнодорожной автоматики и телемеханики [9].

Гальваническая развязка выполняется с помощью разделительных трансформаторов. Их ключевое отличие — коэффициент трансформации, равный единице. Существенным недостатком использования разделительных трансформаторов является низкий КПД — около 85 %. Но стоит отметить, что сегодня производители предлагают устройства с большим значением КПД.

К числу основных критериев выбора разделительных трансформаторов относятся: номинальные напряжения первичной и вторичной обмоток, номинальный ток, КПД, сопротивление изоляции, проверочное напряжение между первичной, вторичной обмотками и корпусом. Последний параметр является ключевым в выборе, так как показывает степень защиты цепей. Для рассматриваемого случая изоляционное напряжение должно быть не меньше 3 кВ [9].

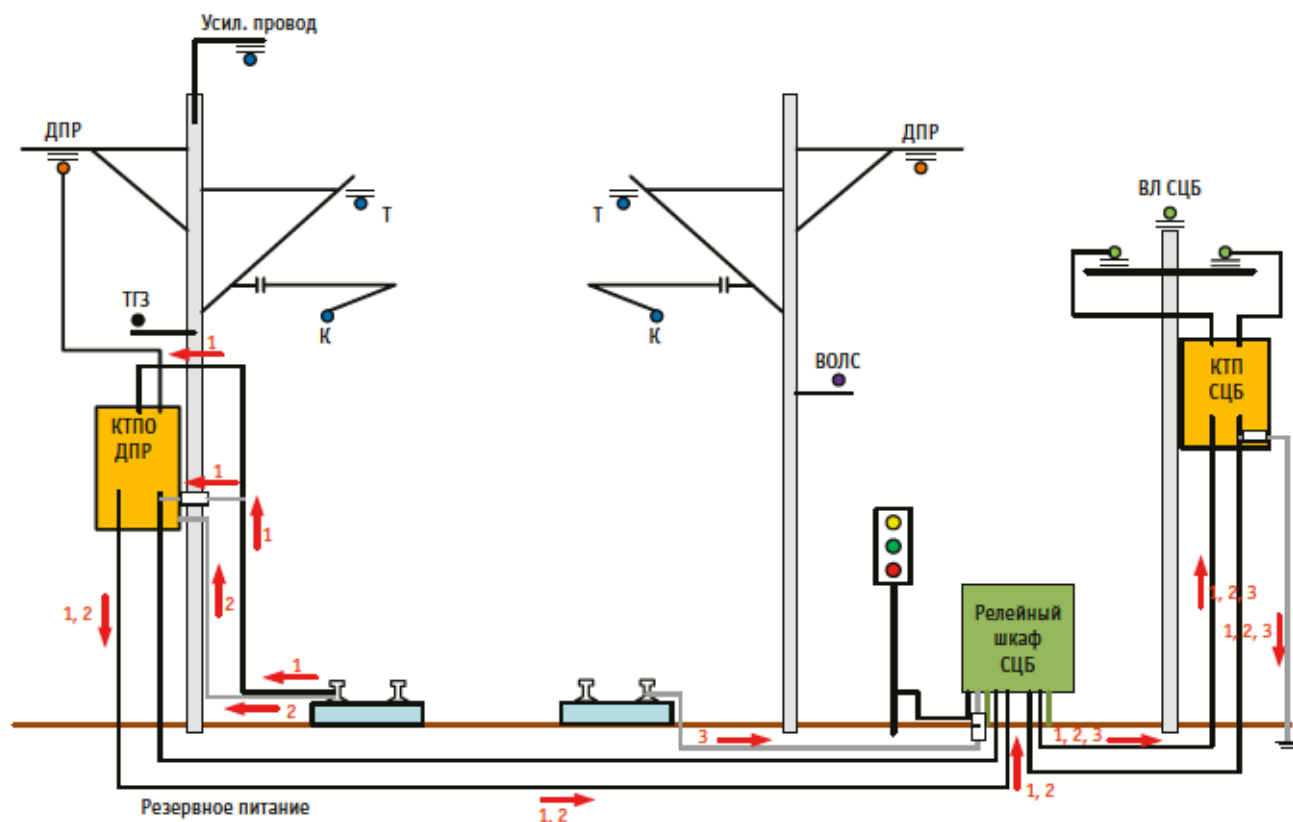


Рис. 4. Прохождение повышенных потенциалов через релейный шкаф СЦБ

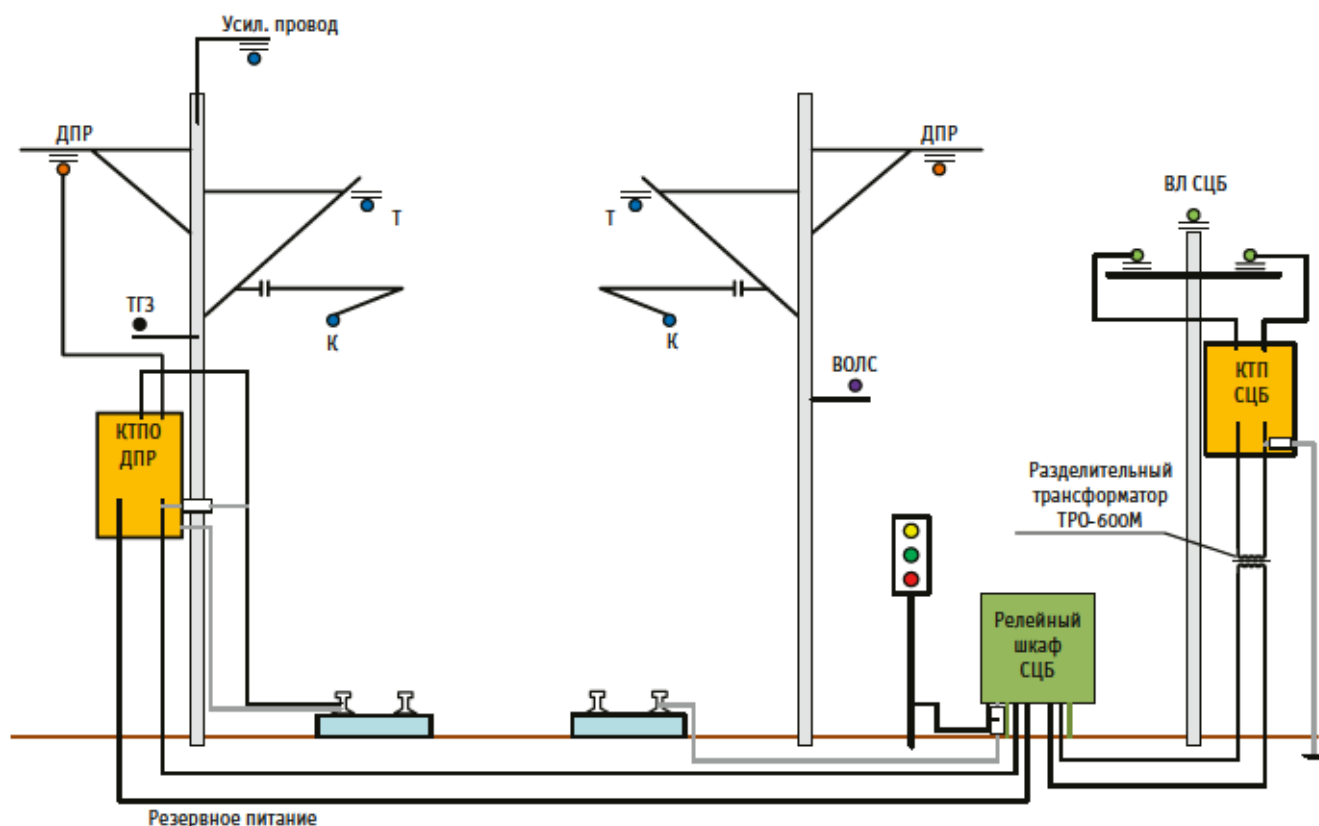


Рис. 5. Структурная схема размещения оборудования для подключения питания релейного шкафа СЦБ и сигнальной точки с установкой разделительного трансформатора

Релейный шкаф СЦБ является однофазной нагрузкой, номинальное напряжение питания устройства равно 220 В. Суммарная нагрузка релейно-контактного шкафа зависит от количества подключаемых светофоров. Номинальную мощность разделительного трансформатора можно выбрать по мощности понижающего трансформатора ЗНОМ 35 в цепи ДПР или понижающего трансформатора КТП СЦБ. Максимальная мощность трансформаторов ЗНОМ 35 составляет 600 ВА.

В данных условиях подходит разделительный трансформатор типа ТРО-600М. Полный перечень технических параметров этого трансформатора приведен на сайте поставщика [12].

Замкнутый контур, образованный цепями подключения к рельсу через дроссель-трансформатор, релейным шкафом СЦБ и выносным заземлителем КТП СЦБ, разрывается. Структурная схема размещения оборудования с установкой разделительного трансформатора представлена на рис. 5.

Экономический эффект от внедрения разделительных трансформаторов будет достигаться за счет снижения экономического ущерба от простоя поездов, вызванного авариями сигнальных точек, а также за счет исключения затрат на замену поврежденного оборудования релейного шкафа СЦБ.

Расчет экономического эффекта от внедрения разделительного трансформатора выполним на примере участка Дальнево-

сточной железной дороги в ценах 2022 г. По данным АО «Трансэнерго», в период с 2017 по 2022 г. на рассматриваемом участке произошло 11 случаев отказа устройств СЦБ, повреждения происходили на 5 сигнальных точках: № 3, 5, 13, 14, 15. По причине аварий сигнальных точек произошла задержка 61 грузового и 3 пассажирских поездов. Перерыв в движении поездов составил 89,6 ч. Экономический ущерб ОАО «РЖД» от простоя поездов составил 3210,418 тыс. руб.

Дополнительно следует учесть стоимость материалов и работы по замене релейного шкафа СЦБ. В данном случае затраты составят 146,1 тыс. руб. в год, а суммарный ущерб — 3365,518 тыс. руб.

Капитальные затраты на установку пяти разделительных трансформаторов с учетом монтажных работ оцениваются в 383,775 тыс. руб., стоимость работ по их обслуживанию — в 3,655 тыс. руб. Итоговый срок окупаемости составит 0,11 лет.

Таким образом, использование разделительных трансформаторов в цепях электроснабжения сигнальных точек позволит разорвать контур тока, возникающий при появлении высоких потенциалов «рельс — земля», и предотвратить повреждения и аварии на сигнальных точках. Установка разделительных трансформаторов на пяти сигнальных точках перегона окупится за 3 месяца.



Сведения об авторах:

**Евгений Юрьевич Тряпкин,**  
кандидат технических наук, доцент кафедры  
«Системы электроснабжения» Дальневосточного  
государственного университета путей сообщения

**Наталья Константиновна Шурова,**  
кандидат технических наук, доцент кафедры  
«Системы электроснабжения» Дальневосточного  
государственного университета путей сообщения

Authors information:

**Evgeny Yu. Tryapkin,**  
PhD in Engineering,  
Associate Professor of Power Supply Systems Department,  
Far Eastern State Transport University

**Natalya K. Shurova,**  
PhD in Engineering,  
Associate Professor of Power Supply Systems Department,  
Far Eastern State Transport University

Литература

1. Федеральная служба государственной статистики. Официальная статистика. Транспорт. URL: <https://rosstat.gov.ru/statistics/transport>.
2. Investigation of the conditions for the occurrence of rail-ground potentials on AC railways / E. Tryapkin, I. Ignatenko, S. Vlasenko [et al.] // *Networked Control Systems for Connected and Automated Vehicles*. Switzerland, 2023. Pp. 893–902.
3. Исследование причин возникновения повышенных потенциалов тяговой рельсовой сети переменного тока путем регистрации данных в режиме единого времени / Е. Ю. Тряпкин, И. В. Игнатенко, С. А. Власенко, Н. К. Шурова // *Транспорт Урала*. 2023. № 1 (76). С. 120–125. DOI: 10.20291/1815-9400-2023-1-120-125.
4. Фигурнов Е. П., Стороженко Д. Е. Электрическое сопротивление рельсов // *Транспорт-2004 : труды Всероссийской научно-практической конференции*. Ростов-на-Дону : РГУПС, 2004. С. 169–170.
5. Нейман Л. Р. Поверхностный эффект в ферромагнитных телах. Москва ; Ленинград : Госэнергоиздат, 1949. 190 с.
6. Фигурнов Е. П. Сопротивление электротяговой сети // *Электричество*. 1997. № 5. С. 23–29. ISSN 0013-5380.
7. Шаманов В. И., Ведерников Б. М., Шульц В. А. Электрические и магнитные параметры рельсовых линий для сигнального и тягового токов // *Вестник КазАТК*. 2016. № 2 (97). С. 43–51. ISSN 1609-1817.
8. СП 226.1326000.2014 Электроснабжение нетяговых потребителей. Правила проектирования, строительства и реконструкции. Москва, 2014. 83 с.
9. СП 235.326000.2015 Железнодорожная автоматика и телемеханика. Правила проектирования. Москва, 2015. 184 с.
10. ГОСТ 29322–2014. Напряжения стандартные. Москва : Стандартинформ, 2015. 13 с.
11. Правила устройства электроустановок. Москва : Омега-Л, 2009. 266 с.
12. Трансформаторы разделительные промышленные. URL: <https://enzs.ru/catalog/transformatory-razdelitelnye-promy/>.

References

1. Federal Service for State Statistics. Official statistics. Transport. URL: <https://rosstat.gov.ru/statistics/transport>. (In Russian).
2. Tryapkin E., Ignatenko I., Vlasenko S. [et al.]. Investigation of the conditions for the occurrence of rail-ground potentials on AC railways. *Networked Control Systems for Connected and Automated Vehicles*. Switzerland, 2023. Pp. 893–902.
3. Tryapkin E. Yu., Ignatenko I. V., Vlasenko S. A., Shurova N. K. Study of causes of increased potentials of alternating current traction rail network by registration of data in united time mode. *Transport of the Urals*. 2023. No. 1 (76). Pp. 120–125. DOI: 10.20291/1815-9400-2023-1-120-125. (In Russian).
4. Fignurnov E. P., Storozhenko D. E. Electrical resistance of rails. *Transport-2004 : proceedings of All-Russian scientific and practical conference*. Rostov-on-Don : RSTU, 2004. Pp. 169–170. (In Russian).
5. Neyman L. R. Surface effect in ferromagnetic bodies. Moscow ; Leningrad : Gosenergoizdat, 1949. 190 p. (In Russian).
6. Fignurnov E. P. Resistance of power traction network. *Electricity*. 1997. No. 5. Pp. 23–29. ISSN 0013-5380. (In Russian).
7. Shamanov V. I., Vedernikov B. M., Shults V. A. Electric and magnetic parameters of rail lines for signaling and traction current. *Bulletin of KazATK*. 2016. No. 2 (97). Pp. 43–51. ISSN 1609-1817. (In Russian).
8. SP 226.1326000.2014 Electricity supply to non-traction consumers. Rules of design, construction and reconstruction. Moscow, 2014. 83 p. (In Russian).
9. SP 235.326000.2015 Railway automation and telemechanics. Design rules. Moscow, 2015. 184 p. (In Russian).
10. GOST 29322–2014. Standard voltages. Moscow : Standardinform, 2015. 13 p. (In Russian).
11. Electrical installation rules. Moscow : Omega-L, 2009. 266 p. (In Russian).
12. Industrial separation transformers. URL: <https://enzs.ru/catalog/transformatory-razdelitelnye-promy/>. (In Russian).

Подписка на 2026 год.  
Периодичность — 4 номера в год.

✂

ф. СП-1

АБОНЕМЕНТ

на 

газету

 журнал

46463

(индекс издания)

Транспорт Урала

(наименование издания)

Количество комплектов:

на 2026 год по месяцам:

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

Куда

(почтовый индекс)

(адрес)

Кому

(фамилия, инициалы)

ДОСТАВОЧНАЯ КАРТОЧКА

			на <div>газету</div> журнал	46463	(индекс издания)								
ПВ	место	литер											
Транспорт Урала													
(наименование издания)													
Стои- мость	подписки	руб. ____ коп.		Количество комплектов:									
	переадресовки	руб. ____ коп.											
на 2026 год по месяцам:													
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
Куда													
			(почтовый индекс)									(адрес)	
Кому													
(фамилия, инициалы)													



Научно-технический журнал «Транспорт Урала»

DOI:10.20291/1815-9400

№ 4 (87), 2025 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

Главный редактор:

Александр Геннадьевич Галкин

Научный редактор:

Александр Эрнстович Александров

Выпускающий редактор:

Елена Семеновна Пупова,

тел. (343) 221-23-90, 8-912-61-07-229,

e-mail: EPupova@usurt.ru

Верстка и дизайн:

Андрей Викторович Трубин

Автор фотографии на обложке:

Елена Геннадьевна Филиппова

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 29.12.2025

Выход в свет 30.12.2025

Тираж 250 экз. (1-й з-д 1–50)

Формат 60×90/8

Цена 747 руб.

Изготовлено в ИБК УрГУПС,

620034, Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66

Заказ № 33

© ФГБОУ ВО «Уральский государственный университет путей сообщения», 2025

