

**МОДЕЛЬ ОБСЛУЖИВАНИЯ ПРИГОРОДНЫХ
ПАССАЖИРОПОТОКОВ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО И АВТОМОБИЛЬНОГО
ВИДОВ ТРАНСПОРТА**

**ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА
СНИЖЕНИЯ ТАРЫ ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ**

**ФОРМИРОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ
ЛОГИСТИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ В СИСТЕМЕ
ТЕРМИНАЛЬНЫХ КОНТЕЙНЕРНЫХ
ПЕРЕВОЗОК**

**УСТОЙЧИВОСТЬ ГОРОДСКОЙ
ПАССАЖИРСКОЙ АВТОТРАНСПОРТНОЙ
СИСТЕМЫ**

**РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ РАБОТЫ RFID-СИСТЕМЫ
КОНТРОЛЯ ИЗОЛЯТОРОВ
В ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ**





ДОРОГОЙ НАШ ЧЕЛОВЕК

К юбилею Александра Васильевича Ефимова (1940–2016)

18 марта УрГУПС отметил 85-летие Александра Васильевича Ефимова – дорогого для университета человека, ученого, педагога, воспитателя, руководителя, а еще создателя и первого главного редактора журнала «Транспорт Урала». В этот день открылась выставка, посвященная его жизни и деятельности, а лаборатории «Контактная сеть и линии электропередачи» было присвоено имя Александра Васильевича Ефимова.

Поступив учиться в наш вуз в 1958 году, Александр Васильевич навсегда остался верен своей alma mater, достойно пройдя длинный и порой тернистый путь от студента до ректора и президента университета.

Во времена ректорства, которое пришлось на очень трудные и для страны, и для нашего вуза годы (1990-е – начало 2000-х), Александр Васильевич благодаря своим уникальным организаторским способностям, редчайшему трудолюбию, умению сплотить команду единомышленников совершил, казалось бы, невозможное: не допустил упадка университета, а сделал его одним из лучших транспортных вузов России, в котором не только обучаются инженерным специальностям, но и серьезно занимаются наукой, из стен которого выходят не только «технари», но и всесторонне образованные личности.

Про таких людей, как Александр Васильевич Ефимов, говорят: редкий бриллиант. Он был верным и благодарным учеником, внимательным и чутким педагогом, талантливым ученым, выдающимся руководителем, надежным товарищем, мудрым человеком. А мудрость, собственно, и есть сочетание одаренности, благородства, интеллигентности, достоинства, преданности, скромности, доброты...

...Есть люди, которые после своего ухода остаются только в редких воспоминаниях, а есть люди, которые навсегда остаются жить в наших сердцах, как Александр Васильевич Ефимов...

Редколлегия журнала «Транспорт Урала»

Научно-технический журнал «Транспорт Урала»

DOI:10.20291/1815-9400

№ 1 (84), 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:

Светлана Николаевна Наймушина

Автор фотографии на обложке:

Мария Александровна Могиленских

Журнал включен ВАК в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук

Подписано в печать 31.03.2025

Выход в свет 10.04.2025

Тираж 250 экз. (1-й з-д 1–50)

Формат 60×90/8

Цена 706,80 руб.

Изготовлено в ИБК УрГУПС,

620034, Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66

Заказ № 12

© ФГБОУ ВО «Уральский государственный университет путей сообщения», 2025

TRANSPORT

SCIENTIFIC JOURNAL OF THE URALS

МЕЖДУНАРОДНЫЙ РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

INTERNATIONAL EDITORIAL BOARD

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

EDITORIAL BOARD

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

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ТРАНСПОРТА

С. П. Вакуленко, Н. Ю. Евреенова.

Модель обслуживания пригородных пассажиропотоков при взаимодействии железнодорожного и автомобильного видов транспорта 3

ПОДВИЖНОЙ СОСТАВ И ТЯГА

А. П. Буйнов, А. С. Баитов, Е. В. Федоров, А. Т. Шарапов.

Бортовая система контроля подшипниковых узлов моторвагонного подвижного состава 9

ВАГОНЫ И ВАГОННОЕ ХОЗЯЙСТВО

А. В. Смольянинов, К. М. Колясов.

Параметрическая оценка снижения тары грузовых вагонов 16

Н. Ф. Сирина, М. А. Кузнецов, В. Б. Сverdlov, А. В. Ключин.

Вопросы стандартизации и основные направления развития научных исследований в области сохранности вагонного парка 25

ГРУЗОВЫЕ И ПАССАЖИРСКИЕ ПЕРЕВОЗКИ

Е. Д. Псеровская, Р. А. Овчинников.

Исследование влияния составности поезда на величину потерь от выдувания мелкодисперсных сыпучих грузов при перевозке в полувагонах маршрутными отправлениями 33

О. П. Югрин, Л. С. Жарикова.

Определение величины эксплуатационного парка локомотивов в условиях закрытия перегонов на длительный период 40

АВТОМАТИКА, ТЕЛЕМЕХАНИКА И СВЯЗЬ

Р. Р. Юсупов, А. С. Хохрин.

Анализ условий распространения сигнала АЛСН в рельсовой линии в процессе движения поезда 45

Р. Р. Юсупов, А. С. Хохрин.

Оценка потенциальных возможностей оптимального приема сигналов АЛСН 52

ТРАНСПОРТНО-ЛОГИСТИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

О. В. Москвичев, Е. Е. Москвичева, Д. В. Васильев.

Развитие логистики перевозки грузов контейнерными поездами: новые аспекты, требования, решения 60

Д. И. Кочнева, А. В. Сметанина.

Формирование оптимальных логистических цепей в системе терминальных контейнерных перевозок 66

АВТОМОБИЛЬНЫЙ ТРАНСПОРТ

А. О. Тишкова, К. А. Паршакова, Н. С. Бондаренко, Н. В. Якунина, Н. Н. Якунин.

Устойчивость городской пассажирской автотранспортной системы 72

В. И. Карагодин, А. Ю. Горелов.

Обоснование стратегий взаимодействия предприятий по эксплуатации машин с предприятиями технического сервиса в автомобильно-дорожном комплексе 78

А. А. Комяков, А. С. Голубков, Ю. В. Заренкова.

Кластеризация как метод оптимального распределения зарядных станций для электромобилей: подходы и результаты 83

Е. В. Сорокина, Е. В. Голов, С. С. Евтуков.

Интегральная оценка состояния безопасности дорожного движения регионального уровня (на примере Удмуртской Республики) 89

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ

Т. А. Несенюк.

Результаты экспериментальных исследований работы RFID-системы контроля изоляторов в опытно-промышленной эксплуатации 97

О. А. Лукьянова, О. А. Сидоров, А. В. Тарасенко, И. Е. Чертков.

Совершенствование методов исследований консолей контактных подвесок электрических железных дорог 102

GENERAL TRANSPORT PROBLEMS

S. P. Vakulenko, N. Yu. Evreenova.

Model of servicing suburban passenger flows in interaction of railway and motor transport 3

ROLLING STOCK AND TRACTION

A. P. Buynosov, A. S. Baitov, E. V. Fedorov, A. T. Sharapov.

On-board monitoring system for bearing units of motive-coach fleet stock 9

RAILWAY CARS AND CARRIAGE EQUIPMENT

A. V. Smolyaninov, K. M. Kolyasov.

Parametric assessment of freight car container reduction 16

N. F. Sirina, M. A. Kuznetsov, V. B. Sverdlov, A. V. Klyushin.

Standardization issues and the main directions of scientific research development in the field of car fleet safety 25

CARGO AND PASSENGER TRANSPORTATION

E. D. Pserovskaya, R. A. Ovchinnikov.

Research of the influence of train composition on the amount of losses from blowing out of fine bulk cargoes during their transportation in gondola cars by block train shipment 33

O. P. Yugrina, L. S. Zharikova.

Determination of size for operational fleet of locomotives in conditions of closure of the runs for a long period 40

AUTOMATION, TELEMCHANICS AND COMMUNICATION

R. R. Yusupov, A. S. Khokhrin.

Analysis of propagation conditions for signal of CALS in a rail line during train movement 45

R. R. Yusupov, A. S. Khokhrin.

Assessment of the potential for optimal signal reception of CALS 52

TRANSPORT AND LOGISTICS PROCESSES

O. V. Moskvichev, E. E. Moskvicheva, D. V. Vasilyev.

Development of cargo transportation logistics by container trains: new aspects, requirements, solutions 60

D. I. Kochneva, A. V. Smetanina.

Formation of optimal logistics chains in terminal container transportation system 66

MOTOR TRANSPORT

A. O. Tishkova, K. A. Parshakova, N. S. Bondarenko, N. V. Yakunina, N. N. Yakunin.

Sustainability of urban passenger transportation system 72

V. I. Karagodin, A. Yu. Gorelov.

Substantiation of strategies for interaction of enterprises operating machines with technical service enterprises in automobile and road construction complex 78

A. A. Komyakov, A. S. Golubkov, Yu. V. Zarenkova.

Clustering as a method for optimal distribution of charging stations for electric vehicles: approaches and results 83

E. V. Sorokina, E. V. Golov, S. S. Evtyukov.

Integrated assessment for state of road safety at the regional level (using the example of the Udmurt Republic) 89

ELECTRIC SUPPLY

T. A. Nesenjuk.

Results of experimental studies of RFID insulator control system in pilot operation 97

O. A. Lukyanova, O. A. Sidorov, A. V. Tarasenko, I. E. Chertkov.

Improving research methods for console contact suspensions of electric railways 102

Научная статья

УДК 656.224

Модель обслуживания пригородных пассажиропотоков при взаимодействии железнодорожного и автомобильного видов транспорта

Сергей Петрович Вакуленко¹, Надежда Юрьевна Евреенова¹¹ Российский университет транспорта (МИИТ), Москва, Россия

Model of servicing suburban passenger flows in interaction of railway and motor transport

Sergey P. Vakulenko¹, Nadezhda Yu. Evreenova¹¹ Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia

Аннотация

Развитие инфраструктуры транспортно-пересадочного узла необходимо, чтобы обеспечить растущий спрос на пассажирские услуги и не допустить инфраструктурных ограничений технологической модернизации транспорта в целом. Минимизировать время пересадки пассажира между взаимодействующими в транспортно-пересадочном узле видами транспорта можно за счет согласования контактных графиков их работы. Для этого в первую очередь требуется решить задачу по определению режимов взаимодействия данных видов транспорта. В статье рассматривается разработанная авторами модель обслуживания пригородных пассажиров железнодорожным и автомобильным транспортом.

Ключевые слова: транспортно-пересадочный узел, пригородные пассажирские перевозки, пассажиропоток, железнодорожный транспорт, автомобильный транспорт, моделирование

Abstract

Development of infrastructure of transport hub is currently necessary to meet the growing demand for passenger services and to avoid infrastructural restrictions on technological modernization of transport in general. Minimizing passenger transfer time between interacting modes of transport at a transfer hub can be achieved by coordinating the contact schedules of this transport's modes. To do this, first of all, it is necessary to solve the problem of determining modes for interaction of transport's types. In the article authors consider the developed model for servicing suburban passengers by railway and motor transport.

Keywords: transport hub, suburban passenger transfer, passenger flow, railway transport, motor transport, modeling

DOI: 10.20291/1815-9400-2025-1-3-8

Основа эффективного взаимодействия железнодорожного и автомобильного транспорта для обеспечения пригородных пассажирских перевозок заключается в пропорциональном техническом оснащении обеих подсистем. Путевое развитие пассажирских и зонных станций, подвижной состав железнодорожного транспорта должны быть соразмерны по величине аналогичным параметрам устройств автомобильного транспорта. Для расчета потребных мощностей всех устройств и сооружений необходимо использовать соответствующую модель функционирования пассажиропотоков в такой корпоративной межтранспортной среде. Поэтому цель авторов состояла в разработке модели обслуживания пригородных пассажиров железнодорожным и автомобильным транспортом.

Пусть некоторый вид транспорта А порождает поток Π пассажиров, нуждающихся в обслуживании, т. е. этот поток должен быть перемещен из области d_0 в новую область d_1 . Движение потока происходит с некоторой скоростью V_0 . Второй вид транспорта В поглощает этот поток. Модель реализует схему прохождения потока Π из d_0 в d_1 , при которой независимо от характеристик самого потока (интенсивности, мощности, структуры) обеспечивается постоянная скорость движения от места порождения (места высадки из вида транспорта А) к месту погашения (месту посадки в вид транспорта В). Так как рассматривается техническое оснащение взаимодействующих подсистем двух видов транспорта, то непосредственный процесс перевозки этими видами транспорта в данную модель не входит [1].

Поток движется по определенному каналу, геометрия которого также является модельной характеристикой. Все пассажиры потока Π имеют одну и ту же транспортную мотивацию: в данный момент, т. е. в течение модельного времени $L(d_1 - d_0)/V_0$, они желают покинуть область d_0 и прибыть в область d_1 . Для рассматриваемой модели это означает, что все пассажиры потока Π неразличимы, а сам поток представляет собой однородный состав элементов. Именно поэтому подобную модель называют моделью с однородным транспортным потоком. Ее особенность состоит в том, что скорость движения потока от области d_0 к области d_1 постоянна и не зависит от его мощности

(интенсивности). Практически это означает, что пассажиры идут пешком по переходам и тоннелям всегда примерно с одинаковой скоростью. При незначительной мощности потока наблюдаются существенные интервалы между отдельными участниками данного процесса. Эти интервалы сокращаются при усилении интенсивности (уплотнении потока) до некоторой критической величины. В модели поток обезличен по отдельным пассажирам и представляет собой некоторый сплошной модельный сгусток, равномерно заполняющий разрешенный канал определенной формы, соединяющий области d_0 и d_1 . Как и любая другая, рассматриваемая модель имеет диапазон параметров, в пределах которых она работоспособна [2]. Считается, что определяющим для надежной и устойчивой работы модели будет интенсивность потока $I_{\Pi} = (I_{\Pi}^{\min}, I_{\Pi}^{\max})$. В этих рамках модельный поток можно рассматривать как бесструктурный, однородный, движущийся по выделенному каналу с одной и той же скоростью V_0 .

Разрешенный диапазон интенсивностей потока I_{Π} называется множеством потоковых мощностей (МПМ). Выдвинута рабочая гипотеза, согласно которой МПМ является дискретным, а общее число отдельных счетных позиций МПМ зависит от конкретных условий его перемещения из d_0 в d_1 . Одно из таких условий — наличие точек разделения потока на пути достижения транспорта пересадки пригородными пассажирами потока Π . Неразличимость потока в диапазоне $(I_{\Pi}^{\min}, I_{\Pi}^{\max})$ не означает, что при увеличении его мощности в указанном диапазоне не будут происходить определенные внутренние изменения, которые для модели в целом являются незначительными, но для некоторой части пассажиров Π_k данного потока могут стать существенным негативным последствием: например, на пути (d_0, d_1) имеется выход, не ведущий к остановочным пунктам городского транспорта. При величине потока $\Pi_k < \Pi$ и при $I_{\Pi}^{\min} < I_k < I_{\Pi}^{\max}$ наступает момент, когда на пути движения основного потока (Π — Π_k) начинают возникать заторы. В модели поток остается однородным, так как $I_k < I_{\Pi}^{\max}$, но в МПМ появляется элемент Π_k . При дальнейшем увеличении потока $\Pi_k < \Pi_m < \Pi$ и $I_k < I_m < I_{\Pi}^{\max}$ начинает проявляться новый внешний фактор, на который требуется обратить внимание. И опять в МПМ добавляется новый элемент Π_m и т. д. — до достижения $\Pi_j = \Pi$ и $I_j = I_{\Pi}^{\max}$. Множество $\{\Pi_k, \Pi_m, \dots\}$, элементы которого привязаны к точкам пограничного состояния среды, окружающей поток Π , требует определенных технических решений, позволяющих при таком дискретном наборе промежуточных точек интенсивностей потока работать во всем диапазоне $(I_{\Pi}^{\min}, I_{\Pi}^{\max})$ с моделью обезличенного однородного потока.

Анализ модели указывает на двузначность модельного потока [3]. С одной стороны, он непрерывный, плавно переходящий от области d_0 к области d_1 , а с другой — дискретный, фиксированность которого проявляется при достижении определенных точек мощности потока Π_k, Π_m . Согласно исследованиям конкретных пассажиропотоков в крупных транспортных узлах, значения дискретности примерно одинаковы на различных железнодорожных пассажирских и зонных станциях, а множество потоковых мощностей представляет собой ряд $\{\Pi_k \pm \delta_k, \Pi_m \pm \delta_m, \dots\}$, в котором δ_i указывают на отклонения

i -го фиксированного потока. Значения этих отклонений составляют до $0,01(\Pi_k \vee \Pi_m \vee \dots)$. В результате имеем динамическую модель обслуживаемого пассажиропотока, которая описывает процесс передачи потока Π с одного вида транспорта на другой, обеспечивая подстройку окружения (технического оснащения) таким образом, что режим передачи данного потока оказывается самым эффективным и максимально использующим все преимущества каждого из взаимодействующих видов транспорта.

В процессе разработки модели непрерывного однородного потока с дискретными точками встает особая задача по определению канала движения пассажиров [4]. Канал может быть прямолинейным, извилистым, переходящим через несколько уровней, сужающимся и расширяющимся — его геометрия и размеры зависят от реальных условий. Однако при постановке задачи оптимизации, связанной в данном случае с поиском эффективной стратегии транспортного обслуживания, необходимо определить рациональные параметры канала. Решая задачу на конкретном транспортном узле, можно моделировать прообраз реального обслуживания пригородного пассажиропотока, а результаты работы модели и полученные характеристики сравнивать с существующим техническим оснащением, формой и параметрами каналов движения потоков [5], что, в свою очередь, дает возможность разработать для этого транспортного узла рекомендации по оптимизации обслуживания пригородных пассажиропотоков.

Следует отметить и такую особенность реальных транспортных потоков — они всегда имеют достаточно разветвленную структуру путей движения, связанных целой сетью пересекающихся, сливающихся и разделяющихся каналов [6]. В модели однородного потока с дискретными точками рассматривается один-единственный поток, который имеет узел зарождения (область d_0) и узел погашения (область d_1). Поэтому модельную схему с одним потоком Π следует многократно повторять, чтобы привести в соответствие с реальными каналами движения многих потоков Π_i . Множественное повторение одноканального однородного потока с дискретными точками и увязкой по областям d_0 и d_1 позволяет сформировать модельный образ реального потока, разветвленного по отдельным каналам и областям зарождения и погашения. Данная модель определяет *мультиплицированный однородный поток с дискретными точками*.

Исследования различных пригородных пассажиропотоков с участием двух видов транспорта показывают, что из сети взаимовязанных потоков можно выделить основной поток Π_0 , который характеризуется одной связью $d_0 \rightarrow d_1$ и составляет не менее 75–80 % общего потока данной сети [7]. Этот поток относительно устойчив по величине и интенсивности, легко прогнозируется по размеру, так как жестко подвязан под графики постоянного во времени прибытия и отправления подвижного состава. Особенность такого потока — слабая чувствительность на любые другие влияющие факторы, кроме связанного графика движения поездов и средств перевозки пассажиров автомобильным и иными видами транспорта. Однако подобные сети встречаются достаточно редко и не являются объектом исследования авторов.

Строго говоря, множественная модель пассажиропотоков — это не синтез однородных единичных потоков [8]. Переход к комплексному потоку (сложному, взаимосвязанному, имеющему новые характеристики, не присущие сумме единичных) требует анализа $\sum \Pi_i$ как единой системы отдельных i -х ветвей. Ключевыми позициями каждой ветви Π_i являются: пункт зарождения [причем необязательно область d_{0i} , это может быть точка слияния $(n_k + n_s)$], точка разделения ветвей $(n_x - n_y)$ и пункт погашения (не только область d_{1i}) (рис. 1).

Согласно представленной на рис. 1 схеме, исходный пассажиропоток П(Ж) имеет область зарождения d_{01} , точки разделения r_1, r_2 и точку слияния s_1 . Такой поток называется смешанным, поскольку присутствуют точки разделения и точки слияния. Поглощаемый поток характеризуется наличием только точек разделения, накапливаемый поток имеет только точки слияния. Канал следования потока достаточно разветвленный.

Если уподоблять модель физическим аналогиям, можно считать, что на пути движения потока встречаются ламинарные (спокойные, строго направленные) и турбулентные (разделяющиеся или сливающиеся) области. Ламинарный поток имеет постоянную ширину канала b_l и длину пути движения l_l . Тогда пассажиропоток некоторого ламинарного отрезка $\Pi_l = I_l \cdot t_l$ (здесь I_l — интенсивность движения потока через некоторое сечение, чел./с; t_l — время движения по длине l_l).

$$I_l = n_{ед} \cdot b_l \quad (1)$$

где $n_{ед}$ — количество пассажиров в сечении 1 м ширины канала.

Отсюда

$$\Pi_l = n_{ед} \cdot b_l \cdot t_l \quad (2)$$

В зависимости от плотности потока количество пассажиров в сечении различается (от 1 до 3 чел.). Поэтому вводится коэффициент плотности α_n :

$$\Pi_l = \alpha_n \cdot n_{ед} \cdot b_l \cdot t_l \quad (3)$$

Для того чтобы определить полный пассажиропоток смешанного потока,

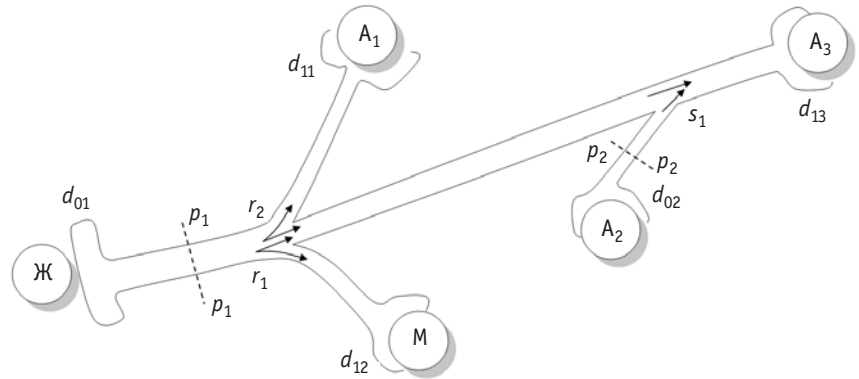


Рис. 1. Смешанный комплексный пассажиропоток с несколькими пунктами зарождения и погашения:

Ж — железнодорожный транспорт; A_1, A_2, A_3 — пункты остановки автомобильного транспорта; М — метрополитен; d_{01}, d_{02} — области зарождения пассажиропотоков; d_{11}, d_{12}, d_{13} — области погашения пассажиропотоков; r_1, r_2 — точки разделения пассажиропотока; s_1 — точка слияния пассажиропотоков; p_1 — и p_2 — сечение пассажиропотоков

следует выбрать максимальное сечение b_l^{\max} ламинарных потоков при условии, что все пассажиры комплексного потока проходят через это сечение. Если все пассажиры не проходят через данное сечение, то полный пассажиропоток складывается из нескольких. Так, для рис. 1:

$$\sum \Pi = n_{ед} \cdot t_l (\alpha_{n1} \cdot b_{l1} + \alpha_{n2} \cdot b_{l2}), \quad (4)$$

где параметры слагаемых соответствуют потоку, проходящему через сечение p_1 — p_1 и p_2 — p_2 .

Исследования показали, что между коэффициентом плотности потока α_n и шириной потока, проходящего через соответствующее сечение b_l , существует корреляционная связь, а именно

$$\alpha_n = f\left(\frac{1}{b_l}\right).$$

В пиковые периоды независимо от ширины сечения можно принимать $n_{ед}$ равным 3 пасс./с.

Турбулентные потоки проходят не только через точки r_i и s_i , но и через более обширные прилегающие площадные полигоны, в пределах которых сохраняются вихревые движения с разделением или слиянием потоков. Как показали исследования авторов, области разделения больше, чем области слияния (пассажиры раньше стараются выйти к стороне отходящего канала, который им нужен, и быстрее влиться в общий поток после объединения двух слагающих потоков). Кро-

ме того, выведены следующие корреляционные зависимости:

$$l_r = 4 \text{ м при } \Pi_r = 0,3 \Pi_r^+;$$

$$l_r = 6 \text{ м при } \Pi_r = 0,5 \Pi_r^+;$$

$$l_r = 7 \text{ м при } \Pi_r > 0,5 \Pi_r^+;$$

где Π_r — величина отходящего пассажиропотока; l_r — область разделения; Π_r^+ — доля отходящего пассажиропотока до разделения.

Для сливающихся потоков аналогичных особенностей не обнаружено, в среднем $l_s = 3,5$ м. Скорость движения пассажиров в турбулентных потоках снижается до 2 км/ч. Турбулентность пассажиропотоков характерна для сложных пересекающихся каналов движения. Типичная схема таких потоков — пешеходный тоннельный переход в районе пассажирской станции, обеспечивающий перемещение пассажиропотоков с железнодорожного транспорта на автомобильный (рис. 2).

При наличии устойчивых ламинарных движений на участках выраженного направленного потока ($l_{л1}, l_{л2}, l_{л3}$) наблюдается большое количество областей перемешивания потока (во всех точках слияния и разделения). Особенность таких схем — значительная диспропорция между потоком, обслуживаемым железнодорожным транспортом, и потоком, обслуживаемым без его участия [9]. Так, при 5 входах-выходах на посадку к поездам общий обслуживаемый поток ($A_i \rightarrow Ж, Ж \rightarrow A_i$) составляет 50 тыс. пасс./сут. В то же время пассажиропоток $A_{1,2,3} \rightarrow A_{4,5}$ достигает 250 тыс. пасс./сут. Однако

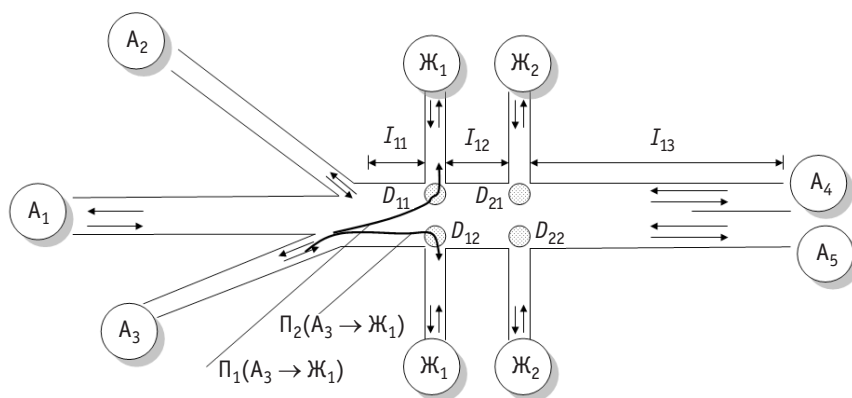


Рис. 2. Турбулентные пассажиропотоки при множественных входах-выходах на посадку железнодорожного и автомобильного транспорта

подобные схемы применяются в основном для смешанных (пригородных, местных и дальних) железнодорожных перевозок, и выделить из них пригородно-городские не представляется возможным. Как показывают некоторые экспертные оценки, схемы с турбулентными потоками по множественным входам и выходам с участием только пригородных пассажиров железнодорожного транспорта и городских пассажиров целесообразны при соотношении

$$\frac{\Pi(A_i \rightarrow Ж, Ж \rightarrow A_i)}{\Pi(A_{ijk} \leftrightarrow A_{st})} > 1/3 \Pi(A_i \rightarrow Ж, Ж \rightarrow A_i) > 50 \text{ тыс. пасс./сут.} \quad (5)$$

Гипотеза о том, что величина пассажиропотока, движущегося по определенному каналу, не зависит от длины канала, при более глубоком изучении оказывается несостоятельной. Если по каналу движется исключительно ламинарный поток, то полностью справедлива формула (1), однако в потоках, которые разветвляются и сливаются, значительную долю составляют пассажиропотоки с более низкими скоростями движения (в среднем на 1 км/ч ниже, чем в ламинарных потоках). Скорость движения пассажиров, попадающих в области турбулентного потока, замедляется, и если таких точек турбулентности достаточно много, а длина канала невелика, то его пропускная способность тоже будет низкой. Минимальная длина канала движения пассажиропотока определяется следующим образом:

$$l_k^{\min} = n_r l_r + n_s l_s + 10(n_r + n_s), \quad (6)$$

где n_r, n_s — соответственно количество точек разделения и слияния движения пассажиропотока по каналу; 10 м — технологическое расстояние между отдельными смежными точками.

Для схемы, представленной на рис. 1, $l_k^{\min} \approx 50$ м. При выделенных турбулентных потоках (см. рис. 2) рассчитать минимальную длину потока сложнее, поскольку в этих случаях перемешивается несколько турбулентных потоков:

$$[\Pi(A_4) \rightarrow \Pi(Ж_2), \Pi(Ж_2) \rightarrow \Pi(A_3), \Pi(Ж_1) \rightarrow \Pi(A_1), \Pi(A_2) \rightarrow \Pi(Ж_1) \text{ и т. д.}] \quad (7)$$

В результате натурных исследований и анкетирования установлено, что для таких множественных, одновременно пересекаемых потоков трех и более конкретных назначений требуется удлинение и местное уширение отдельных каналов, которое позволит обеспечить более комфортное движение пассажиров в потоках [10].

Пусть общий пассажиропоток на всех каналах данного узла равен $\sum \Pi_j$. Каждый отдельный поток определим так:

$$\Pi_1(A_3) \rightarrow \Pi(Ж_1), \Pi_2(A_3) \rightarrow \Pi(Ж_1). \quad (8)$$

Поскольку имеется два отдельных канала движения пассажиров к платформам транспорта Ж, то выделим соответствующие потоки. Первым в связном перечне

$$[\Pi_1(A_j) \rightarrow \Pi(Ж_k), \Pi_2(A_j) \rightarrow \Pi(Ж_k)] \quad (9)$$

всегда будем считать поток с отворотом влево. Если таким образом определены все потоки, то вероятность того, что в этой точке есть разделение или слияние конкретного $\Pi_i(A_j \rightarrow Ж_k)$ потока, равна

$$\frac{\Pi_i(A_j \rightarrow Ж_k)}{\sum_s \Pi_s}. \quad (10)$$

Эта же величина будет определять долю конкретного потока в общем объеме по данной области разделения или слияния.

Натурными обследованиями установлено, что чем больше различных потоков в области разделения или слияния и чем более они дифференцированы по величине между собой при определенной плотности общего потока, тем более резко снижается скорость движения пассажиров — вплоть до неупорядоченного перемещения.

Например, на рис. 2 в каждой из областей D_{ij} пересекаются (сливаются и разделяются) по 4 потока:

$$\begin{aligned} D_{ij}^{i,j=2}: & \Pi(A_1 \wedge A_2 \wedge A_3 \rightarrow Ж_{ij}); \\ & \Pi(A_4 \wedge A_5 \rightarrow Ж_{ij}); \\ & \Pi(Ж_{ij} \rightarrow A_1 \wedge A_2 \wedge A_3); \\ & \Pi(Ж_{ij} \rightarrow A_4 \wedge A_5). \end{aligned} \quad (11)$$

При этом важно отметить, что пересечение большого количества различных потоков наблюдается в каналах лишь в отдельные периоды пиковых перевозок с участием и интенсивным подходом пригородного железнодорожного транспорта. Тем не менее даже кратковременность таких периодов оказывает весьма негативное влияние на психологическое состояние пассажиров. Например, если каждый $P(J_{11} \rightarrow A_j)$ и $P(A_j \rightarrow J_{11})$ увеличивается в 2 раза, то в области D_{11} не только возникают заторы, но и на 7–10 мин прекращается движение пассажиров. Пассажиропоток $P(J_{11} \rightarrow A_j) + P(A_j \rightarrow J_{11}) = 2000$ чел. достигается при наличии единственного выхода из тоннеля на платформу транспорта J_1 , обслуживающую два пути, с которых отправляется и прибывает по одному пригородному составу.

Если пути специализированы и каждый из них допускает установку полносоставного пригородного поезда, то при одновременном прибытии или отправлении указанный пассажиропоток возрастает в 2 раза. Чтобы не допустить неупорядоченного движения и даже снижения скорости движения пото-

ка пассажиров по каналу, рекомендуется следующая система технических и организационных мер.

1. Выходы с тоннельных каналов на пассажирские платформы железнодорожного транспорта всегда должны быть двусторонними с разграничениями потоков.

2. Общая ширина каждого парного выхода и входа не должна быть менее 10 м.

3. За любой 5-минутный интервал времени область канала типа D_{ij} (см. рис. 2) размерами 10 м в диаметре не должна обслуживать более 1,5 тыс. чел.

4. Графики прибытия и отправления пригородных поездов должны быть скорректированы так, чтобы с двух путей, обслуживаемых одной платформой, поезда прибывали и отправлялись с запаздыванием по отношению друг к другу не менее чем на 10 мин.

Выполнение этих требований позволит исключить снижение скорости потока пассажиров в переходах и не допустить неупорядоченного перемешивания потоков.

Сведения об авторах:

Сергей Петрович Вакуленко,

кандидат технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Управление транспортным бизнесом и интеллектуальные системы», директор Института управления и цифровых технологий Российского университета транспорта (МИИТ)

Надежда Юрьевна Евреенова,

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Управление транспортным бизнесом и интеллектуальные системы» Российского университета транспорта (МИИТ)

Authors information:

Sergey P. Vakulenko,

PhD in Engineering, Professor, Head of Transport Business Management and Intelligent Systems Department, Head of Institute of Management and Digital Technologies, Russian University of Transport (MIIT)

Nadezhda Yu. Evreenova,

PhD in Engineering, Associate Professor, Associate Professor of Transport Business Management and Intelligent Systems Department, Russian University of Transport (MIIT)

Литература

1. Вакуленко С. П., Головнич А. К., Евреенова Н. Ю. Формирование транспортно-пересадочного узла при взаимодействии автомобильного и железнодорожного транспорта // Транспорт Урала. 2024. № 2 (81). С. 62–66. DOI: 10.20291/1815-9400-2024-2-62-66.
2. Вакуленко С. П., Доенин В. В., Евреенова Н. Ю. Моделирование пассажиропотоков в ТПУ // Мир транспорта. 2014. Т. 12. № 4 (53). С. 124–131. ISSN 1992-3252.
3. Вакуленко С. П., Евреенова Н. Ю. Планировочная структура транспортно-пересадочных узлов // Мир транспорта. 2012. Т. 10. № 5 (43). С. 100–104. ISSN 1992-3252.
4. Ларин О. Н. Методологические аспекты интеграции различных видов транспорта в единую систему // Вестник транспорта. 2007. № 7. С. 10–13.
5. Вакуленко С. П., Евреенова Н. Ю. Основные тенденции совершенствования системы обслуживания пригородных перевозок субурбанизированных и неурбанизированных агломераций // Наука и техника транспорта. 2024. № 2. С. 71–75. ISSN 2074-9325.
6. Козлов П. А., Тушин Н. А., Колокольников В. С. Проблема организации единой транспортной системы // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2018. Т. 14. № 3. С. 748–755. DOI: 10.25559/SITITO.14.201803.748-755.

References

1. Vakulenko S. P., Golovnich A. K., Evreenova N. Yu. Transport hub formation under the interaction of motor with railway transport. *Transport of the Urals*. 2024. No. 2 (81). Pp. 62–66. DOI: 10.20291/1815-9400-2024-2-62-66. (In Russian).
2. Vakulenko S. P., Doenin V. V., Evreenova N. Yu. Simulation of passenger flows in transport interchange hubs. *World of Transport and Transportation*. 2014. Vol. 12. No. 4 (53). Pp. 124–131. ISSN 1992-3252. (In Russian).
3. Vakulenko S. P., Evreenova N. Yu. Planning of the structure of transfer junctions and hubs. *World of Transport and Transportation*. 2012. Vol. 10. No. 5 (43). Pp. 100–104. ISSN 1992-3252. (In Russian).
4. Larin O. N. Methodological aspects of the integration of various modes of transport in a single system. *Transport Massanger*. 2007. No. 7. Pp. 10–13. (In Russian).
5. Vakulenko S. P., Evreenova N. Yu. Principal trends in improving suburban transportation services for suburbanised and non-urbanised agglomerations. *Science and technology in transport*. 2024. No. 2. Pp. 71–75. ISSN 2074-9325. (In Russian).
6. Kozlov P. A., Tushin N. A., Kolokolnikov V. S. Problem of common transport system organization. *Modern Information Technologies and IT-education*. 2018. Vol. 14. No. 3. Pp. 748–755. DOI: 10.25559/SITITO.14.201803.748-755. (In Russian).

7. Методологические основы технологии организации пригородно-городских пассажирских перевозок железнодорожным транспортом в крупных транспортных узлах (на примере Центрального транспортного узла: опыт и перспективы) / С. П. Вакуленко, Д. Ю. Роменский, К. А. Калинин [и др.]. Москва : РУТ (МИИТ), 2023. 428 с.
8. Проблематика функционирования транспортных узлов в России и за рубежом / Е. Н. Тимухина, Н. В. Кашеева, Н. Е. Окулов, В. В. Лесных // Вестник транспорта Поволжья. 2022. № 3. С. 65–72. ISSN 1997-0722.
9. Резер С. М. Взаимодействие транспортных систем. Москва : Наука, 1985. 248 с.
10. Пазойский Ю. О., Шубко В. Г., Вакуленко С. П. Пассажирские перевозки на железнодорожном транспорте (примеры, задачи, модели, методы и решения). Москва : УМЦ ЖДТ, 2009. 342 с.
7. Vakulenko S. P., Romenskiy D. Yu., Kalinin K. A. [et al.]. Methodological foundations of technology for the organization of suburban and urban passenger transportation by railway transport in large transport hubs (using the example of a Central transport hub: experience and prospects). Moscow : Russian University of Transport (MIIT), 2023. 428 p. (In Russian).
8. Timukhina E. N., Kashcheeva N. V., Okulov N. E., Lesnykh V. V. Problems of functioning of transport nodes in Russia and abroad. *Vestnik transporta Povolzhya*. 2022. No. 3. Pp. 65–72. ISSN 1997-0722. (In Russian).
9. Rezer S. M. Interaction of transport systems. Moscow : Science, 1985. 248 p. (In Russian).
10. Pazoyskiy Yu. O., Shubko V. G., Vakulenko S. P. Passenger transportation by railway transport (examples, tasks, models, methods and solutions). Moscow : UMTs ZhDT, 2009. 342 p. (In Russian).

Объем статьи 0,65 авторских листа

Бортовая система контроля подшипниковых узлов моторвагонного подвижного состава

Александр Петрович Буйносов¹, Александр Сергеевич Баитов¹, Евгений Валерьевич Федоров¹,
Александр Тахирович Шарапов¹

¹ Уральский государственный университет путей сообщения, Екатеринбург, Россия

On-board monitoring system for bearing units of motive-coach fleet stock

Alexander P. Buynosov¹, Alexander S. Baitov¹, Evgeniy V. Fedorov¹, Alexander T. Sharapov¹

¹ Ural State University of Railway Transport, Ekaterinburg, Russia

Аннотация

Вибродиагностика играет важную роль в мониторинге подшипниковых узлов моторвагонного подвижного состава. Однако на качество измерений и точность определения состояния узлов влияют разнообразные технические и технологические факторы. Это подчеркивает необходимость в создании бортовой системы вибродиагностики. Такая система позволит не только анализировать состояние подшипниковых узлов, но и предоставлять актуальную информацию об их работоспособности в реальных условиях эксплуатации.

Для достижения поставленной цели авторами статьи были решены следующие задачи: выбор датчика вибрации, разработка алгоритмов программного обеспечения для анализа и обработки вибродиагностической информации, создание алгоритма функционирования бортовой системы вибродиагностики подшипников качения при движении подвижного состава, в том числе с автоматизацией процесса обработки и передачи диагностических данных.

Ключевые слова: электропоезд, узел, подшипник качения, мониторинг, бортовая система, вибродиагностика, алгоритм

Abstract

Vibration diagnostics plays an important role in monitoring the bearing units of motive-coach fleet stock. However, the quality of measurements and the accuracy of determining the condition of units are affected by various technical and technological factors. This emphasizes the need to create an onboard vibration diagnostics system. Such a system will not only analyze the condition of bearing units, but also provide up-to-date information on their performance in real operating conditions. To achieve this goal, the authors of the article solved the following tasks: selection of a vibration sensor, development of software algorithms for analyzing and processing vibration diagnostic information, creation of an algorithm for the operation of an onboard vibration diagnostics system for rolling bearings during the movement of rolling stock, including automation of processing and transmitting diagnostic data.

Keywords: electric train, unit, rolling bearing, monitoring, on-board system, vibration diagnostics, algorithm

DOI: 10.20291/1815-9400-2025-1-9-15

ВВЕДЕНИЕ

Вибрационный мониторинг подшипниковых узлов при ремонте и техническом обслуживании моторвагонного подвижного состава (МВПС) включен в обязательный перечень технологических операций для раннего выявления изменения состояния узлов и предотвращения аварийных ситуаций. В состав систем вибрационной диагностики входят измерительные приборы и программное обеспечение, анализирующее сигналы вибрации.

В ОАО «РЖД» используются следующие виды систем вибродиагностики:

- переносные (для профилактического обследования оборудования);

- стендовые (для периодического анализа состояния подвижного состава, входного и выходного контроля технического состояния узлов и деталей на этапах сборки);

- комбинированные (для мониторинга и углубленной диагностики основного оборудования).

Функционал специализированного программного обеспечения позволяет идентифицировать дефекты, прогнозировать их развитие на основе данных измерений, хранить диагностическую информацию, устанавливать или задавать предельные пороговые значения для конкретных видов дефектов, сравнивать параметры вибрации с пороговыми значениями и формировать отчеты о результатах диагностических измерений.

Поскольку при работе автоматических систем диагностики всегда существует вероятность получения неоднозначных результатов, роль операторов таких систем не может быть сведена только к выполнению операций по измерению сигнала вибрации. Помимо этого, операторы занимаются выбором точек контроля и вида контролируемого сигнала, осуществляют настройку условий диагностирования и определяют способ анализа диагностической информации.

На сети железных дорог в моторвагонных депо используется следующее вибродиагностическое оборудование: сборщики данных «Вектор-2000», СД-12, диагностические комплексы типа «Прогноз-1», диагностические системы типа ОМСД, УДП, СКБУ [1].

Для роторных машин основной вид анализа сигналов вибрации — спектральный, который выполняется при помощи алгоритмов быстрого преобразования Фурье [2]. Отличительный признак мониторинга узлов роторных машин заключается в измерении не только низко- и среднечастотных, но также и высокочастотных составляющих вибрации или шума. Функции анализа спектров выполняет оператор-диагностик, имеющий соответствующие компетенции и прошедший специализированное обучение методам диагностического анализа спектров вибрации.

Следует отметить, что между низкочастотной и высокочастотной вибрацией существует принципиальное отличие: первая хорошо распространяется на незначительные расстояния практически без потерь, что позволяет использовать ее для цикла диагностики всех узлов машины одновременно (машины в целом), а высокочастотная вибрация, наоборот, быстро рассеивается по мере удаления от источника, отражаясь от любых стыков и неоднородностей структуры, поэтому имеет смысл использовать ее для мониторинга только отдельных узлов.

Опыт применения вибродиагностических систем показывает, что на качество измерений и точность определения состояния узлов влияют такие технические и технологические факторы:

низкая пригодность объектов для диагностики;

неблагоприятные условия на ремонтных позициях (электромагнитные помехи, сторонние ударные нагрузки, загрязненность объекта, отрицательные значения температуры);

корректность установки измерительных датчиков на объекте контроля;

нестабильность скорости вращения колесных пар во время измерений;

недостаточная квалификация персонала, проводящего диагностику.

Согласно статистическим данным, за период с 2006 по 2019 г. 24 % отказов и неисправностей МВПС на железных дорогах ОАО «РЖД» были связаны с узлами механической части, в том числе 19 % отказов приходилось на роликовые буксовые подшипники [3].

Приведенные данные подтверждают необходимость в разработке бортовой

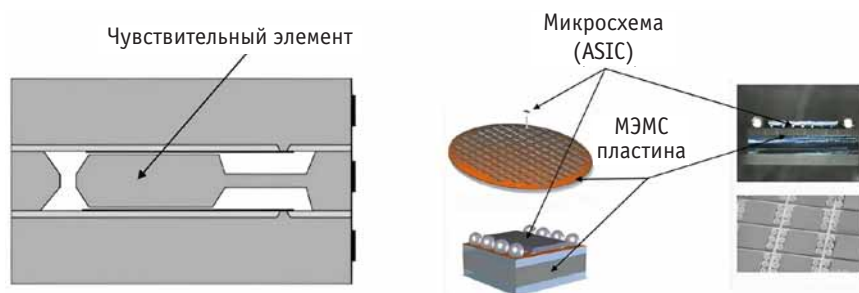


Рис. 1. МЭМС-акселерометр

системы вибродиагностики, которая позволит пересмотреть подходы к контролю и анализу технического состояния подшипниковых узлов МВПС и получать актуальную информацию в режиме реальной эксплуатации.

В основе создания этой системы лежит решение таких задач, как выбор подходящего датчика вибрации, разработка алгоритмов программного обеспечения для анализа и обработки вибродиагностической информации, создание алгоритма функционирования бортовой системы вибродиагностики подшипников качения при движении подвижного состава, автоматизация обработки и передачи диагностических данных.

ВЫБОР ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ДАТЧИКА ВИБРАЦИИ

В настоящее время благодаря малым размерам, высокой чувствительности, широкому динамическому диапазону, интервалу рабочих температур от -40 до $+125$ °C наружного воздуха большое распространение получили МЭМС-акселерометры, созданные на базе микроэлектромеханических систем [4].

МЭМС-акселерометры, в состав которых входят чувствительный элемент, аналого-цифровой преобразователь, микропроцессор (для обработки сигнала), интерфейс (рис. 1), работают по следующему алгоритму: при измерениях вибрации зазор между корпусом и чувствительным элементом изменяется, и возникает сигнал, пропорциональный значениям ускорения.

Авторами статьи были исследованы характеристики трехкоординатных МЭМС-акселерометров, специально разработанных для измерения уровней вибрации (полоса частот 10–1000 Гц). Сравнительный анализ характеристик датчиков вибрации, используемых для вибродиагностики подшипников качения при ремонтном цикле на предприятиях ОАО «РЖД» и предлагаемых к применению, приведен в табл. 1.

Как показали результаты анализа, микроэлектромеханический датчик ADIS имеет собственный процессор и интерфейс, позволяет выполнять измерения в трех координатах, обладает требуемой чувствительностью, достаточным частотным и динамическим диапазоном, а также характеризуется вариативностью способов крепления [5].

Таблица 1

Технические характеристики датчиков вибрации

Параметры	Пьезоэлектрический датчик AP57	Микроэлектромеханический датчик ADIS
Число координат	X	X, Y, Z
Чувствительность, мВ/г (мВ/м/с ²)	50–500 (50,5)	300 (30,5)
Диапазон частот, Гц	0,5–8000	0–1000
Динамический диапазон, г	от ± 0 до ± 200	от ± 4 до ± 18
Плотность шума, μg	10	25
Диапазон температуры, °C	от -60 до $+150$	от -40 до $+125$
Крепление	На постоянном магните	Вариативное
Интерфейс	Отсутствует	Wi-Fi (Modbus TCP)

АЛГОРИТМЫ РАБОТЫ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ АНАЛИЗА И ОБРАБОТКИ ВИБРОДИАГНОСТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

Расчетная модель предложенной системы вибродиагностики представлена в виде программы, написанной на языке Python [6, 7]. Программа формирует вызов библиотек, необходимых для построения полосового фильтра, огибающей на базе преобразования Гильберта и быстрого преобразования Фурье (БПФ).

Реальный сигнал, полученный на стендовой установке, проходит через цифровой фильтр, после чего строится огибающая и спектральная характеристика.

Путем полосовой фильтрации сигнала от датчика (для выделения одной резонансной частоты) можно исключить

большую часть вибрации, создаваемой другими частями машины, что позволяет идентифицировать вибрацию от подшипника даже в таком сложном механизме, как колесно-редукторный блок моторвагонного подвижного состава.

После фильтрации сигнал демодулируется детектором огибающей, выводится его частотный спектр. Затем можно обнаружить наличие дефекта в подшипнике по появлению спектральной линии на частоте повторения импульсов, связанной с дефектом на внутреннем, внешнем кольцах или одном из элементов качения.

Эта последовательность операций составляет основу метода высокочастотного резонанса, называемого анализом демодулированного резонанса или анализом спектральной плотности мощности огибающей (рис. 2).

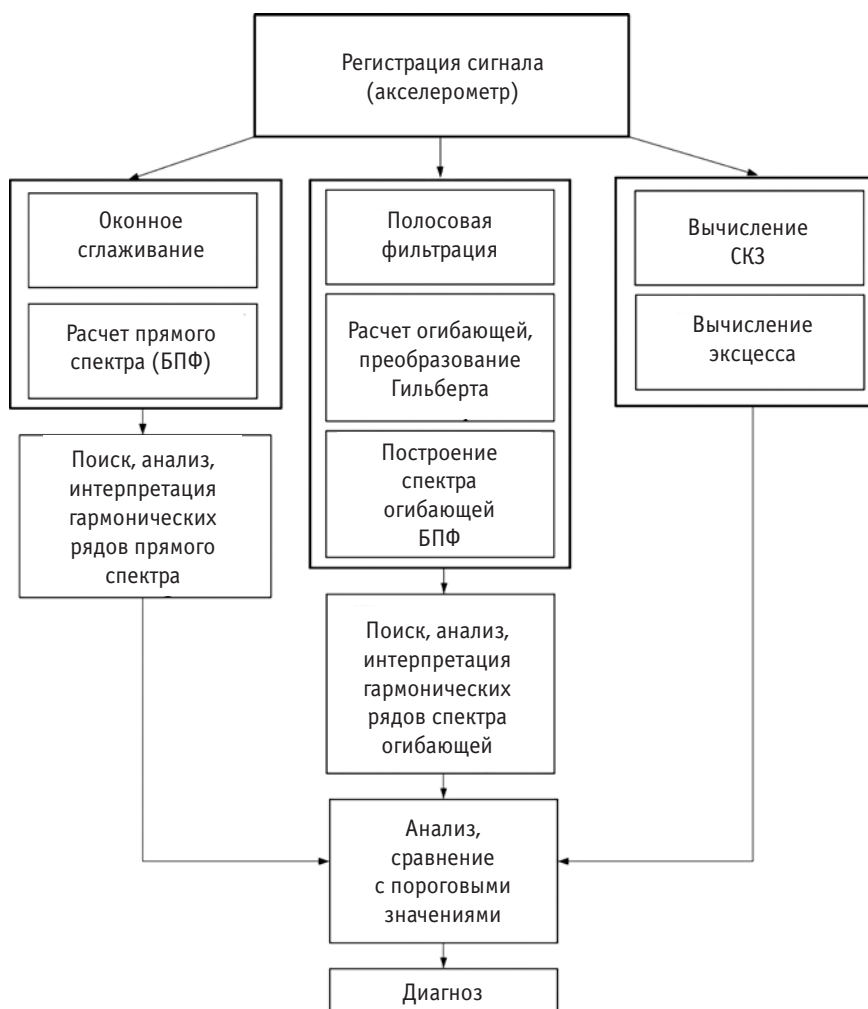


Рис. 2. Алгоритм метода высокочастотного резонанса

Последовательный алгоритм функций программного обеспечения для обработки вибродиагностической информации систем контроля и диагностики технического состояния сложных механических систем распределяется на четыре основных операционных блока:

чтение диагностической информации из файла;

функция фильтрации с полосовым фильтром;

построение графических зависимостей;

получение огибающей сигнала.

Алгоритм программного обеспечения для обработки диагностической информации представлен на рис. 3.

Программа позволяет: организовать доступ к пакетам диагностических данных, выбирать источник и отображать первичную диагностическую информацию; обеспечивать миграцию и управление данными; сопровождать фоновые процессы обработки диагностической информации, ее сбор и хранение; осуществлять предварительную обработку и необходимое сжатие для удобного представления информации; готовить информацию для вибродиагностики состояния машин и механизмов.

АЛГОРИТМ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ БОРТОВОЙ СИСТЕМЫ ВИБРОДИАГНОСТИКИ ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ

Бортовая система вибродиагностики технического состояния подшипников качения моторвагонного подвижного состава предназначена для выполнения измерений и анализа спектров вибрации, накопления и формирования диагностической информации по каждому из контролируемых узлов, обеспечения функциональной возможности передачи данных на специализированный сервер.

Организация взаимодействия (интеграция радиоканала) осуществляется от бортовой системы вибродиагностики на сервер обработки и хранения диагностической информации, расположенный в информационно-вычислительном центре, с последующей передачей данных о техническом состоянии в ремонтное предприятие.

Диагностическая информация передается при заходе моторвагонного подвиж-

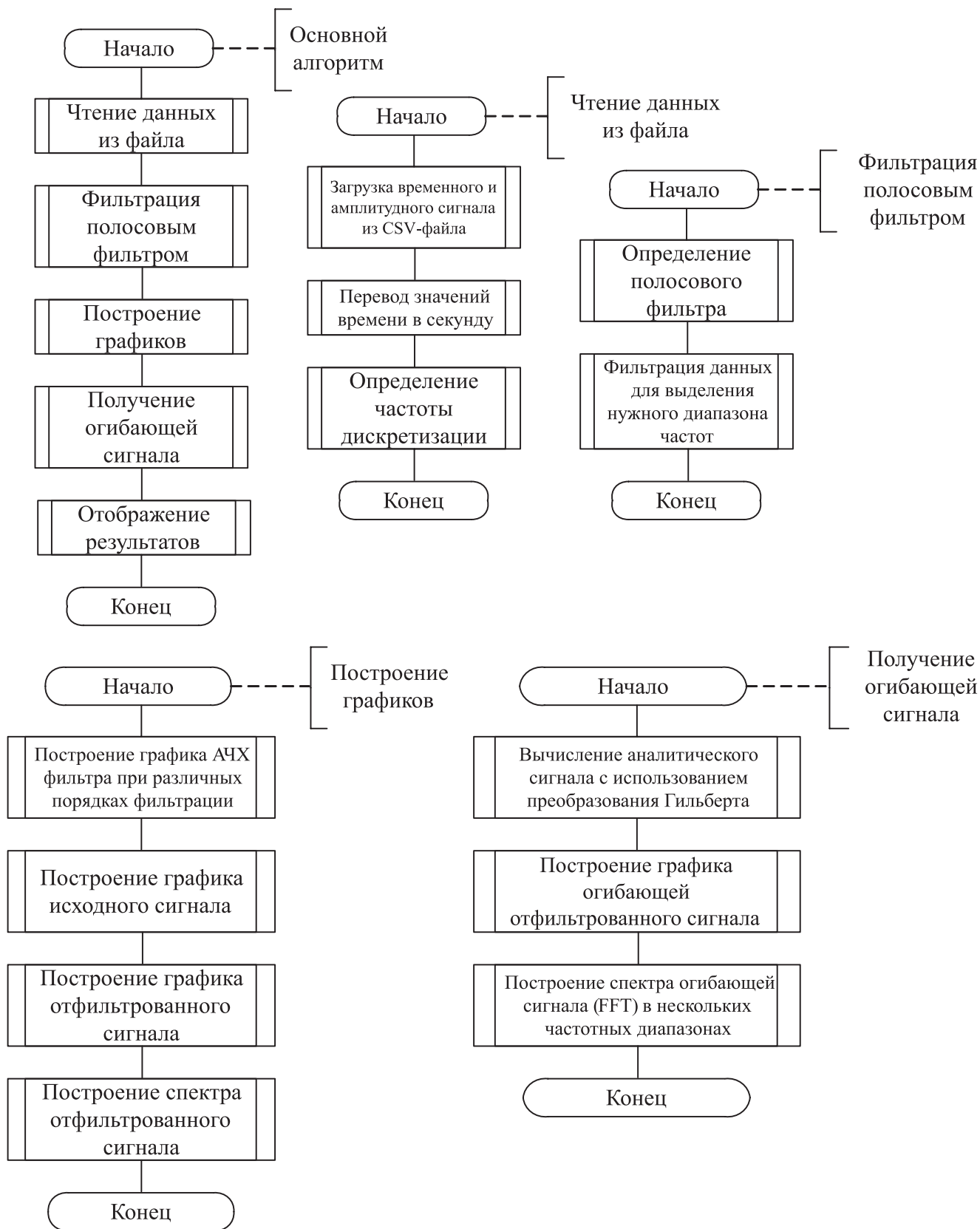


Рис. 3. Блок-схема обработки диагностической информации

ного состава в зону покрытия сети стандарта LTE на железнодорожной станции.

Функциональная схема бортовой системы вибродиагностики подшипников качения МВПС представлена на рис. 4.

Разработанный функционал бортовой системы вибродиагностики подшипников качения обеспечивает заданные параметры по качеству и точности измерений в реальных условиях эксплуатации моторвагонного подвижного состава и позволяет перейти на следующий техноло-

гический уровень диагностического контроля [8–10].

ВЫВОДЫ

Существующий технологический процесс вибродиагностики подшипниковых узлов МВПС осуществляется диагностическими приборами и комплексами при техническом обслуживании и ремонте подвижного состава на ремонтных предприятиях (в моторвагонных депо). Этот процесс имеет ряд ограничений при получении

и обработке вибросигнала, что влияет на качество и точность измерений. В частности, применяемая технология вибродиагностики не обеспечивает контроль за техническим состоянием подшипниковых узлов механической части МВПС в режиме эксплуатации: измерительные датчики вибрации (пьезоэлектрические акселерометры) выполняют измерения только в одном вертикальном направлении.

Использование микроэлектромеханических датчиков вибрации позволит

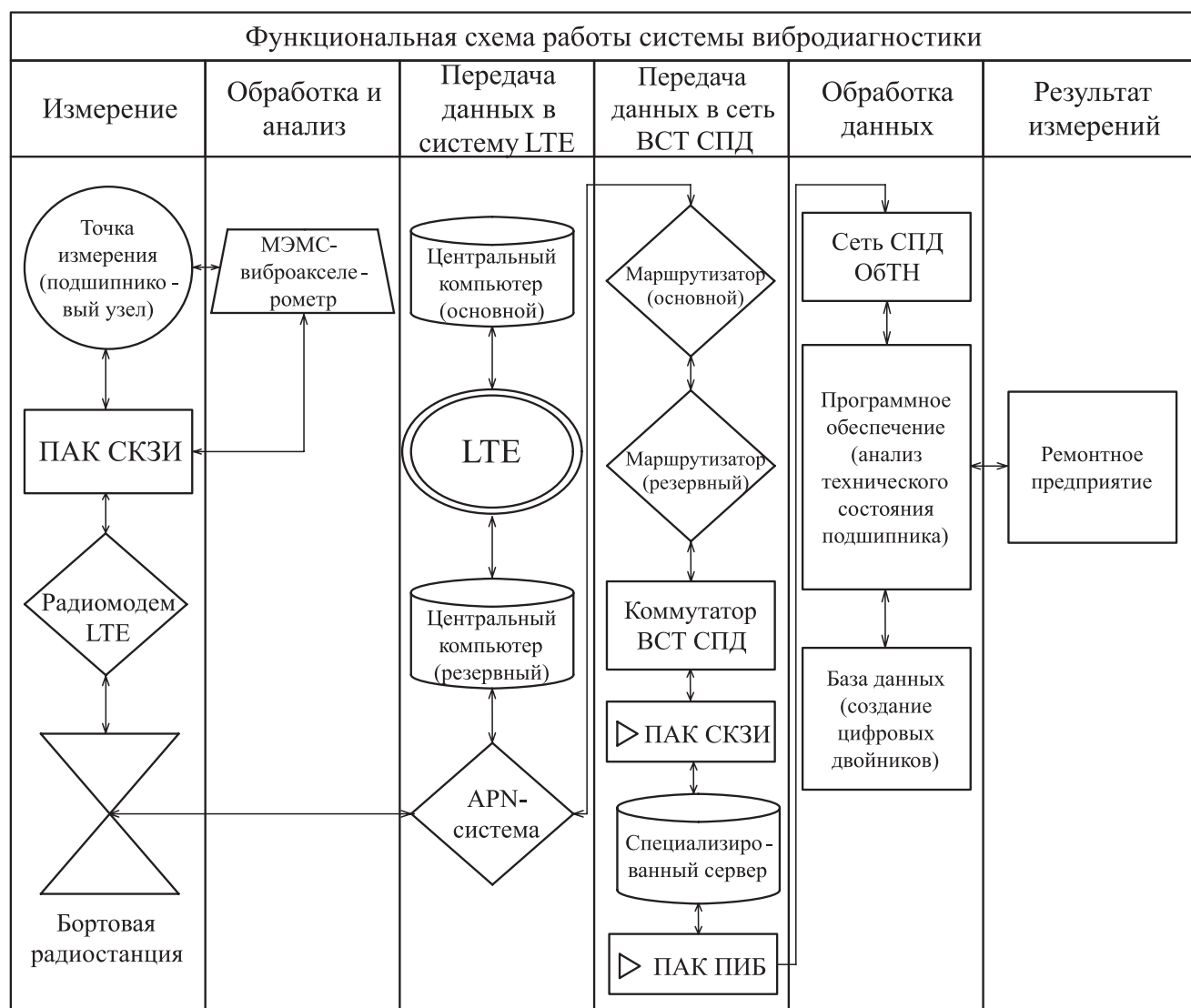


Рис. 4. Функциональная схема бортовой системы вибродиагностики:

ПАК СКЗИ — программно-аппаратный комплекс средств криптографической защиты информации; APN-система — шлюз между устройством и маршрутизатором; ВСТ СПД — высокоскоростная технологическая сеть передачи данных; ПАК ПИБ — программно-аппаратный комплекс подсистемы информационной безопасности; СПД ОБТН — взаимодействие станционного (серверного) оборудования с потребителями информации в сети передачи данных общетехнологического назначения

проводить измерения в трех координатах с возможной вариативностью способов крепления при соблюдении требуемой чувствительности и достаточных частотных и динамических диапазонах.

Разработанные алгоритмы программного обеспечения для анализа, обработки и передачи вибродиагностической информации позволят осуществлять

контроль состояния подшипниковых узлов МВПС в режиме реальной эксплуатации.

Перспективы предлагаемой концепции заключаются также в применении технологий «промышленного интернета вещей» за счет использования корпоративной сети ОАО «РЖД» 4G/LTE, которая развивается в настоящее время [11].

В свою очередь, формирование цифровой базы длительного хранения технологических и диагностических параметров о техническом состоянии подшипниковых узлов моторвагонного подвижного состава откроет возможность создания цифровых двойников по всему парку подвижного состава.

Сведения об авторах:

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

Александр Сергеевич Байтов,
аспирант кафедры «Электрическая тяга» Уральского государственного университета путей сообщения

Евгений Юрьевич Федоров,
старший преподаватель кафедры «Электрическая тяга» Уральского государственного университета путей сообщения

Александр Тахирович Шарапов,
ассистент кафедры «Электрическая тяга» Уральского государственного университета путей сообщения

Authors information:

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

Alexander S. Baitov,
postgraduate student of Electric Traction Department, Ural State University of Railway Transport

Evgeniy Yu. Fedorov,
Senior Lecturer of Electric Traction Department, Ural State University of Railway Transport

Alexander T. Sharapov,
Assistant Lecturer of Electric Traction Department, Ural State University of Railway Transport

Литература

1. Буйносов А. П., Байтов А. С. Вибродиагностика современного тягового подвижного состава // Наука и образование транспорта : материалы XV Международной научно-практической конференции, Самара, 10–11 ноября 2022 г. Самара : Изд-во СамГУПС, 2022. Т. 1. С. 11–13.
2. Барков А. В., Баркова Н. А., Азовцев А. Ю. Мониторинг и диагностика роторных машин по вибрации. Санкт-Петербург : Севзапучцентр, 2013. 158 с.
3. Буйносов А. П., Байтов А. С. Выявление узлов и деталей электропоездов и рельсовых автобусов, наиболее подверженных отказам // Научно-технический вестник Поволжья. 2019. № 12. С. 47–50. ISSN 2079-5920.
4. Анализ электронного шума при вибродиагностике узлов моторвагонного подвижного состава / А. П. Буйносов, В. А. Васильев, А. В. Ерпалов [и др.] // Транспорт Урала. 2020. № 2 (65). С. 10–15. DOI: 10.20291/1815-9400-2020-2-10-15.
5. Буйносов А. П., Васильев В. А., Байтов А. С. Применение датчиков вибрации при ремонтном цикле механической части электропоезда // Вестник транспорта Поволжья. 2023. № 4 (100). С. 7–11. ISSN 1997-0722.
6. Сигма спектр / А. И. Иванов, В. А. Васильев, А. С. Байтов : программа для ЭВМ 2023681252 Российская Федерация. № 2023680545; заявл. 09.10.2023; опубл. 11.10.2023, Бюл. № 10.
7. Численная модель диагностики подшипников качения / В. А. Васильев, А. Ю. Ницкий, А. И. Иванов, А. С. Байтов // Научный альманах. 2023. № 12-4 (110). С. 10–18. ISSN 2411-7609.

References

1. Buynosov A. P., Baitov A. S. Vibration diagnostics of modern traction rolling stock. *Science and education for transport : proceedings of the 15th International scientific and practical conference*, Samara, November 10–11, 2022. Samara : Publishing House of Samara State Transport University, 2022. Vol. 1. Pp. 11–13. (In Russian).
2. Barkov A. V., Barkova N. A., Azovtsev A. Yu. Vibration monitoring and diagnostics of rotary machines. St. Petersburg, 2013. 158 p. (In Russian).
3. Buynosov A. P., Baitov A. S. Identification of assemblies and details of electric trains and rail buses the most failed. *Scientific and Technical Volga region Bulletin*. 2019. No. 12. Pp. 47–50. ISSN 2079-5920. (In Russian).
4. Buynosov A. P., Vasilyev V. A., Erpalov A. V. [et al.]. Analysis of electric noise at vibration based diagnostics of motor-coach stock assemblies. *Transport of the Urals*. 2020. No. 2 (65). Pp. 10–15. DOI: 10.20291/1815-9400-2020-2-10-15. (In Russian).
5. Buynosov A. P., Vasilyev V. A., Baitov A. S. Application of vibration sensors in the repair cycle of the mechanical part of electric train. *Bulletin of transport of the Volga region*. 2023. No. 4 (100). Pp. 7–11. ISSN 1997-0722. (In Russian).
6. Ivanov V. A., Vasilyev V. A., Baitov A. S. Sigma spectrum : computer program 2023681252 Russian Federation. No. 2023680545; filed 09.10.2023; publ. 11.10.2023, Bulletin No. 10. (In Russian).
7. Vasiliev V. A., Nitsky A. Yu., Ivanov A. I., Baitov A. S. Numerical model for diagnostics of rolling bearings. *Science Almanac*. 2023. No. 12-4 (110). Pp. 10–18. ISSN 2411-7609. (In Russian).

8. Семенов А. П., Лакин И. К. Обоснование необходимости систем диагностирования локомотивов // Мир транспорта. 2020. Т. 18. № 6 (91). С. 136–157. DOI: 10.30932/1992-3252-2020-18-6-136-157.
9. Диагностика неисправностей тягового электродвигателя электропоезда ЭД9Т методом спектрального анализа тока в обмотке якоря / И. А. Менщиков, А. С. Космодамианский, С. И. Баташов, А. А. Фатеев // Транспорт Урала. 2024. № 2 (81). С. 35–40. DOI: 10.20291/1815-9400-2024-2-35-40.
10. Буйносов А. П., Худояров Д. Л., Тюшев И. А. Метод определения достоверности регистрируемых диагностических сообщений электровозов 2ЭС6 // Вестник УрГУПС. 2022. № 4 (56). С. 68–73. DOI: 10.20291/2079-0392-2022-4-68-73.
11. Хатламаджиян А. Е., Орлов В. В., Николаев И. С. Применение технологии Интернета вещей для задач диагностики и управления на железнодорожном транспорте // Труды АО «НИИАС»: сборник статей. Москва, 2021. Т. 1. Вып. 11. С. 118–124.

8. Semenov A. P., Lakin I. K. Justification of the Need for Locomotive Diagnostic Systems. *World of Transport and Transportation*. 2020. Vol. 18. No. 6 (91). Pp. 136–157. DOI: 10.30932/1992-3252-2020-18-6-136-157. (In Russian).
9. Men'shnikov I. A., Kosmodamianskiy A. S., Batashov S. I., Fateev A. A. Diagnostics of the defects of the ED9T electric train traction motor with the method of spectral analyses of current in the armature winding. *Transport of the Urals*. 2024. No. 2 (81). Pp. 35–40. DOI: 10.20291/1815-9400-2024-2-35-40. (In Russian).
10. Buynosov A. P., Khudoyarov D. L., Tyushev I. A. Method for determining reliability of registered diagnostic messages of 2ES6 electric locomotives. *Herald of the USURT*. 2022. No. 4 (56). Pp. 68–73. DOI: 10.20291/2079-0392-2022-4-68-73. (In Russian).
11. Khatlamadzhian A. E., Orlov V. V., Nikolaev I. S. Application of Internet of Things technology for diagnostics and control tasks in railway transport. *Proceedings of JSC «NIIAS»*: collection of articles. Moscow, 2021. Vol. 1. Issue 11. Pp. 118–124. (In Russian).

Объем статьи 0,68 авторских листа

Научная статья
УДК 629.44

Параметрическая оценка снижения тары грузовых вагонов

Александр Васильевич Смольянинов¹, Константин Михайлович Колясов¹

¹ Уральский государственный университет путей сообщения, Екатеринбург, Россия

Parametric assessment of freight car container reduction

Alexander V. Smolyaninov¹, Konstantin M. Kolyasov¹

¹ Ural State University of Railway Transport, Ekaterinburg, Russia

Аннотация

Снижение тары вагонов представляет собой важнейшую задачу вагоностроительной промышленности. В статье рассмотрена возможность оценивать тару вагона показателем удельной материалоемкости, учитывающей срок службы вагона. Проанализированы и рассчитаны параметры наиболее массовых групп грузовых вагонов, таких как полувагоны, хопперы и цистерны. Приведены сведения об использовании алюминиевых сплавов в грузовом вагоностроении и данные о прочностных характеристиках алюминиевых сплавов в зависимости от их толщины.

Ключевые слова: тара вагона, коэффициент тары, удельная материалоемкость, полувагоны, вагоны-хопперы, цистерны, алюминиевые сплавы

Abstract

Car container reduction is the most important task of the car-building industry. The article considers the possibility of evaluating the car container with indicator of specific material consumption, taking into account the service life of the car. Parameters of most massive groups of freight cars, such as gondolas, hoppers and tanks, are analyzed and calculated. Information on the use of aluminum alloys in freight car building and data on strength characteristics of aluminum alloys depending on their thickness are given.

Keywords: car container, tare coefficient, specific material consumption, gondola cars, hopper cars, tanks, aluminum alloys

DOI: 10.20291/1815-9400-2025-1-16-24

ВВЕДЕНИЕ

В число 13 приоритетных направлений, определенных Правительством Российской Федерации в апреле 2023 г. и ориентированных на обеспечение технологического суверенитета страны, входит и железнодорожное машиностроение [1]. Среди наиболее значимых и приоритетных задач развития выделены модернизация, техническое перевооружение и обновление подвижного состава, стимулирование производства инновационного подвижного состава нового поколения для тяжеловесного движения.

В работах [2, 3] проанализированы основные направления развития грузового вагоностроения, в том числе производство вагонов на тележках со следующими осевыми нагрузками:

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

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

263 кН (27 тс) — восьмиосные вагоны (полувагоны и цистерны) в виде полужестких сцепов из двух четырехосных секций.

Все современные инновационные конструкции грузовых вагонов реализуют 25-тонную осевую нагрузку, что обеспечивает вес поезда 7100 т, состоящего из четырехосных полувагонов и цистерн (их 71), расположенного на приемо-отправочных путях станции длиной 1050 м. При этом погонная нагрузка составляет 7,184 тс/м, что меньше допускаемой нагрузки 8,2 тс. Реализация такой погонной нагрузки в составе поезда из четырехосных вагонов возможна при нагрузке

от оси на рельсы 27 тс, что недопустимо стандартом по инфраструктуре [4].

Приведенные сведения свидетельствуют о том, что конструкторы исчерпали резервы роста провозной способности железных дорог по осевой и погонной нагрузкам. В работе [3] авторами проанализированы конструктивные решения грузовых вагонов, приводящие к росту погонной нагрузки и тем самым к увеличению веса поезда. При этом все показатели отвечают техническим требованиям стандарта по инфраструктуре.

Нагрузка от оси на рельсы определяется как отношение веса брутто вагона к числу осей вагона:

$$p_0 = \frac{P + T}{n} \leq [p_0] \rightarrow \text{const}, \quad (1)$$

где P и T — грузоподъемность и тара вагона соответственно, тс; n — число осей вагона.

В данном случае величина допускаемой осевой нагрузки p_0 принята 25 тс (245 кН). Из представленной зависимости следует, что снижение тары вагона позволяет увеличить на ту же величину его грузоподъемность, при этом результат остается неизменным. Таким образом обеспечивается рост провозной способности железных дорог за счет повышения массы нетто поездов.

Первый опыт снижения тары грузовых вагонов за счет применения в конструкции алюминиевых сплавов (АМг6 и 1915) был получен после проектирования и изготовления Уралвагонзаводом (УВЗ) шести- (1961 г.) и четырехосных (1973 г.) полувагонов и крытых вагонов производства Алтайского вагоностроительного

завода (сейчас АО «Алтайвагон», АВЗ) в 1964 и 1966 гг. При производстве узлов (боковых стен, рамы и торцевых дверей) шестиосного полувагона из алюминиевых сплавов масса тары кузова составила 6758 кг, или на 33,4 % меньше, чем из стали, а четырехосного — 5941 кг, что на 30,2 % меньше стального. Крытый вагон из сплава АМг был легче аналогичного стального на 4,6 т, что позволило снизить массу тары кузова на 30–35 %.

В советское время коллектив Уральского конструкторского бюро вагоностроения ежегодно принимал социалистические обязательства, которые содержали пункт «снижение тары вагона» в пределах 50–100 кг. Это говорит о том, что тара является важнейшим параметром вагона, определяющим его технико-экономические показатели и влияющим на другие показатели (сроки службы узлов вагона и рельсов, сопротивление движению поездов и их скорости, расход электроэнергии и топлива и т. д.).

Основные параметры вагона [5] содержат величину тары*, которая определяет параметр коэффициент тары, представляющий собой отношение тары вагона к его грузоподъемности. Этот показатель регламентируется стандартом ОАО «РЖД» «Вагоны грузовые инновационные» [6].

Материалоемкость является одним из важнейших показателей качества промышленной продукции, в значительной степени определяя затраты материальных ресурсов на производство изделия, его техническое обслуживание и ремонт. ГОСТ 27782–88 устанавливает термин «удельная металлоемкость» как показатель материалоемкости, характеризующий расход металла, необходимый для получения единицы полезного эффекта от использования изделия по назначению [7, 8].

Согласно [7], под материалоемкостью изделия понимается расход материала, необходимого на производство и эксплуатацию изделия, таким образом:

$$M = (M_C + M_{OP}) + M_{\Sigma}, \quad (2)$$

где M_C — масса изделия (масса сухого изделия); M_{OP} — масса технологических отходов и потерь; M_{Σ} — расход материала на эксплуатацию изделия (на запчасти).

Для группы однородных изделий устанавливается одно числовое значение показателя материалоемкости, каким является удельная материалоемкость. Этот показатель характеризует нормируемый расход материала на получение определенного полезного эффекта от его использования по назначению за установленный ресурс (нормативный срок службы).

Удельную массу изделия вычисляют по формуле [8]

$$M_y = \frac{M_C}{P}, \quad (3)$$

где P — величина полезного эффекта от использования изделия по назначению или иного технического параметра изделия, наиболее полно характеризующего его потребительские

свойства, отражающего специфические особенности и условия его эксплуатации.

В параметре M_y будем учитывать две важнейших характеристики грузового вагона — грузоподъемность (P , тс) и нормативный срок службы (N , лет):

$$M_y = \frac{M_C}{P \cdot N}. \quad (4)$$

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ТАРЫ ВАГОНА НА ЕГО ПАРАМЕТРЫ

Полувагоны. Начиная с 1984 г. Уралвагонзавод, будучи единственным в России, поставил на серийное производство четырехосный цельнометаллический полувагон с торцевыми стенами и люками в полу (модель 12-119). В начале 2000-х гг. модель послужила прототипом для начала производства полувагонов на АВЗ (модель 12-296-01) и на АО «Промтрактор-Вагон» (модель 12-1302). Эти три модели имеют практически одинаковые параметры, определяемые грузоподъемностью, тарой, сроком службы и удельной материалоемкостью (табл. 1).

Приведем такой факт. В 2019 г. на очередной выставке железнодорожного транспорта Уралвагонзавод представил концептуальный полувагон модели 12-196-04, созданный на базе полувагона 12-196-02. Кузов полувагона изготовлен из высокопрочной стали 390–450 МПа (взамен сталей с пределом текучести 325–350 МПа). Было заявлено, что это позволяет при неизменных геометрических параметрах увеличить грузоподъемность вагона на 2 т, повысив тем самым его конкурентные преимущества [9]. При сохранении нагрузки от оси на рельсы такое возможно только за счет уменьшения тары вагона. В то же время в официальном источнике [10] по модели 12-196-04 приведены следующие данные: тара минимальная 24,1, максимальная 25,1 тс, грузоподъемность 74,5 тс.

В последующие годы на базе моделей 12-119, 12-296-01 и 12-1302 (см. табл. 1) каждое предприятие создало свои модели инновационных полувагонов. Проследим это развитие на примере продукции Уралвагонзавода и Тихвинского вагоностроительного завода. Уралвагонзаводом на базе полувагона модели 12-119 был разработан и в 2004 г. запущен в производство полувагон 12-132-03. Его интегральный параметр «удельная материалоемкость» был на 8 % ниже, чем у предшественника, за счет повышения тары вагона на 2 т. Дополнительная тара потребовалась для увеличения объема кузова на 12 м³ (15,8 %), тем самым была повышена эффективность полувагона при перевозке легковесных грузов. При практически одинаковой грузоподъемности полувагонов (см. табл. 1) удельный объем кузова был увеличен с 1,10 м³/тс (12-119) до 1,26 м³/тс (12-132-03). Этот полувагон и по настоящее время пользуется спросом у операторских компаний.

В 2014–2015 гг. на пространстве 1520 появились два инновационных полувагона производства УВЗ (12-196-02) и ТВСЗ (12-9853). По коэффициентам тары эти конструкции хуже, чем базовая модель (12-119), но по удельной материалоемкости на 29,7 % лучше, что служит объективной оценкой их эффективности на протяжении жизненного цикла.

* Тара вагона — это масса всех его частей (в порожнем состоянии), включая тележки и колесные пары. Тару определяют взвешиванием на специальных вагонных весах и указывают на боковых балках вагона.

Таблица 1

Параметры, характеризующие эффективность полувагонов *

Параметр	Модель полувагона 12- / завод-изготовитель							
	119/УВЗ	296-01/АВЗ	1302/КАВАЗ**	132-03/УВЗ	196-02/УВЗ	9853/ТВСЗ***	5190/УВЗ	9869/ТВСЗ
Грузоподъемность (Р), тс	69,0	70,0	70,0	69,5	75,0	75,0	77,0	77,0
Тара (Т), тс****	22,5	24,0	23,0 24,0	24,5	24,0 25,0	24,0 25,0	22,0 23,0	22,0 23,0
Объем кузова (V), м ³	76,0	76,0	77,0	88,0	94,0	92,0	95,0	92,0
Нагрузка от оси на рельсы (p ₀), тс	22,87	23,5	23,5	23,5	25,0	25,0	25,0	25,0
Коэффициент тары (k _т), тах	0,326	0,343	0,343	0,352	0,333	0,333	0,298	0,298
Год постановки на производство	1984	2003	2006	2004	2015	2014	2016	2013
Нормативный срок службы (N), лет	22	22	22	22	32	32	32	32
Удельная материалоемкость (M _у), ×10 ⁻²	1,48	1,56	1,56	1,60	1,04	1,04	0,93	0,93

* Таблица составлена в результате анализа открытых источников по техническим характеристикам грузовых вагонов, их верификации и расчетам параметров, определяющих нормируемый расход материала на получение эффекта от его использования по назначению за установленный ресурс. Наиболее полные сведения, аналогичные тем, что ранее публиковались в издаваемых проектно-конструкторским бюро вагонного главка (ПКБ ЦВ) каталогах «Грузовые вагоны железных дорог колеи 1520 мм. Альбом-справочник», предоставляет источник «АГОНТА. Транспорт и логистика. Справочные ресурсы» [11]. Краткая информация о грузовых вагонах содержится на ресурсе wagon.by [5] и на официальных сайтах заводов-изготовителей.

** Канадский вагоностроительный завод (бывшее АО «Промтрактор-Вагон»).

*** Тихвинский вагоностроительный завод.

**** В числителе — минимальная, в знаменателе — максимальная.

Полувагоны с глухим кузовом моделей 12-5190 и 12-9869 имеют тару на 2 т меньше (за счет отсутствия крышек люков), что позволило увеличить на такую же величину грузоподъемность. Удельная материалоемкость, являясь интегральным критерием, составила 0,93, что на 37 % превышает параметр базового вагона (см. табл. 1).

В начале 2000-х гг. по инициативе Уральского алюминиевого завода (Каменск-Уральский) Уральским конструкторским бюро был спроектирован четырехосный полувагон модели 12-568 с глухим скругленным низом кузова из алюминиевых сплавов (рис. 1а). Прототипом стал полувагон модели 12-197-01 на тележках 18-194-1, реализующих нагрузку от оси на рельсы 245 кН (25,0 тс). Полувагон с кузовом (боковые и торцевые стены) из алюминиевых сплавов имел тару 21 т, что на 3,5 т меньше вагона-прототипа, при этом на такую же величину была увеличена грузоподъемность — с 74,5 до 78,0 т. Коэффициент тары нового

полувагона составил 0,267* против 0,342 у аналога, а удельная материалоемкость уменьшилась на 21,5 %. В 2003 г. был изготовлен опытный образец полувагона, но, к сожалению, работы над проектом были прекращены.

Аналогичная история и у проекта (рис. 1б), разработанного Воронежским акционерным самолетостроительным обществом (ОАО «ВАСО»). Кузов полувагона был изготовлен из алюминиевых пустотелых панелей, разработанных и поставленных уральским заводом. Вес кузова (без рамы) составил 2,8 т, а тара вагона 17,9 т. При использовании в конструкции вагона тележек с осевой нагрузкой 25,0 тс грузоподъемность вагона будет 82,1 тс. Сравнение данных параметров с параметрами современных инновационных полувагонов моделей

* Американский четырехосный полувагон с алюминиевым кузовом имеет коэффициент тары 0,17 при нагрузке от оси на рельсы 32 тс [12].



Рис. 1. Полувагоны с узлами кузова из алюминиевых сплавов **: а — модель 12-568 (УВЗ); б — проект полувагона ВАСО

** Использовано фото, размещенное в открытом доступе по адресу: <https://engcenter.ru/upload/iblock/972/9729987c9e173d0aa12f377fa6ef1166.pdf>.

12-5190 и 12-9869 (см. табл. 1) показывает, что по интегральному показателю удельной металлоемкости новый полувагон на 27 % эффективнее. Опытный образец полувагона был испытан на опытном полигоне в Щербинке [13].

Вагоны-хопперы. Первый опыт использования алюминиевых сплавов в производстве вагонов-хопперов принадлежит АО «Промтрактор-Вагон» — ведущему вагоностроительному предприятию машиностроительно-индустриальной группы «Концерн «Тракторные заводы». В 2013 г. на предприятии был спроектирован и изготовлен хоппер с кузовом из алюминиевого сплава 1565ч [14] модели 19-9944-01, предназначенный для перевозки зерна и сыпучих грузов. Кузов вагона располагается на тележках 18-9836 (Motion Control) с нагрузкой от оси на рельсы 245 кН (25 тс), что позволило при максимальной tare вагона 21,2 тс получить грузоподъемность 78,5 тс (табл. 2).

По сравнению с типовыми стальными вагонами-хопперами, имеющими осевую нагрузку 23,5 тс, грузоподъемность нового хоппера больше на 11,2 %, а коэффициент тары меньше на 18,2 % (см. табл. 2). В отличие от аналогичной по осевой нагрузке и исполнению конструкции модели 19-9870 грузоподъемность увеличилась на 2 т (78,5 против 76,5 тс) за счет уменьшения на ту же величину тары вагона, а материалоемкость снизилась на 22,5 % по сравнению с вагоном модели 19-9870 и более чем на 28 % в сравнении с лучшей конструкцией хоппера советского времени — моделью 19-923 (см. табл. 2). При этом необходимо понимать, что стоимость вагона-хоппера из алюминиевого сплава будет минимум на 30 % больше, а его конкурентными преимуществами являются повышенная коррозионная стойкость, возможность контакта с пищевыми продуктами без нанесения на кузов защитных покрытий, высокая остаточная стоимость алюминия при утилизации, экологичность. К тому же, в отличие от стали, алюминий не подвержен коррозии, поэтому алюминиевые вагоны долговечны и за 40 лет использования теряют не более 10 % своей стоимости.

Научно-производственной корпорацией «Объединенная Вагонная Компания» (НПК ОВК) в 2017 г. на базе хоппера для зерна модели 19-9549 [15] спроектирован, изготовлен и сертифицирован вагон с крышей из высокопрочного алюминиевого сплава. Алюминиевые детали в конструкции зерновоза позволили повысить грузоподъемность до 77 т за счет снижения массы тары более чем на 1 т.

Настоящим техническим и технологическим прорывом можно считать работу компании РМ Рейл по использованию алюминиевых сплавов при производстве грузовых вагонов (хопперов, цистерн и танк-контейнеров). В начале 2017 г. предприятие сертифицировало хоппер-минераловоз модели 19-1244 с кузовом из алюминиевого сплава 1565ч, и тогда же первая партия из 20 вагонов была передана транспортным операторам (ЕвроХиму, ООО «Уралхим-Транс» и др.) в опытно-промышленную эксплуатацию. По некоторым данным [16, 17], более 200 вагонов-хопперов было передано в опытно-промышленную эксплуатацию компании «Первый промышленный оператор».

В табл. 3 приведены параметры лучших моделей хопперов, изготовленных из стальных конструкций, и двух моделей, изготовленных из алюминиевых сплавов (19-1244 и 19-1299). По коэффициенту тары, характеризующему эффективность, модель 19-1244 превосходит свой прототип 1273-01 на 9,5 %, а по удельной материалоемкости — на 11,2 %.

Хоппер модели 19-1299 (рис. 2) относительно хопперов-минераловозов моделей 19-9835-01 и 19-9549-03 производства Тихвинского вагоностроительного завода (ОВК) отличается большей (на 2,3 и 3 т соответственно) грузоподъемностью и в то же время по объему кузова уступает модели 19-9549-03 на 9 м³ (см. табл. 3).

Вагон-хоппер модели 19-1299 представляет собой новое поколение подвижного состава из алюминиевого сплава 1581 [18]. Вместе с тем следует отметить, что из сплава сделан только кузов вагона, а лестницы и помосты на кузове, рама, тормоз-

Таблица 2

Сравнительные параметры типовых хопперов и хопперов из алюминиевого сплава

Параметр	Модель 19- / завод-изготовитель			
	923/СВЗ*	3054/БМЗ**	9870/ ТБСЗ	9944-01/ «Промтрактор-Вагон»
Грузоподъемность (Р), тс	70,0	70,0	76,5	78,5
Тара (Т), тс***	22,0 23,1	22,0 23,0	22,1 23,1	21,0 21,2
Объем кузова (V), м ³	81,0	94,0	101	114
Удельный объем, м ³ /тс	1,157	1,343	1,32	1,452
Нагрузка от оси на рельсы (p ₀), тс	23,3	23,5	25,0	25,0
Погонная нагрузка (q _п), тс/м	7,0	6,318	6,76	6,79
Коэффициент тары (k _т) тах	0,330	0,328	0,302	0,270
Год постановки на производство	1988	1993	2013	2013
Нормативный срок службы (N), лет	26	30	26	30
Удельная материалоемкость (M _у), ×10 ⁻²	1,26	1,09	1,16	0,90

* Стахановский вагоностроительный завод.

** Брянский машиностроительный завод.

*** В числителе — минимальная, в знаменателе — максимальная.

Таблица 3

Параметры вагонов-хопперов

Параметр	Производитель					
	РМ Рейл				ОВК	
	Модель 19-					
	1274	1273-01	1244	1299	9835-01	9549-03
Грузоподъемность (P), тс	71,0	77,0	78,0	79,0	76,7	76,0
Тара (Т), тс *	$\frac{22,0}{23,0}$	$\frac{22,0}{23,0}$	$\frac{21,0}{22,0}$	21,0	$\frac{22,3}{23,3}$	$\frac{23,0}{24,0}$
Объем кузова (V), м ³	107,0	107,0	109,0	111,0	101,0	120,0
Нагрузка от оси на рельсы (p_0), тс	23,5	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0
Погонная нагрузка (q_n), тс/м	6,61	7.03	6,88	6,88	6,79	6,79
Коэффициент тары (k_T) max	0,324	0,298	0,282	0,266	0,303	0,315
Год постановки на производство	2019	2019	2016	2023	2016	2016
Нормативный срок службы (N), лет	26	30	32	40	32	32
Удельная материалоемкость (M_v), $\times 10^{-2}$	1,246	0,993	0,881	0,665	0,937	0,984

* В числителе — минимальная, в знаменателе — максимальная.

ное и автосцепное оборудование, ходовые части выполнены из сталей. Объем кузова увеличен на 2 м³ — до 111 м³, масса тары снижена на 1 т, что позволило повысить грузоподъемность до 79 т по сравнению с хоппером-предшественником (см. табл. 3).



Рис. 2. Хоппер модели 19-1299*

Сплав 1581 легирован скандием, обладает повышенной прочностью (на 35 % выше по сравнению со сплавом 15654 при сохранении плотности), способностью противостоять охрупчиванию в условиях низких температур и стойкостью к агрессивным средам, что позволило довести срок службы вагона до 40 лет [18, 19]. Обращаясь к данным табл. 3, отметим, что материалоемкость вагона-хоппера модели 19-1299 составила 0,665, т. е. более чем на 24 % эффективнее модели 19-1244. Сварка кузова производится высокопроизводительным мето-

дом — трением с перемешиванием [20], что делает сплав более технологичным, снижает вероятность возникновения дефектов соединения, не оказывает вредного влияния на окружающую среду и увеличивает на 10 % показатели прочности и пластичности соединения по сравнению с показателем материала в исходном состоянии. Конструктивной особенностью кузова вагона-хоппера является наличие сплошного (вместо четырех) по всей длине крыши загрузочного люка, что позволяет производить загрузку в процессе движения и адаптироваться ко всем типам погрузочных эстакад.

Цистерны. В общем парке грузовых вагонов цистерны занимают второе место и составляют 20 % — это более 264 тыс. В сравнении с другими типами грузовых вагонов цистерны обладают повышенной тарой. До 1993 г. на территории бывшего Советского Союза цистерны производились только на предприятиях Украины. В табл. 4 представлены параметры лучшего образца цистерны производства Мариупольского завода транспортного машиностроения (МЗТМ). При нагрузке от оси на рельсы 23,4 тс, объеме котла 85,6 м³ и грузоподъемности 68 т тара цистерны составляла 24,8 т. Коэффициент тары цистерны, равный 0,364, превышает рекомендуемую стандартом ОАО «РЖД» «Вагоны грузовые инновационные» величину, равную 0,360.

Анализ параметров последующих лучших моделей цистерн показывает, что все они обладали повышенным коэффициентом тары (0,424, 0,36, 0,362, 0,375) и удельной материалоемкостью в пределах от 1,12 до 1,32 при сроке службы 32 года. В этот период у вагоностроителей не было стремления снижать тару цистерн — на практике действовал принцип «чем тяжелее — тем дороже». Лучшие образцы цистерн (1219 и 1218) производства Рузхиммаша (РМ Рейл) также имели высокий коэффициент тары и высокую материалоемкость (см. табл. 4).

Для снижения тары конструкторы компании РМ Рейл разработали проект цистерны с котлом из алюминиевого сплава (см. табл. 4). Масса тары в сравнении с аналогом по осевой нагрузке 25 тс (модель 1218) уменьшена на 20 %, а грузоподъемность в сравнении с моделью 1219, имеющей нагрузку

* Использовано фото, размещенное в открытом доступе на сайте Алюминиевой Ассоциации по адресу: https://www.aluminas.ru/media/media-publications/pro_metal_l_iz_kakikh_metallov_delayut_gruzovyye_vagony_vagonostroenie_kak_perspektivnyy_rynok_dlya_me/?sphrase_id=35780.

Таблица 4

Сравнительные параметры вагонов-цистерн

Параметр	Перевозки								
	светлых нефтепродуктов						азотной кислоты		
	Производитель / модель 15-								
	МЗТМ/ 1547	УВЗ/ 150-04	УВЗ/ 5157-04	РМ Рейл/ 1219	РМ Рейл/ 1218	РМ Рейл/ проект из Al-сплава	МЗТМ/1406	ОВК/6901	РМ Рейл/ 1232-05
Грузоподъемность (P), тс	68	66	73	69,0	72,7	73,3	57,3	75,0	78,6
Тара (Т), тс *	24,8	28,0	$\frac{25}{27}$	$\frac{23,2}{25,0}$	27,3	21,7	$\frac{21,1}{22,1}$	$\frac{23,5}{25,0}$	$\frac{20,4}{21,4}$
Объем котла (V), м ³	85,6	85,6	87,1	85,5	90,0	89,5	40,0	54,78	61,8/51,9
Диаметр котла, мм	3200	3200	3200	3200	3260	3200	2214 (вн.)	–	2800 (вн.)
Нагрузка от оси на рельсы (p ₀), тс	23,4	23,5	25,0	23,5	25,0	25,0	20,3	25,0	25,0
Погонная нагрузка (q), тс/м	7,72	7,82	8,32	7,82	8,32	7,90	6,605	8,32	8,32
Полезная погонная нагрузка (q _п), тс/м	5,657	5,491	6,073	5,740	6,048	6,098	4,767	6,239	6,539
Коэффициент тары (k _т) тах	0,364	0,424	0,36	0,362	0,375	0,296	0,385	0,333	0,272
Год постановки на производство	1988	2005	2013	2004	–	–	1963	2017	2022
Нормативный. срок службы (N), лет	32	32	32	32	32	40	20	40	40
Удельная материалоемкость (M _в), ×10 ⁻²	1,13	1,32	1,12	1,13	1,17	0,74	1,60	0,83	0,68

* В числителе — минимальная, в знаменателе — максимальная.

от оси на рельсы 23,5 тс, увеличена более чем на 6 %. Показатель удельной материалоемкости снизился почти на 37 и 35 % соответственно (см. табл. 4).

Нефтеналивные грузы отправляются маршрутными поездами, состоящими из 70 вагонов-цистерн. Поезд, сформированный из цистерн модели 15-150-04, будет весить 6580 т, а сформированный из цистерн с алюминиевым котлом, — 6650 т, т. е. оба веса практически одинаковы, но вес тары второго поезда будет на 3,8 % меньше. Снижение тары вагона при прочих равных условиях приводит к снижению нагрузок на рельсовую колею, уменьшению сопротивления движения, что при неизменной силе тяги позволяет сократить энергетические затраты на движение, повысить скорость движения поездов и тем самым увеличить пропускную способность железных дорог.

В период с 1963 по 1995 г. Мариупольский завод тяжелого машиностроения производил цистерну ЖКЦ-39 для кислотно-меланжа (модель 15-1406) с котлом из алюминиевых сплавов АД0, АД1, А1 (см. табл. 4) [13, 21, 22].

С 2017 г. акционерное общество «Тихвинхиммаш» (входит в состав ОВК) производит вагон-цистерну нового поколения из алюминиевых сплавов (АД0, Амгб, 1565ч) модели 15-6901 для перевозки концентрированной азотной кислоты и других химических грузов с расчетной статической нагрузкой от колесной пары на рельсы 245 кН (25,0 тс) (см. табл. 4). Несущие элементы котла (цилиндрическая обечайка, днища, поддон, труба слива-налива) изготовлены из алюминиевого сплава АД0. Толщина листов обечайки 28 мм, днища котла 32 мм. Лапы котла, накладки и листы изготовлены из сплава Амгб или 1565ч [13]. Для предотвращения коррозии между лапами котла и рамы установлена прокладка из стеклотекстолита. Опирающие котла на лежни шкворневых балок осуществляется через подкладные листы из высокомолекулярных полимеров [23]. 30 таких цистерн для перевозки концентрированной азотной кис-

лоты поставлены в адрес АО «Объединенная химическая компания «Уралхим» (рис. 3).



Рис. 3. Общий вид цистерны с котлом из алюминиевых сплавов*

Авторы патента [24] считают, что котел цистерны, выполненный из сплава АД0, обладает повышенной металлоемкостью, в связи с чем ими предложена полезная модель, технический результат которой заключается в снижении массы котла цистерны из алюминиевого сплава и в увеличении ее грузоподъемности при сохранении запаса прочности и обеспечении высокой коррозионной стойкости, достаточной для перевозки коррозионно-активных грузов. Этот результат достигается изготовлением котла цистерны из алюминиевого сплава, обладающего гарантируемым значением условного предела те-

* Использовано фото, размещенное в открытом доступе на сайте ОВК по адресу: https://www.uniwagon.com/products/tank_cars_for_transportation_of_chemically_active_substances/tank_car_for_concentrated_nitric_acid_model_15-6901/

кучести $\sigma_{0,2}^*$ не менее 45 МПа с обечайкой толщиной стенки от 7 до менее 25 мм и днищами толщиной стенок от 7 до менее 28 мм [24].

Авторами статьи проанализированы предлагаемые патентом частные формы полезной модели и представлены в виде зависимостей толщины цилиндрической оболочки и днищ котла от условного предела текучести ($\sigma_{0,2}$) при минимально гарантируемом значении временного сопротивления (σ_B). Например, частная форма полезной модели 4 — 4^I — 4^{II} содержит изменение толщин оболочки и днища в диапазоне от 9 мм (точка 4) до менее 21 мм (точка 4^I) для оболочки и до менее 25 мм (точка 4^{II}) для днища с гарантируемым значением условного предела текучести $\sigma_{0,2}$ не менее 90 МПа и минимально гарантируемым значением временного сопротивления $\sigma_B = 110$ МПа (рис. 4).

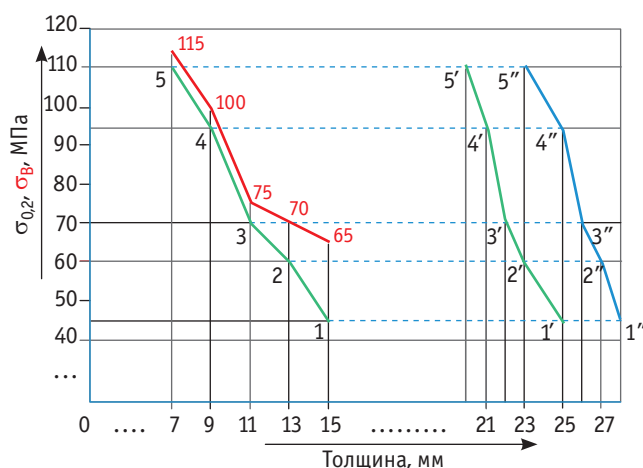


Рис. 4. Частные формы полезных моделей котлов цистерн из алюминиевых сплавов

Осенью 2023 г. компания РМ Рейл сертифицировала цистерну модели 15-1232-05 для перевозки концентрированной азотной кислоты и других химических грузов (см. рис. 4, табл. 4). Котел цистерны изготовлен из алюминиевого сплава марки 1407 ($\sigma_{0,2} = 95$ МПа, $\sigma_B = 145$ МПа [13]) с высокой коррозионной стойкостью в агрессивных средах, сопоставимой с чистым алюминием, но превосходящего его по прочности более чем в 2 раза.

Использование сплава позволило уменьшить толщину плит стенок и днищ котла (что привело к снижению тары цистерны до 21,4 т), увеличить грузоподъемность до 78,6 т, при этом объем котла составил 61,8 м³. По перечисленным параметрам цистерна значительно превосходит аналог — модель 15-6901 (см. табл. 4). При одинаковых значениях осевой нагрузки и сроке службы удельная материалоемкость цистерны модели 15-1232-05 на 18 % меньше, т. е. на эту величину эффективность данной конструкции больше (рис. 5).

Линейка продукции из алюминиевых сплавов продолжена получением свидетельства о допущении Российского морского



Рис. 5. Цистерна модели 15-1232-05 (Ружиммаш)**

регистра судоходства на контейнер-цистерну из алюминиевого сплава для перевозки и хранения сжиженного природного газа АКЦ-СПГ 42,7. Контейнер-цистерна изготовлена из алюминиевого сплава марки 1581, что привело к снижению тары на 1000 кг в пользу увеличения грузоподъемности***.

ВЫВОДЫ

1. Снижение тары грузового вагона позволяет увеличить на ту же величину его грузоподъемность, что за счет большей массы нетто поезда повышает провозную способность железных дорог.
2. Использование алюминиевых сплавов продлевает срок службы вагонов и значительно снижает удельную материалоемкость конструкции. Например, удельная материалоемкость вагона-хоппера модели 19-1299 с кузовом из алюминиевого сплава 1581 на 33 % меньше, чем его лучшего стального аналога (19-1273-01), и на 25 % меньше, чем у своего предшественника — модели 19-1244 из алюминиевого сплава 1565Ч.
3. Вагон-цистерна модели 15-1232-05 с котлом из алюминиевого сплава 1407 имеет на 18 % меньшую удельную материалоемкость, чем аналогичная по основным параметрам цистерна из сплава АД0 модели 15-6901. По сравнению с цистерной, которая имеет нагрузку от оси на рельсы 20,3 тс, срок службы 20 лет и котел, выполненный из сплава АД0, материалоемкость модели 15-1232-05 ниже более чем на 57 %.
4. При неизменных размерах перевозок снижение тары обеспечивает сокращение парка вагонов и локомотивов, потребности в развитии пропускной способности железных дорог, а также в локомотивных и поездных бригадах.
5. Преимущества алюминиевого подвижного состава по сравнению со стальными вагонами определяются уникальными свойствами собственно алюминия и сплавов на его основе: низким весом при высокой прочности, коррозионной стойкостью, способностью переносить экстремально высокие и низкие температуры.

** Использовано фото, размещенное в открытом доступе на сайте РМ Рейл по адресу: <https://rmrail.ru/news/rm-reyl-prezentovala-dve-novykh-modeli-podvizhnogo-sostava-iz-alyuminiya/>.

*** <https://opzt.ru/news/kompanija-rm-rejl-sertificirovala-kontejner-cisternu-iz-alyuminievogo-splava-dlja-perevozki-i-hranenija-szhizhennogo-prirodnogo-gaza-2/>

Сведения об авторах:

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

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

Authors information:

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

Konstantin M. Kolyasov,
PhD in Engineering, Associate Professor of Railway Cars Department, Ural
State University of Railway Transport

Литература

1. Об утверждении приоритетных направлений проектов технологического суверенитета... : постановление Правительства Российской Федерации от 15.04.2023 г. № 603 (в ред. от 02.12.2023 г.). URL: <https://base.garant.ru/406741957/> (дата обращения: 28.08.2024).
2. Смольянинов А. В., Кармацкий В. Ф., Колясов К. М. Анализ конструкций, параметров и перспективы развития инновационных грузовых вагонов // Транспорт Урала. 2024. № 1 (80). С. 9–17. DOI: 10.20291/1815-9400-2024-1-9-17.
3. Смольянинов А. В., Баранов Д. А., Колясов К. М. Погонная нагрузка как фактор увеличения провозной способности железных дорог // Инновационный транспорт. 2024. № 2 (52). С. 26–33. DOI:10.20291/2311-164X-2024-2-26-33.
4. СТО РЖД 1.07.002-2010. Инфраструктура железнодорожного транспорта на участках обращения грузовых поездов повышенного веса и длины. Технические требования. URL: <https://base.garant.ru> (дата обращения: 15.02.2024).
5. Полувагон модели 12-119. URL: <https://vagon.by> (дата обращения: 15.09.2023).
6. СТО РЖД 10.002–2015. Вагоны грузовые инновационные. Правила оценки экономической эффективности : утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 26.04.2016 г. № 768р (с изм. и доп., введенными распоряжением ОАО «РЖД» от 30.08.2016 г. № 1826р). Екатеринбург : УралЮрИздат, 2016. 38 с.
7. ГОСТ 27782–88. Материалоемкость изделий машиностроения. Термины и определения. Москва : Изд-во стандартов, 1988. 6 с.
8. Рекомендации о включении показателей материалоемкости в стандарты и технические условия на изделия машиностроения и приборостроения. Р 50-3-87. URL: <https://meganorm.ru/Data2/1/4293850/4293850583.htm> (дата обращения: 29.08.2024).
9. Концептуальный полувагон на штамповочной тележке представил УВЗ. URL: http://www.souzop.ru/news/companies_news/1510/ (дата обращения: 15.09.2020).
10. Полувагон модели 12-196-04. URL: <https://vagon.by/model/12-196-04/> (дата обращения: 04.09.2024).
11. АГОНТА. Транспорт и логистика. Справочные ресурсы. URL: https://www.agonta.com/cont_ru/resources_4.html (дата обращения: 02.09.2024).
12. Почиталов Ю. В., Кыак К. В. Выбор параметров полувагона из алюминиевых сплавов. URL: <https://engcenter.ru/upload/iblock/972/9729987c9e173d0aa12f377fa6ef1166.pdf> (дата обращения: 04.09.2024).
13. Алюминий в производстве железнодорожных вагонов. URL: <https://tdsm.ru/article/view/aluminij-v-proizvodstve-zeleznodoroznyh-vagonov> (дата обращения: 15.09.2022).

References

1. On the approval of priority areas of technological sovereignty projects... : the Order of the Government of the Russian Federation dated 15.04.2023 No. 603 (in edition dated 02.12.2023). URL: <https://base.garant.ru/406741957/> (access date: 28.08.2024). (In Russian).
2. Smolyaninov A. V., Karmatskiy V. F., Kolyasov K. M. Analysis of designs, parameters and prospects for the development of innovative freight cars. *Transport of the Urals*. 2024. No. 1 (80). Pp. 9–17. DOI: 10.20291/1815-9400-2024-1-9-17. (In Russian).
3. Smolyaninov A. V., Baranov D. A., Kolyasov K. M. Linear load as a factor in increasing the carrying capacity of railways. *Innotrans*. 2024. No. 2 (52). Pp. 26–33. DOI:10.20291/2311-164X-2024-2-26-33. (In Russian).
4. STO RZD 1.07.002-2010. Railway transport infrastructure in the areas of handling freight trains of increased weight and length. Technical requirements. URL: <https://base.garant.ru> (access date: 15.02.2024). (In Russian).
5. Gondola car models 12-119. URL: <https://vagon.by> (access date: 15.09.2023). (In Russian).
6. Standard STO RZD 10.002–2015. Innovative freight cars. Rules for assessing economic efficiency : approved by the Order of the JSC «RZD» dated 26.04.2016 No. 768r (with changes and additions, approved by the Order of the JSC «RZD» dated 30.08.2016 No. 1826r). Ekaterinburg, 2016. 38 p. (In Russian).
7. GOST 27782–88. Materials consumption for engineering products. Terms and definitions. Moscow : Publishing House of Standards, 1988. 6 p. (In Russian).
8. Recommendations on the inclusion of material consumption indicators in standards and specifications for mechanical engineering and instrument engineering products. R 50-3-87. URL: <https://meganorm.ru/Data2/1/4293850/4293850583.htm> (access date: 29.08.2024). (In Russian).
9. UVZ presented a conceptual gondola car on a stamped-welded trolley. URL: http://www.souzop.ru/news/companies_news/1510/ (access date: 15.09.2020). (In Russian).
10. Gondola car models 12-196-04. URL: <https://vagon.by/model/12-196-04/> (access date: 04.09.2024). (In Russian).
11. AGONTA. Freight forwarding and logistics. Files. URL: https://www.agonta.com/cont_ru/resources_4.html (access date: 02.09.2024). (In Russian).
12. Pochitalov Yu. V., Kyakk K. V. The choice of parameters of a gondola car made from aluminum alloys. URL: <https://engcenter.ru/upload/iblock/972/9729987c9e173d0aa12f377fa6ef1166.pdf> (access date: 04.09.2024). (In Russian).
13. Aluminum in the production of railway cars. URL: <https://tdsm.ru/article/view/aluminij-v-proizvodstve-zeleznodoroznyh-vagonov> (access date: 15.09.2022). (In Russian).

14. Хоппер для зерна модель 19-9549. URL: <https://vagon.by/model/19-9549> (дата обращения: 09.09.2024).
15. Алюминий в грузовом вагоностроении: мировой и российский опыт. URL: <https://rollingstockworld.ru/komponenty/alyuminij-v-gruzovom-vagonostroenii-mirovoj-i-rossijskij-opyt/> (дата обращения: 09.09.2024).
16. Опять по шпалам. URL: <https://www.sovmash.com/node/1879> (дата обращения: 09.09.2024).
17. Первый промышленный оператор. URL: <https://pp-operator.com/#popup:infoblock> (дата обращения: 16.09.2024).
18. ГОСТ Р 59598–2021. Алюминий и алюминиевые сплавы. Полуфабрикаты для производства элементов кузовов грузового подвижного состава железнодорожного транспорта. Технические условия и сортамент. Москва : Российский институт стандартизации. 2021. 12 с.
19. Из каких металлов делают грузовые вагоны? URL: https://www.prometall.info/analitika/iz_kakikh_metallov_delayut_gruzovye_vagony (дата обращения: 16.09.2024).
20. Применение сварки трением с перемешиванием. URL: <https://de.donstu.ru/structure/masp/book> (дата обращения: 16.09.2024).
21. Специализированные цистерны для перевозки опасных грузов. Москва : Изд-во стандартов, 1993. 215 с.
22. Грузовые ЖД вагоны. Альбом-справочник. Колея 1520 мм. Часть 6.3. Вагоны-цистерны для химических веществ. URL: https://www.agonta.com/dwlds/1520mm_tanks_4_chem.pdf (дата обращения: 25.09.2024).
23. Вагон-цистерна для концентрированной азотной кислоты, модель 15-9601. Руководство по эксплуатации. ЦДЛР.4015.00.00.000РЭ. URL: <https://www.uniwagon.com/media/documents> (дата обращения: 16.09.2024).
24. Цистерна из алюминиевого сплава / И. А. Хилов, В. И. Гуськов, Н. Ш. Сапожникова : патент на полезную модель 200905 Российская Федерация. № 2020111483; заявл. 19.03.2020; опубл. 17.11.2020, Бюл. № 32.

14. Grain hopper models 19-9549. URL: <https://vagon.by/model/19-9549> (access date: 09.09.2024). (In Russian).
15. Aluminum in freight car building: global and Russian experience. URL: <https://rollingstockworld.ru/komponenty/alyuminij-v-gruzovom-vagonostroenii-mirovoj-i-rossijskij-opyt/> (access date: 09.09.2024). (In Russian).
16. On the sleepers again. URL: <https://www.sovmash.com/node/1879> (дата обращения: 09.09.2024). (In Russian).
17. The first industrial operator. URL: <https://pp-operator.com/#popup:infoblock> (access date: 16.09.2024). (In Russian).
18. GOST R 59598–2021. Aluminium and aluminium alloys. Products for production of elements of bodies of freight rolling stock of railway transport. Specifications and assortment. Moscow, 2021. 12 p. (In Russian).
19. What metals are used to make freight cars? URL: https://www.prometall.info/analitika/iz_kakikh_metallov_delayut_gruzovye_vagony (access date: 16.09.2024). (In Russian).
20. Application of friction welding with stirring. URL: <https://de.donstu.ru/structure/masp/book> (access date: 16.09.2024). (In Russian).
21. Specialized tanks for the transportation of dangerous cargoes. Moscow : Publishing House of Standards, 1993. 215 p. (In Russian).
22. Freight railway cars. The reference album. Track 1520 mm. Part 6.3. Tank cars for chemicals. URL: https://www.agonta.com/dwlds/1520mm_tanks_4_chem.pdf (access date: 25.09.2024). (In Russian).
23. Tank car for concentrated nitric acid, model 15-9601. User Manual. TsDLR.4015.00.00.000RE. URL: <https://www.uniwagon.com/media/documents> (access date: 16.09.2024). (In Russian).
24. Khilov I. A., Gus'kov V. I., Sapozhnikova N. Sh. Aluminum alloy tank car : patent for utility model 200905 Russian Federation. No. 2020111483; filed 19.03.2020; publ. 17.11.2020, Bulletin No 32. (In Russian).

Объем статьи 1 авторский лист

Научная статья

УДК 656.212.6

Вопросы стандартизации и основные направления развития научных исследований в области сохранности вагонного парка

Нина Фридриховна Сирина¹, Максим Анатольевич Кузнецов², Вадим Борисович Свердлов³,
Антон Владимирович Ключин⁴

¹ Уральский государственный университет путей сообщения, Екатеринбург, Россия

² АО «ВНИИЖТ», Москва, Россия

³ Свердловский учебный центр профессиональных квалификаций — структурное подразделение Свердловской железной дороги, Екатеринбург, Россия

⁴ Служба вагонного хозяйства Свердловской дирекции инфраструктуры ОАО «РЖД», Екатеринбург, Россия

Standardization issues and the main directions of scientific research development in the field of car fleet safety

Nina F. Sirina¹, Maxim A. Kuznetsov², Vadim B. Sverdlov³, Anton V. Klyushin⁴

¹ Ural State University of Railway Transport, Ekaterinburg, Russia

² AO «VNIIZhT», Moscow, Russia

³ Sverdlovsk Educational Center for the Professional Qualifications — structural division of the Sverdlovsk Railway, Ekaterinburg, Russia

⁴ Car Service Division of the Sverdlovsk Infrastructure Directorate of the JSC «RZD», Ekaterinburg, Russia

Аннотация

Проанализированы основные причины повреждений вагонов на путях общего и необщего пользования, такие как применение неисправных машин, механизмов для погрузки и выгрузки вагонов; использование рейферного метода разгрузки; нарушения технических условий размещения и крепления грузов и правил производства операций. Отмечено, что за последние годы наметилась тенденция к снижению повреждений вагонов, одним из ключевых факторов этого стало выполнение участниками рынка железнодорожных перевозок требований ГОСТ 22235–2010. Показано, что дальнейшее совершенствование мер по обеспечению сохранности вагонного парка невозможно без переработки действующей нормативно-технической документации, в том числе ГОСТ 22235–2010, в соответствии с современным уровнем развития железнодорожной техники и подвижного состава.

Рассмотрены основные изменения, вошедшие в новую редакцию ГОСТ. Определены основные задачи, которые позволят обеспечить сохранность вагонного парка: организация рейферной выгрузки, особенно в портах Дальневосточного региона, где повреждения подвижного состава остаются значительными; решение вопроса о скорости роспуска вагонов на сортировочных горках в связи с изменением конструкции вагонов и появлением новых моделей поглощающих аппаратов; выполнение требований стандарта всеми участниками рынка железнодорожных перевозок.

Ключевые слова: повреждение вагона, сохранность вагонного парка, сортировочная горка, соударение вагонов, рейферная выгрузка, поглощающий аппарат, правила перевозки грузов

Abstract

The main causes of damage to cars on public and non-public tracks are analyzed, such as the use of faulty machines and mechanisms for loading and unloading cars; the use of a grab unloading method; violations of technical conditions for the placement and fastening of goods and rules of operations. It was noted that in recent years there has been a tendency to reduce damage to cars, one of the key factors in this was the fulfillment by participants in the railway transportations of the requirements of GOST 22235–2010. It is shown that further improvement of measures to ensure the safety of the carriage fleet is impossible without reworking the current regulatory and technical documentation, including GOST 22235–2010, in accordance with the current level of development of railway equipment and rolling stock.

The main changes included in the new edition of GOST are considered. The main tasks that will ensure the car fleet safety have been identified: the organization of grappling unloading, especially in the ports of the Far Eastern region, where damage to rolling stock remains significant; resolving the issue of the speed of unloading cars on sorting slides due to changes in the design of cars and the appearance of new models of absorbing devices; meeting the requirements of the standard by all participants in the railway transportations.

Keywords: damage to the carriage, safety of the carriage fleet, grave hump, collision of cars, grab unloading, absorbing apparatus, rules of cargo transportation

DOI: 10.20291/1815-9400-2025-1-25-32

25

ВВЕДЕНИЕ

Эффективное функционирование железнодорожной системы России напрямую зависит от технического состояния грузовых вагонов. Это подтверждается приказом Министерства путей сообщения Российской Федерации № 13 ЦЗ от 08.09.1999 г. [1], который акцентирует внимание на важной роли исправности вагонов для удовлетворения потребностей национальной экономики при грузоперевозках. Стабильность железнодорожного транспорта, его пропускная способность и, как следствие, экономическая эффективность всей отрасли невозможны без поддержания грузовых вагонов в исправном техническом состоянии. А это, в свою очередь, достигается комплексными мерами, направленными на обеспечение сохранности вагонов на всех этапах эксплуатации.

По данным Управления вагонного хозяйства Центральной дирекции инфраструктуры ОАО «РЖД» [2], в процессе обеспечения сохранности вагонного парка наблюдается тенденция к снижению количества поврежденных вагонов (рис. 1): в 2013 г. — 118 380; в 2016 г. — 127 080 (максимальное значение за наблюдаемый период); в 2023 г. — 69 709 вагонов.

Вместе с тем, хотя общее количество поврежденных вагонов уменьшается, оно остается существенным, что требует принятия мер для решения этой проблемы.

АНАЛИЗ ПОВРЕЖДЕНИЙ ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ НА ПУТЯХ ОБЩЕГО И НЕОБЩЕГО ПОЛЬЗОВАНИЯ

Подавляющее число повреждений возникает из-за нарушения технологии погрузки-выгрузки вагонов в морских портах при

несоблюдении требований ГОСТ 22235–2010 [3] (в 2023 г. — 54 741 вагон, что на 3,2 % больше, чем в 2022 г., — 53 058 вагонов [2]).

Как правило, повреждения происходят по следующим причинам [4]:

использование неисправных (морально устаревших) машин и механизмов при погрузке и выгрузке;

несоблюдение правил размещения и крепления грузов;

превышение скорости соударения вагонов на сортировочных горках;

плохое состояние путей необщего пользования;

нарушение правил закрепления составов на станциях.

Требования к обеспечению сохранности вагонного парка приведены в ГОСТ 22235–2010, который был разработан в 2007–2009 гг. на базе действующего тогда ГОСТ 22235–1976, держателем стандарта является АО «ВНИИЖТ».

В последнее десятилетие произошел значительный скачок в развитии технологий. Появились инновационные вагоны с высокой скоростью и повышенной грузоподъемностью, разработаны новые устройства для погрузки и разгрузки товаров. Современные сортировочные горки оснащены новейшими системами автоматизации торможения. Используются передовые технологии контроля и автоматического управления процессами разогрева грузов в размораживающих установках.

Отдельно стоит выделить проект «Цифровая железная дорога», который разрабатывает ОАО «РЖД» [5]: он направлен на внедрение инновационных технологий в существующие процессы железнодорожного транспорта для повышения его безопасности и эффективности.

Все эти изменения требуют пересмотра нормативно-технической документации, касающейся сохранности грузовых вагонов.

Один из ключевых факторов, которые влияют на повреждение вагонов при погрузочно-разгрузочных работах, связан с тем, что ГОСТ 22235–2010 не является обязательным для применения и носит лишь рекомендательный характер.

Решение проблемы сохранения вагонного парка становится особенно актуальным в связи с необходимостью соблюдать условия приема-передачи вагонов с путей ОАО «РЖД» на пути необщего пользования и обеспечивать безопасность маневров на станционных путях.

Политические события, происходившие в стране и обществе на рубеже XX и XXI веков, оказали значительное влияние на развитие железнодорожного транспорта, причем реформирование отрасли не прошло бесследно для вагонного хозяйства [6]. Ключевым моментом в реорганизации стало прекращение деятельности Министерства путей сообщения СССР (МПС) и создание ОАО «Российские железные дороги». Это послужило отправной точкой для изменений в вагонном хозяйстве.

Дальнейшим развитием реорганизации стало разделение вагонного хозяйства на две составляющие — эксплуатационную и ремонтную.

В МПС создали структуру организации работ по сохранению вагонного парка, опираясь на результаты многолетних исследований и накопленный опыт в области предотвращения повреждений вагонов на путях.

Ключевым препятствием было то, что все вагоны принадлежали одному собственнику — государству. Появление частных владельцев вагонов и развитие рынка железнодорожных услуг привели к изменению ролей и разделению интересов участников отрасли железнодорожных перевозок.

В СССР параллельно с созданием системы контроля за сохранностью вагонного парка проводились масштабные научно-исследовательские, конструкторские и проектные работы. Они были направлены на обеспечение долговечности и надежности вагонов в процессе и их производства, и эксплуатации.

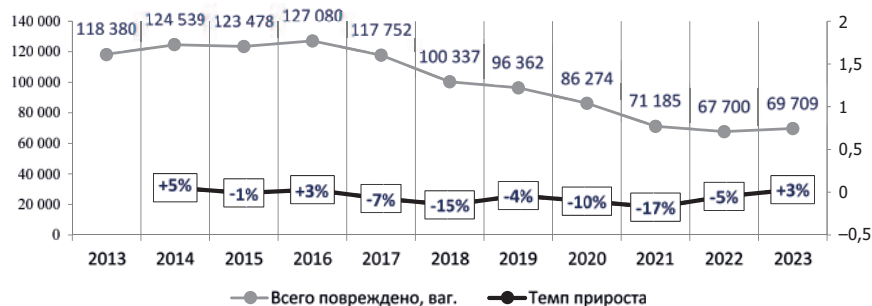


Рис. 1. Динамика повреждения грузовых вагонов за 2013–2023 гг. [2]

В результате появились передовые для того времени конструкции вагонов с металлической обшивкой, полом и бортами. Также активно разрабатывались и применялись антикоррозионные материалы. Наиболее значимым достижением стало создание стандарта по обеспечению сохранности вагонного парка при производстве маневровых и погрузочно-разгрузочных работ. Эта работа началась в конце 1960-х гг. в Центральном научно-исследовательском институте железнодорожного транспорта (ЦНИИ МПС, ныне — АО «ВНИИЖТ»). Группа ученых-железнодорожников под руководством кандидата технических наук, заведующего лабораторией Уральского отделения ЦНИИ МПС Сендерова Г. К. разработала основные принципы обеспечения сохранности вагонов. Для этих целей были выполнены исследования, расчеты, испытания, поскольку каждая цифра, вошедшая в стандарт, требовала подтверждения.

В рамках упомянутых исследований были изучены различные аспекты организации и управления сохранностью вагонного парка на протяжении почти 40 лет — до момента разделения рынка железнодорожных перевозок.

С началом реформирования железнодорожного транспорта появилась необходимость выстраивать взаимоотношения между собственниками (операторами) подвижного состава, владельцем инфраструктуры, промышленными предприятиями и вагоноремонтным комплексом. Это привело к пересмотру нормативных документов ОАО «РЖД», и в 2010 г. АО «ВНИИЖТ» разработало новый стандарт по сохранности — ГОСТ 22235–2010, а позднее, в 2019 г., АО «ВНИИЖТ» создало еще один стандарт ОПЖТ [7], направленный на оптимизацию внутренних процессов организации.

К сожалению, цель, которую поставило перед собой руководство отрасли по созданию нормативных документов для обеспечения сохранности вагонного парка в новых условиях, не была достигнута, стандарт ОПЖТ не увидел свет.

На сегодняшний день складывается противоречивая ситуация, которая заключается в том, что требования к производству новых вагонов и их эксплуатации регулируются техническими регламентами и ПТЭ. С другой стороны, ГОСТ носит добровольный (рекомендательный) характер и не обязывает исполнять требования к сохранности вагонов.

Таким образом, встает вопрос о разработке и внедрении системы по обеспечению сохранности вагонного парка, которая будет учитывать внутренние и внешние факторы. Эта система должна решать управленческие задачи: анализировать статистическую информацию, контролировать работу предприятий и предлагать эффективные решения для организации непрерывного процесса сохранности вагонного парка.

ЗАДАЧИ ПЕРЕРАБОТКИ ГОСТА ПО СОХРАННОСТИ ВАГОННОГО ПАРКА

Первым шагом к появлению такой системы должна быть разработка новой редакции стандарта по сохранности вагонного парка. Одна из целей этой редакции — введение правил обращения с грузовыми вагонами, принадлежащими разным собственникам, для обеспечения их сохранности в условиях широкой механизации и автоматизации погрузо-разгрузочных работ на путях необщего пользования и при маневровой ра-

боте. Следует отметить междисциплинарность задач, решаемых стандартом: в нем рассматриваются, с одной стороны, все типы грузовых вагонов и требования к обеспечению их сохранности, а с другой — большое количество взаимодействующих устройств, различных по назначению, параметрам, характеру работы и принципам воздействия на вагоны.

В процессе переработки ГОСТ 22235–2010 были тщательно изучены и проанализированы результаты предыдущих научных исследований. Проведены практические наблюдения, чтобы убедиться в надежности сохранности вагонов, а также осмотрены ключевые устройства, которые взаимодействуют с ними. Кроме того, исследованы актуальные стандарты, правила и инструкции по эксплуатации различных устройств, связанных с вагонами.

Разработка новой редакции ГОСТ 22235 осуществлялась в рамках Программы национальной стандартизации на 2022 год (шифр 1.02.045-2.105.20) и Программы межгосударственной стандартизации на 2022 год (шифр RU.1.027-2020).

По сравнению с редакцией ГОСТ 22235–2010 структура стандарта осталась неизменной (табл. 1).

ОСНОВНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ

По первой редакции проекта стандарта было получено 115 отзывов (в некоторых было сделано не одно, а несколько предложений), из них 15 без замечаний. Приняты к сведению 19 замечаний, приняты — 44, частично приняты — 7, отклонены — 45 замечаний и предложений.

В целом замечания могут быть подразделены следующим образом:

- улучшающие структуру и редакцию;
- уточняющие отдельные требования;
- предлагающие исключить ряд требований или отдельные из них;
- предлагающие включить дополнительные требования.

Общий анализ поступивших отзывов показывает, что некоторые замечания имеют противоположную направленность. Так, грузополучатели и грузоотправители в подавляющем большинстве предлагают исключить или сделать менее жесткими требования, заложенные в стандарт, в то же время владельцы подвижного состава и вагоностроители, наоборот, рекомендуют ужесточить требования, направленные на обеспечение сохранности вагонов.

В качестве характерного примера можно привести предложение ПАО «ПГК» изменить в пункте 5.2.4 действующего стандарта требование к увеличению толщины груза, оставшегося после выгрузки грейфером. Вместо требования производить выгрузку остатков груза при толщине оставшегося слоя менее 0,1 м (10 см) рекомендуется поднять это значение до 0,5 м. Однако простейшие расчеты показывают, что в таком случае пришлось бы производить выгрузку практически 18 м³ груза другими технологиями, в том числе и вручную. С учетом актуальности изменения толщины 0,1 м в новом стандарте принято значение 0,3 м.

Рекомендации по исключению из стандарта ряда требований мотивировались тем, что эти требования зафиксированы в действующих документах ОАО «РЖД», Минтранса России

Таблица 1

Структурная схема ГОСТ 22235

1. Область применения						
↓						
2. Нормативные ссылки						
↓						
3. Термины и определения						
↓						
4. Общие требования по обеспечению сохранности вагонов						
4.1 Вагоны всех типов	4.2 Полувагоны	4.3 Крытые вагоны	4.4 Вагоны-платформы	4.5 Вагоны-цистерны	4.6 Изотермические	4.7 Специализированные
↓						
5. Требования к устройствам, взаимодействующим с вагонами						
5.1 Устройства всех типов (кроме грейферов)	5.2 Приспособления для грузоподъемных операций	5.3 Вагоно-опрокидыватели	5.4 Погрузчики и разгрузчики	5.5 Вибрационные и рыхлительные устройства	5.6 Тепляки и размораживающие устройства	5.7 Устройства сортировочных горок и маневровые устройства
↓						
6. Железнодорожный путь						
↓						
Библиография						

и международных стандартах. Например, из текста проекта исключены ссылки на технические условия размещения и крепления грузов в вагонах и контейнерах (ЦМ-943) [8].

Кроме того, были отклонены предложения включить в стандарт ссылки на Правила перевозок жидких грузов наливом в вагонах-цистернах и вагонах бункерного типа для перевозки нефтебитума, утвержденные Советом по железнодорожному транспорту государств — участников Содружества (протокол заседания № 550 от 21–22 мая 2009 г.) [9] и введенные в действие 1 июля 2009 г., и на Правила перевозок железнодорожным транспортом грузов наливом в вагонах-цистернах и вагонах бункерного типа для перевозки нефтебитума, утвержденные Минтрансом России (приказ от 29 июля 2019 г. № 245) [10].

Отдельно следует остановиться на разделах стандарта, которые вызвали наибольшее обсуждение и оставались спорными на протяжении всей работы с новой редакцией ГОСТ 22235. К таким разделам прежде всего относится ранее действовавший пункт 4.1.8. Еще комитет ОСЖД в своем обращении в Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации (МГС) указывает на этот пункт как на вызывающий значительные затруднения в определении разницы в нагрузках тележек и величины нагрузки, приходящейся на каждую из тележек, и предлагает конкретизировать нормы с учетом конструкции вагонов. Из обсуждения этого пункта ясно, что особые сложности связаны с требованием рассчитывать нагрузку по формуле

$$P = g \left(\frac{m_b + m_r}{2} - m_t \right), \quad (1)$$

где g — ускорение свободного падения, м/с²; m_b — масса тары вагона, кг; m_r — грузоподъемность вагона, кг; m_t — масса тележки вагона, кг.

Предложения об изменении пункта дали Государственное объединение «Белорусская железная дорога», ОСЖД, АО «ВНИКТИ», АО «НК КТЖ», Восточно-Сибирская железная дорога, ООО «ВНИЦТТ», АО «ЗМК», Департамент технической политики ОАО «РЖД». В результате совместной работы специалистов этих участников рынка железнодорожных перевозок пункт 4.1.8 проекта стандарта стал значительно проще: в нем установлены конкретные значения разницы в загрузке тележек и определено, что максимальная статическая нагрузка от колесной пары на рельсы не должна превышать нагрузки, регламентированной в ГОСТ 4835–2013.

Большое внимание было уделено разделам, посвященным выгрузке грейферными кранами и экскаваторами. В обсуждении этих требований приняли участие ПАО «ПГК», Московская железная дорога, Департамент технической политики ОАО «РЖД». ЦТЕХ ОАО «РЖД» обратил особое внимание на использование в структурных подразделениях высокопроизводительных перегружателей на пневмоколесном ходу Fuchs (ФУКС), оборудованных гидравлическими захватами. Предложение было проанализировано на этапе разработки стан-

дарт, подтверждено применение таких перегружателей на общих основаниях, которые определены как допуск грейферной разгрузки вагонов при выдаче совместного разрешения железнодорожной администрацией и собственником вагонов.

Вместе с тем следует отметить, что грейферная выгрузка продолжает негативно сказываться на сохранности грузовых вагонов, поэтому необходимо упорядочить требования к грузовым операциям, осуществляемым при помощи грейферных кранов.

В ГОСТ 22235–2010 определено, что грейферная разгрузка допускается только как временная мера на период перехода к разгрузке через люки или посредством вагоноопрокидывателя. Однако владельцу путей необщего пользования в силу необязательности применения ГОСТа нет необходимости принимать дополнительные меры для сохранности вагона, и, как следствие, временная технология разгрузки грейфером становится постоянной.

Специалисты знают, какие проблемы порождает использование подобной технологии: при разгрузке происходит до 33 ударов грейфера об элементы вагонов, а количество повреждений вагонов во многом зависит от квалификации машиниста крана. Кроме того, грейферная разгрузка приводит к изгибам верхней обвязки, вмятинам, пробоинам обшивки, зачистка вагонов грейфером от остатков груза срывает верхние листы поперечных балок. При опускании грейфера на вагон машинисту трудно зафиксировать расположение грейфера над вагоном. Из-за большой высоты подвески грейфера возникают крутильные и маятниковые колебания, при которых грейфер ударяет по верхней обвязке, стойкам и стенкам полувагона. Зимой при замыкании челюстей грейфера смерзшийся груз, попадая между стенкой полувагона и грейфером, повреждает обшивку кузова.

Сложившаяся экономическая ситуация, приведшая к необратимым реформам на железнодорожном транспорте, оставляет ответственность за повреждение вагонов в процессе грейферной выгрузки на стивидорах при вынужденном согласии владельцев подвижного состава.

Вместе с тем за последнее десятилетие выявлено значительное количество повреждений вагонов в портах (рис. 2). Например, как показывает анализ, несмотря на снижение общей массы поврежденных вагонов, доля портов остается на уровне 80 % (рис. 3). В связи с этим необходимо уделять первоочередное внимание выполнению требований сохранности вагонов при погрузочно-выгрузочных операциях в портах и внимательному осмотру вагонов работниками ОАО «РЖД» при допуске исправного подвижного состава на инфраструктуру.

Пересмотрен пункт 4.1.10 ГОСТ 22235–2010 в отношении требований к очистке грузовых вагонов и критериев очистки, которые определяются правилами перевозок грузов железнодорожным транспортом, причем после перевозки повышенной соли и других агрессивных грузов вагоны должны промываться [3].

Изменен первый абзац пункта 4.2.4. По предложению УКБВ ужесточено следующее требование: «При погрузке в вагоны с нижними люками размеры отдельных кусков навалочных грузов должны быть не более 350 мм в любом измерении» [3] (ранее было 400 мм). Отклоне-

ны предложения о внесении изменений в пункт из-за отсутствия необходимых расчетов и исследований.

По пункту 5.5.1 «Не допускается использование накладных вибрационных устройств полувагонов с высотой боковых стен более 2365 мм» [3] также имелись замечания. Ранее запрет на использование накладных вибрационных устройств распространялся на полувагоны с высотой боковых стен более 2065 мм. Подробное обоснование этого изменения приведено в [11]. В то же время при сохранении в пункте 5.5.1 требования продолжительности одной разгрузки не более 7 мин, что, согласно [12], определяет суммарное время нахождения одного вагона под разгрузкой более 1300 мин за год, остается актуальной организация непосредственного контроля за процессом разгрузки полувагонов с применением автоматизированных систем управления разгрузочными операциями [13].

Большинство сделанных замечаний и предложений оказались обоснованными и были учтены при подготовке окончательной редакции стандарта.

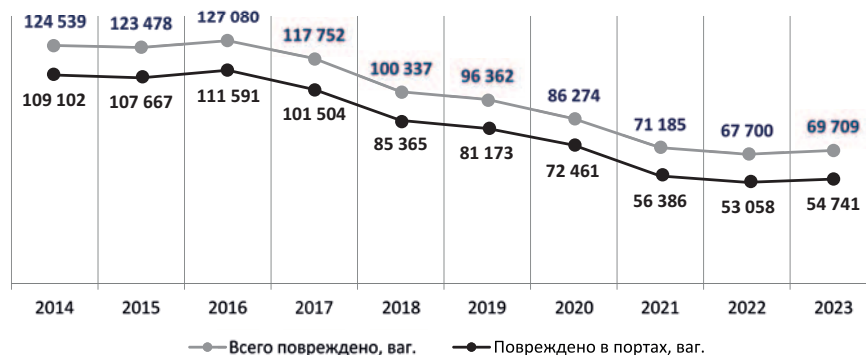


Рис. 2. Динамика повреждаемости вагонов в портах [2]

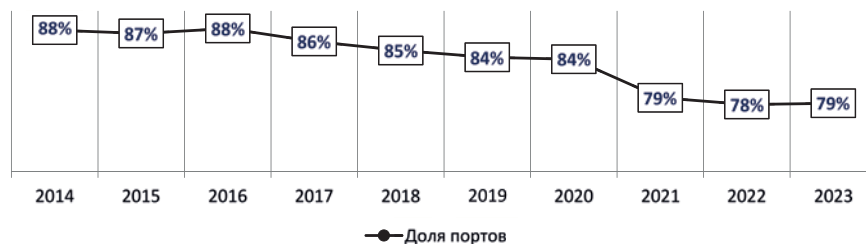


Рис. 3. Динамика доли портов в общей массе поврежденных вагонов [2]

РАЗВИТИЕ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ЦЕЛЯХ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СТАНДАРТИЗАЦИИ ВОПРОСОВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ СОХРАННОСТИ ВАГОННОГО ПАРКА

В процессе подготовки новой редакции стандарта не решен ряд вопросов, касающихся разработок новых конструкций вагонов, технологий проведения маневровой и грузовой работы, требующей, как следствие, пересмотра тех или иных глав и разделов стандарта.

Например, один из ключевых факторов, который обеспечивает сохранность вагонов во время роспуска на сортировочных горках, — скорость их соударения. Согласно действующим нормативам и техническим документам, допустимая скорость составляет 5 км/ч. Однако это значение было установлено много лет назад и основано на характеристиках поглощающих аппаратов типа Ш-1-ТМ (класс Т0), которые сейчас практически не используются. В настоящее время большинство вагонов оснащено поглощающими аппаратами классов Т1, Т2 и Т3, способными выдерживать значительно более высокие скорости соударения — от 7,3 до 13,5 км/ч [14]. Различие между нормативной скоростью и реальными возможностями современных вагонов указывает на необходимость пересмотра действующих норм.

Изменение устаревшего нормирования скорости роспуска обусловлено не только совершенствованием технологий в области поглощающих аппаратов, но и развитием систем управления сортировочными процессами. Современные автоматизированные системы контроля и управления позволяют с высокой точностью прогнозировать и регулировать скорость вагонов, минимизируя риски столкновений при превышении нормативной скорости.

Согласно ГОСТ 22235–2010, допустимая длина юза колеса составляет 20 м. Но на многих станциях с немеханизированными горками это значение уже снижено до 15 м и не привело к увеличению числа повреждений. Как показывает анализ случаев столкновения на Свердловской железной дороге вагонов, оборудованных современными поглощающими аппаратами, скорость соударения в диапазоне 6–7 км/ч безопасна для вагонов и грузов, что подтверждает возможность корректировки нормативной скорости. Увеличение допустимой скорости соударения с 5 до 6 км/ч позволит уменьшить длину юза при использовании башмачного торможения. Сокращение времени скольжения колеса по рельсу приведет к снижению образования ползунов — дефектов на поверхности катания колеса, которые вызывают преждевременный износ и выход колесных пар из строя [15]. Это не только повысит безопасность движения, но и сократит расходы на ремонт и техническое обслуживание подвижного состава.

Следует отметить, что предложения о повышении скорости соударения рассматривались еще на этапе обсуждения первой редакции стандарта в 1976 г. Некоторые железные дороги предлагали поднять скорость соударения до 8–12 км/ч. Однако разработчики стандарта приняли решение оставить скорость 5 км/ч с учетом проведения в дальнейшем дополнительных исследований и внесения изменений в действующую нормативно-техническую документацию.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Цель новой редакции ГОСТ 22235 — обеспечение стабильной работы железной дороги и удовлетворение потребностей экономики стран, которые используют этот стандарт.

Эффект от внедрения стандарта заключается:

в возможности обеспечить сотрудникам железной дороги безопасные условия работы по очистке вагонов и закрытию выгрузочных устройств вне повышенных путей, не имеющих двусторонних эстакад;

выполнении требований технической документации на вагоны за счет корректировки метода определения нагрузки, приходящейся на одну из тележек, при необходимости смещения общего центра тяжести груза в вагоне относительно продольной и (или) поперечной плоскости симметрии вагона.

Технический эффект состоит в повышении сохранности вагонов и увеличении их жизненного цикла. Экономический эффект достигается за счет сокращения затрат на проведение внепланового ремонта вагонов, что обусловлено снижением числа отцепок вагонов в текущий отцепочный ремонт по повреждениям при погрузочно-разгрузочных и маневровых работах.

Вместе с тем при разработке стандарта выявлена необходимость решить некоторые вопросы, связанные с улучшением эксплуатации вагонов:

обязательное требование к эксплуатирующим предприятиям о разработке и согласовании с ОАО «РЖД» полного пакета нормативно-технической документации на устройства, взаимодействующие с вагоном, и на последующие их испытания установленным в стандарте порядком;

организация и проведение научно-исследовательских работ по корректировке и определению параметров нагрузок от колес погрузчиков, по корректировке скоростей соударения вагонов в парках формирования, по замене грейферной выгрузки выгрузкой на вагоноопрокидывателях, актуализации требований к техническим условиям погрузки и крепления грузов.

Сведения об авторах:**Нина Фридриховна Сирина,**

доктор технических наук, профессор кафедры «Вагоны»,
и. о. проректора по учебной работе и связям с производством
Уральского государственного университета путей сообщения

Максим Анатольевич Кузнецов,

руководитель группы «Вагонное хозяйство» научного центра
«Нетяговый подвижной состав и автотормозные системы поезда»
АО «ВНИИЖТ»

Вадим Борисович Свердлов,

кандидат технических наук, преподаватель Свердловского учебного
центра профессиональных квалификаций — структурного
подразделения Свердловской железной дороги — филиала ОАО «РЖД»

Антон Владимирович Ключин,

инспектор по сохранности вагонного парка службы вагонного хозяйства
Свердловской дирекции инфраструктуры ОАО «РЖД»

Authors information:**Nina F. Sirina,**

DSc in Engineering, Professor of Railway Cars Department, acting Vice-
rector for academic affairs and production relations, Ural State University
of Railway Transport

Maxim A. Kuznetsov,

Head of Wagon Management Group of Scientific Center
«Non-traction Rolling Stock and Train Auto-braking Systems»,
AO «VNIIZhT»

Vadim B. Sverdlov,

PhD in Engineering, Lecturer of the Sverdlovsk Educational Center for
the Professional Qualifications — structural division of the Sverdlovsk
Railway — branch of the JSC «RZD»

Anton V. Klyushin,

Inspector for Safety of Car Fleet,
Car Service Division, Sverdlovsk Infrastructure Directorate
of the JSC «RZD»

Литература

1. О мерах по повышению уровня сохранности грузовых вагонов при производстве погрузочно-разгрузочных и маневровых работ и предотвращению случаев хищений их деталей : приказ Министерства путей сообщения Российской Федерации от 08.09.1999 г. № 13 ЦЗ. URL: <http://umczt74.ru/images/PDF/prikazMPS13CZ.pdf> (дата обращения: 15.02.2023).
2. Анализ положения с обеспечением сохранности вагонного парка. Москва : Проектно-конструкторское бюро вагонного хозяйства, 2023. 92 с.
3. ГОСТ 22235–2010. Вагоны грузовые магистральных железных дорог колеи 1520 мм. Общие требования по обеспечению сохранности при производстве погрузочно-разгрузочных и маневровых работ. Москва : Стандартинформ, 2011. 19 с.
4. Сендеров Г. К., Лосев П. Р., Другаль С. А. Сохранность вагонов при погрузочно-разгрузочных и маневровых работах. Москва : Транспорт, 1984. 160 с.
5. Дроздов Е. В., Шарафитдинова Н. В. Цифровая железная дорога // Актуальные проблемы развития технических наук. Екатеринбург : Изд-во УрФУ, 2022. С. 147–151.
6. Сирина Н. Ф., Свердлов В. Б. Реляционная стратегия обеспечения сохранности вагонного парка // Транспорт Урала. 2022. № 3 (74). С. 22–27. DOI: 10.20291/1815-9400-2022-3-22-27.
7. Вагоны грузовые. Основы взаимодействия организаций — членов НП «ОПЖТ», направленные на повышение сохранности грузовых вагонов. URL: <https://opzt.ru/wp-content/uploads/2018/12/STO-OPZHT-okonch-red-2.pdf> (дата обращения: 18.10.2024).
8. Технические условия размещения и крепления грузов в вагонах и контейнерах : утв. МПС России 27.05.2003 г. № ЦМ-943. URL: <https://ntu-mtu.ru/wp-content/uploads/2018/10/tu-sm-943-2003.pdf> (дата обращения: 17.10.2024).
9. Правила перевозок жидких грузов наливом в вагонах-цистернах и вагонах бункерного типа для перевозки нефтебитума (с изменениями на 10.06.2024 г.) : утв. протоколом СЖТ СНГ 22.05.2009 г. № 50. URL: <https://docs.cntd.ru/document/902165572> (дата обращения: 16.10.2024).

References

1. On measures to improve the safety level of freight cars during loading, unloading and shunting operations and to prevent cases of theft of their parts : the Order of the Ministry of Railways of the Russian Federation dated 08.09.1999 No. 13 TsZ. URL: <http://umczt74.ru/images/PDF/prikazMPS13CZ.pdf> (access date: 15.02.2023). (In Russian).
2. Analysis of state of car fleet safety assurance. Moscow : Planning and design office of car service, 2023. 92 p. (In Russian).
3. GOST 22235–2010. Freight cars for 1520 mm gauge main line railways. General requirements for safety in loading-unloading and shunting operations. Moscow : Standardinform, 2011. 19 p. (In Russian).
4. Senderov G. K., Losev P. R., Drugal S. A. Car fleet safety in loading-unloading and shunting operations. Moscow : Transport, 1984. 160 p. (In Russian).
5. Drozdov E. V., Sharafitdinova N. V. Digital Railway. Actual problems of development of engineering sciences. Ekaterinburg : Publishing House of UrFU, 2022. Pp. 147–151. (In Russian).
6. Sirina N. F., Sverdlov V. B. Relational strategy of car fleet safety assurance. *Transport of the Urals*. 2022. No. 3 (74). Pp. 22–27. DOI: 10.20291/1815-9400-2022-3-22-27. (In Russian).
7. Freight cars. Basic principles of interaction of organizations — members of the non-profit partnership «Association of manufacturers of railway equipment», aimed at improving the safety of freight cars. URL: <https://opzt.ru/wp-content/uploads/2018/12/STO-OPZHT-okonch-red-2.pdf> (access date: 18.10.2024). (In Russian).
8. Technical conditions for the placement and securing of cargo in cars and containers : approved by the Order of the Ministry of Railways of the Russian Federation dated 27.05.2003. No. TsM-943. URL: <https://ntu-mtu.ru/wp-content/uploads/2018/10/tu-cm-943-2003.pdf> (access date: 17.10.2024). (In Russian).
9. Rules for the transportation of liquid cargo in bulk in tank cars and bunker cars for the transportation of petroleum bitumen (with changes to 10.06.2024) : approved by the protocol of the Council on Railway Transport of the Members of the Commonwealth of Independent States dated 22.05.2009 No. 50. URL: <https://docs.cntd.ru/document/902165572> (access date: 16.10.2024). (In Russian).

10. Об утверждении правил перевозок железнодорожным транспортом грузов наливом в вагонах-цистернах и вагонах бункерного типа для перевозки нефтебитума (с изменениями на 02.03.2023 г.) : приказ Минтранса России от 29.07.2019 г. № 245. URL: <https://docs.cntd.ru/document/561027343> (дата обращения: 15.10.2024).
11. Свердлов В. Б., Лапшин В. Ф. Обеспечение сохранности вагонного парка на путях необщего пользования // Транспорт Урала. 2021. № 4 (71). С. 33–39. DOI: 10.20291/1815-9400-2021-4-33-39.
12. Эксплуатационные испытания опытных полувагонов модели 12-132-03 на Свердловской железной дороге / В. Ф. Лапшин, Г. К. Сендеров, В. Б. Свердлов [и др.] // Железнодорожный транспорт. Сер. : Вагоны и вагонное хозяйство. Ремонт вагонов. 2006. Вып. 3–4. С. 30–39.
13. Лапшин В. Ф., Егоров Д. В. Сохранность подвижного состава при виброразгрузке смерзающихся грузов: проблемы и постановка задачи компьютерного моделирования // Инновационный транспорт. 2017. № 1 (23). С. 37–42. DOI: 10.20291/2311-164X-2017-1-37-42.
14. Беляев В. И., Ступин Д. А. Сцепные и автосцепные устройства железнодорожного подвижного состава. Москва : ТРАНСИНФО, 2012. 416 с.
15. Солодухин И. Е., Райков Г. В., Кобзев В. А. Обеспечение сохранности вагонов на Свердловской железной дороге // Вагоны и вагонное хозяйство. 2019. № 4. С. 41–42. ISSN 1817-6089.
10. On approval of the rules for the transportation of bulk cargo by rail in tank cars and bunker cars for the transportation of petroleum bitumen (with changes to 02.03.2023) : the Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation dated 29.07.2019 No. 245. URL: <https://docs.cntd.ru/document/561027343> (access date: 15.10.2024). (In Russian).
11. Sverdlov V. B., Lapshin V. F. Car fleet safety assurance on non-public railway tracks. *Transport of the Urals*. 2021. No. 4 (71). Pp. 33–39. DOI: 10.20291/1815-9400-2021-4-33-39. (In Russian).
12. Lapshin V. F., Senderov G. K., Sverdlov V. B. [et al.]. Operational tests of experimental open-box cars model 12-132-03 on the Sverdlovsk Railway. *Railway Transport. Series : Railway Cars and Carriage Equipment. Repair of Cars*. 2006. Issue 3–4. Pp. 30–39. (In Russian).
13. Lapshin V. F., Egorov D. V. The safety of the rolling equipment during the vibration discharge of the cargo that is to beliquefied: problems and setting of the task of computer modeling. *Innotrans*. 2017. No. 1 (23). Pp. 37–42. DOI: 10.20291/2311-164X-2017-1-37-42. (In Russian).
14. Belyaev V. I., Stupin D. A. Coupling and automatic coupling devices of railway rolling stock. Moscow : TRANSINFO, 2012. 416 p. (In Russian).
15. Solodukhin I. E., Raykov G. V., Kobzev V. A. Ensuring the safety of cars on the Sverdlovsk Railway. *Railway Cars and Carriage Equipment*. 2019. No. 4. Pp. 41–42. ISSN 1817-6089. (In Russian).

Объем статьи 0,9 авторских листа

Научная статья
УДК 625.097

Исследование влияния составности поезда на величину потерь от выдувания мелкодисперсных сыпучих грузов при перевозке в полувагонах маршрутными отправками

Елена Дмитриевна Псеровская¹, Роман Андреевич Овчинников¹

¹ Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск, Россия

Research of the influence of train composition on the amount of losses from blowing out of fine bulk cargoes during their transportation in gondola cars by block train shipment

Elena D. Pserovskaya¹, Roman A. Ovchinnikov¹

¹ Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

Аннотация

Проанализированы отечественные разработки по исследованию процесса выдувания мелкодисперсных сыпучих грузов при перевозке в полувагонах. На примере угля выделены факторы, оказывающие наибольшее влияние на интенсивность выдувания, представлены эмпирические зависимости интенсивности выдувания при изменении условий перевозки.

Разработана и исследована модель процесса выдувания угля при перевозках в полувагонах, позволяющая количественно оценить изменение интенсивности выдувания в зависимости от различного расположения полувагонов разных моделей в составе угольного маршрута.

Ключевые слова: мелкодисперсные сыпучие грузы, угольные маршруты, потери от выдувания, факторы условий перевозки, критическая скорость выдувания, интенсивность выдувания, полувагон

Abstract

Domestic scientific developments on the study of the process of blowing out fine bulk cargo during their transportation in gondola cars are analyzed. The factors of transportation conditions that have the greatest impact on the intensity of blow-out process are identified, using coal as an example, as well as empirical dependencies of the intensity of coal blow-out process when the corresponding transportation conditions are changed.

A model of the coal blow-out process during its transportation in gondola cars has been developed, which allowed to quantitative estimate the change in the intensity of coal blow-out process due to the different alignment of gondola cars of different models as part of a coal train.

Keywords: finely dispersed bulk cargo, coal trains, losses due to blow-out, transportation conditions, critical speed of blow-out, intensity of blow-out, gondola car

DOI: 10.20291/1815-9400-2025-1-33-39

Исследование влияния различных условий перевозки мелкодисперсных сыпучих грузов (например, угля) в полувагонах на величину потерь от выдувания является весьма актуальной задачей. Это обусловлено и коммерческими (необходимостью приобретения груза сверх поставленной партии, чтобы компенсировать потери от выдувания, которые для фракции углей 0–13 мм составляют до 1,5 % массы груза в вагоне [1]), и экологическими (возможным ужесточением экологического законодательства в отношении негативного воздействия выбросов угольной пыли и введением соответствующих штрафных ставок*) мотивами всех участников перевозочного процесса. При этом следует отметить, что к потерям мелкодисперсных сыпучих грузов, помимо выдувания, приводит просыпание через неплотности кузова полувагонов, которое составляет 45 % общих потерь и может быть устранено заделкой таких неплотностей [3].

Вместе с тем устранение потерь от выдувания — достаточно сложная и неоднозначная задача. И не только потому, что на процесс выдувания значительное влияние оказывает большое число факторов, которые условно можно разделить на внешние и внутренние (табл. 1), но и потому, что решение задачи находится на стыке многих технических дисциплин (рис. 1).

Влияние большинства приведенных факторов на величину потерь от выдувания исследовалось учеными НИИЖТ в 1960–1970-е гг. при массовых опытных перевозках мелкодисперсных сыпучих грузов в полувагонах. Были определены общие закономерности протекания воздушных потоков над поверхностью груза в полувагоне — области повышенных (в задней части кузова) и пониженных (в передней части) давлений и области турбулентности, как один из основных механизмов разрушения поверхности груза (характерны для областей пониженных давлений).

* Например, ставка платы за выбросы каменного угля в атмосферный воздух стационарными источниками с 01.01.2025 г. установлена в размере 74,41 руб./т [2].

Таблица 1

Факторы, оказывающие влияние на величину потерь мелкодисперсных сыпучих грузов при перевозке в полувагонах

Факторы	
Внешние	Внутренние
Характеристики полувагонов: объем кузова V_k , грузоподъемность G_b , внутренние размеры кузова (длина L_k , ширина B_k , высота H_k)	Объемная плотность груза γ : характеризует заполняемость кузова полувагона при полном использовании грузоподъемности G_b
Скорость поезда v_n : зависит от тяговых характеристик локомотива, профиля и плана пути, допускаемых установленными скоростями, что определяет и массу M , и длину поездов L	Гранулометрический состав (размер фракции): характеризует долю частиц, наиболее подверженных выдуванию, в общей массе груза
Состояние кузова полувагона (наличие сквозных отверстий вследствие отрыва лесных скоб, искривление геометрии верхней обвязки и другие дефекты кузова)	Влажность груза φ : характеризует способность частиц груза противостоять подхвату набегающих и вихревых воздушных потоков
Составность поезда: характеризуется различием геометрических параметров смежно следующих в составе поезда моделей полувагонов	Угол естественного откоса $\alpha_{ест}$: характеризует конфигурацию поверхности груза непосредственно после погрузки и в пути следования поезда
Роза ветров: характеризуется климатическими особенностями региона следования поезда	Сегрегация: характеризует способность частиц разного размера перераспределяться по поверхности груза при погрузке и перевозке
Характеристики железнодорожной инфраструктуры: определяются типом железнодорожного пути (звеньевой, бесстыковой), типом балласта, наличием искусственных сооружений	Летучесть: характеризует распределение подъемной силы, действующей на частицы угля

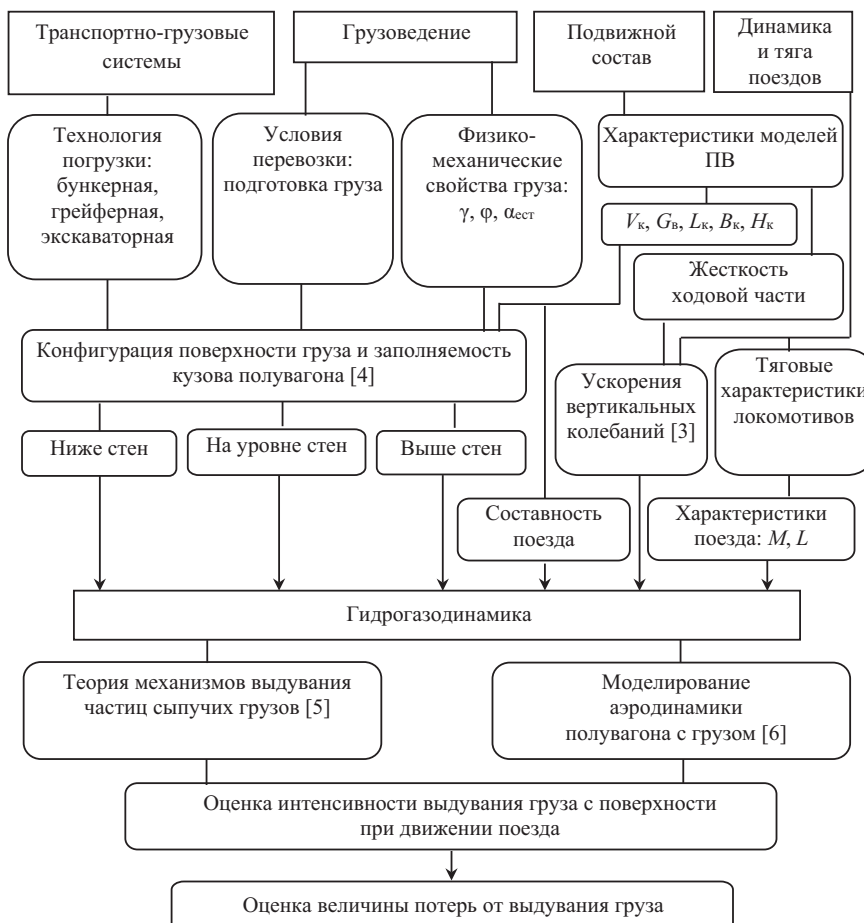


Рис. 1. Взаимосвязь технических дисциплин при исследовании влияния условий перевозки в полувагонах мелкодисперсных сыпучих грузов на величину потерь от выдувания

Кроме того, были установлены позволяющие оценить интенсивность выдувания мелких частиц с поверхности груза зависимости:

скорости воздушных потоков над поверхностью груза от скорости поезда при перевозке угля, рудных концентратов и каинита в полувагонах [1, 7, 8];

ускорений вертикальных колебаний кузова вагона, поверхности груза от скорости поезда, которые могут достигать значений 0,2g [8];

непосредственно величины интенсивности выдувания мелких частиц угля с поверхности груза (Q), выраженной в виде секундного или часового расхода частиц груза с площади поверхности груза в полувагоне (S), от скорости воздушных потоков вблизи поверхности груза (v_b), влажности (ω), плотности (ρ) и диаметра (d) частиц груза, ускорений вертикальных колебаний (j_b), плотности воздуха (ρ_a), что учитывается в выражениях (5)–(8) [8].

Вместе с тем влияние такого фактора условий перевозки на величину потерь от выдувания, как составность поезда, в исследованиях ученых НИИЖТ отдельно не рассматривалось. Это можно объяснить следующим. В 1960–1970-е гг. в эксплуатируемом парке полувагонов МПС СССР было только четыре модели универсальных четырехосных полува-

гонов (12-515, 12-726, 12-1505, 12-535), которые имеют одинаковые значения внутренней высоты стен (2060 мм), при этом высота стен от уровня головки рельсов (УГР) максимально отличается на 12 мм лишь у моделей 12-1505 и 12-535, что позволяет говорить о наиболее равномерной высоте состава угольных маршрутов от УГР, следовательно, о хорошей их аэродинамической обтекаемости [9]. Однако у шести- и восьмиосных (модели 12-737) полувагонов внутренняя высота стен составляет 2365 и 2510 мм соответственно, а разница с высотой от УГР четырехосных полувагонов — 289 и 476 мм, что делает состав поезда менее обтекаемым при постановке в него таких моделей полувагонов. При этом опытные перевозки в восьмиосных полувагонах производились только для рудных концентратов, загружаемых ниже уровня верхней обвязки на 700–1200 мм, в ходе чего было определено, что такое возвышение стен кузова полувагона над поверхностью груза не защищает груз от выдувания: выдувание мелких частиц начинается уже при скорости поезда 45–50 км/ч [7].

Чтобы определить направления актуализации теоретических положений, необходимо также выявить, в чем заключаются отличия современных условий перевозки мелкодисперсных сыпучих грузов от условий массовых опытных перевозок (это позволит точнее установить влияние составности поезда на величину потерь от выдувания).

Во-первых, с учетом тенденции к обновлению эксплуатируемого парка полувагонов и к росту спроса на полувагоны с улучшенными характеристиками (в том числе инновационные) со стороны операторов подвижного состава разница по внутренней высоте кузова может составлять 623 мм (для моделей 12-9548 и 12-9763 [10]), что делает состав угольного маршрута менее обтекаемым в аэродинамическом отношении при случайном расположении в нем разных моделей полувагонов.

Во-вторых, рост спроса на экспортируемый обогащенный уголь и повышение требований к его качеству предопределяют политику обогатительных фабрик к обновлению оборудования на более современное, которое позволяет получать угли с большими значениями объемной массы (у антрацитов она может составлять 1,3 т/м³). Кроме того, достигаемое при использовании такого оборудования снижение влажности груза на 4–8 % негативно сказывается на устойчивости угля к выдуванию [11, 12].

В совокупности две эти тенденции приводят к тому, что погрузка угля все чаще осуществляется ниже уровня верхней обвязки полувагонов при максимальном использовании их грузоподъемности. Отметим, что в ходе массовых опытных перевозок такой вариант погрузки не рассматривался: в основном исследовалась погрузка выше уровня стен, мотивированная необходимостью улучшить использование грузоподъемности имевшихся в то время на сети железных дорог моделей полувагонов.

В-третьих, как следует из исследований ученых НИИЖТ, на величину потерь угля от выдувания значительное влияние оказывают ускорения вертикальных колебаний на поверхности груза, которые, согласно данным опытных перевозок, при скорости поезда 90 км/ч составляют 1,72 м/с² (0,175g) [13]. В свою очередь, эта величина в большей части определяет-

ся типом железнодорожного пути. В 1960–1970-е гг. на магистральных линиях преобладал звеньевой путь, поэтому основной причиной постоянного возникновения таких колебаний кузова были удары колесных пар при прохождении стыков рельсов. В настоящее время на магистральных железнодорожных линиях России преобладает бесстыковой путь, в результате чего возникающие в процессе движения дефекты поверхности катания колесных пар вагона (ползун, выщербина и др., в том числе дефекты, вызывающие галопирование) остаются постоянным источником колебаний кузова, но значения ускорений вертикальных колебаний при таких дефектах в допустимых по ПТЭ пределах намного меньше значений, возникающих при прохождении дефектов рельсовых нитей — волн неровности пути. Это подробно проанализировано в работе [14] и позволяет установить, что при прохождении вагоном волны неровности пути длиной 25 м с максимальным отклонением нитей от горизонтальной плоскости в 0,01 м (пучины) при скорости поезда 80 км/ч максимальное значение вертикальных колебаний кузова будет составлять 0,43 м/с² [14, с. 53]. Более того, в исследовании [15] путем опытных перевозок были получены значения ускорений вертикальных колебаний кузова груженого полувагона при различных скоростях поезда. Например, при следовании поезда по бесстыковому пути на скорости 80 км/ч с учетом возникающих неровностей геометрии рельсовой колеи ускорение вертикальных колебаний достигает 0,834 м/с² (0,085g), а при скорости 90 км/ч — 1,01 м/с² (0,103g), что позволяет в значительной степени актуализировать оценку величины интенсивности выдувания мелких частиц сыпучих грузов с использованием методики, разработанной учеными НИИЖТ [1, 7, 8].

Такая актуализация заключается еще и в следующем. Непосредственная оценка возможности выдувания мелких частиц угля с поверхности груза строится на теории ветровой эрозии, где в качестве основополагающей величины принята критическая скорость начала выдувания мелких частиц ($v_{кр}$), определяемая главным образом физико-механическими характеристиками сыпучего материала, подвергаемого воздействию потока воздуха.

Так, величина $v_{кр}$, выявленная в ходе опытных перевозок, составляет:

для частиц угля диаметром 0–0,3 мм

$$v_{кр}^{0-0,3} = 0,130688 \cdot 50 - 0,658 \cdot 50^2 \cdot 10^{-3} = 4,89 \text{ м/с};$$

для частиц диаметром 0,3–1 мм

$$v_{кр}^{0,3-1} = 0,130688 \cdot 90 - 0,658 \cdot 90^2 \cdot 10^{-3} = 6,43 \text{ м/с} [1, 8].$$

В свою очередь, представленные значения были получены без привязки к свойственным для различных областей поверхности груза режимам протекания воздушных потоков — ламинарному или турбулентному (вихревому), которые во многом определяются конфигурацией поверхности груза, высотой погрузки и, как показали результаты исследования, геометрическими характеристиками смежно следующих полувагонов в составе поезда.

Для учета влияния этих режимов на возможность выдувания мелких частиц груза были использованы положения двух механизмов выдувания: за счет подъемной силы, действующей на частицу груза в силу возникающей разности давлений под и над частицей при ламинарном обтекании поверхности груза воздушным потоком; за счет подъема частиц под действием вихрей [5]. При первом механизме, как отмечают исследователи, после подъема частицы в воздух давление в верхней и нижней ее части выравнивается. В результате подъемная сила практически исчезает, и дальнейшее движение частицы будет определяться либо воздействием вихрей, поднимающих взвешенные в воздухе частицы, либо действием силы тяжести, тогда приходится говорить о так называемой сальтации частиц [5].

Кроме того, значения критической скорости для различных фракций мелкодисперсных грузов распределяются нелинейно. Существует некоторая величина диаметра частиц, при которой критическая скорость будет иметь минимальное значение (экстремум), и дальнейшее уменьшение диаметра приведет к ее росту. Это объясняется тем, что у наиболее мелких частиц усиливается влияние сил межмолекулярного взаимодействия и кулоновских сил, а у частиц диаметром менее 0,1 мм интенсивнее проявляются силы химических связей [16]. Так, согласно исследованиям удельной сдуваемости частиц угля с поверхности груза при ламинарном обтекании, началу выдувания частиц будет соответствовать значение критической скорости в диапазоне от 2 до 3 м/с [17, с. 35]. При этом потери от выдувания характеризуются частицами угля диаметром до 1 мм: частицы большего диаметра перемещаются (волочатся) по поверхности груза, не поднимаясь в воздух.

Данные положения с учетом приведенных выше теоретических основ механизмов выдувания подтверждаются и уточняются результатами исследования интенсивности выдувания частиц каменного угля в зависимости от размера их фракции в аэродинамической трубе: для частиц фракции 0,25 мм зна-

чение критической скорости начала выдувания с поверхности груза составляет 2,65 м/с и является экстремумом функции ее зависимости от размера фракции: для частиц размером менее и более 0,25 мм наблюдается рост $v_{кр}$ [18, с. 11]. Стоит отметить, что данное значение $v_{кр}$ получено при ламинарном обтекании воздушными потоками образцов каменного угля, уложенных на ровной поверхности, т. е. когда потоки воздуха беспрепятственно обтекают поверхность груза и завихрений не образуется. При этом, согласно результатам опытных перевозок 1960–1970-х гг., при погрузке ниже уровня стен такой режим обтекания характерен не для всей области поверхности груза: в передней части кузова на поверхности груза образуется поле отрицательных давлений, сопровождаемое образованием вихрей, в центре которых давление имеет наименьшие значения. В свою очередь, в средней и задней части кузова давление имеет положительные значения, что характеризуется преимущественно ламинарным режимом протекания воздушных потоков (области перепадов давлений обусловлены образованием локальных вихрей из-за неровностей поверхности груза) [1].

Уточнить границы областей поверхности груза, которым соответствуют ламинарный и турбулентный режимы, удалось с использованием аэродинамической модели полувагона с грузом, разработанной в специализированном программном обеспечении для исследования гидрогазодинамики (порядок формирования модели представлен в [4] и [6]). Согласно результатам моделирования, при движении поезда турбулентные воздушные потоки, характеризующиеся образованием завихрений, присутствуют в области между передней торцевой стеной и первой стойкой кузова полувагона, чему соответствует область отрицательных давлений. Кроме того, этой области соответствуют вихри с вертикальной осью, которые существенно усиливаются при увеличении разницы в высоте полувагонов, обозначенной далее как ΔH , смежно следующих в составе поезда (рис. 2).

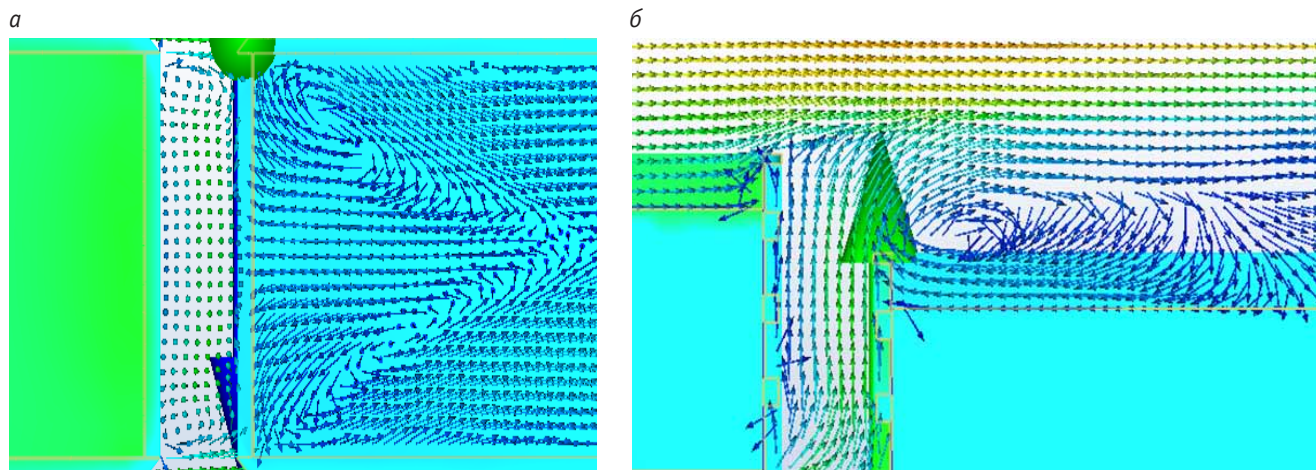


Рис. 2. Образование завихрения в передней части полувагона модели 12-9763, следующего за более высоким полувагоном модели 12-9548 (разница 623 мм, направление движения вагонов справа налево):

а — вид сверху; б — вид сбоку

Таким образом, получено значение скорости обтекающих воздушных потоков ($v_{кр}$), равное 2,65 м/с, при превышении которого начинается интенсивное выдувание с поверхности груза. Значение было использовано в качестве критерия оптимальности для исследования влияния составности поезда на величину потерь от выдувания. Это позволило минимизировать области поверхности груза, в которых скорость обтекающих воздушных потоков выше 2,65 м/с, с учетом наибольшего влияния впереди идущего полувагона на аэродинамические характеристики рассматриваемого полувагона. Для численной оценки интенсивности выдувания определено значение секундного расхода мелких частиц с поверхности груза (Q), г/с. Значения Q рассчитаны при помощи зависимостей, выведенных учеными НИИЖТ [1, 7, 8], с учетом площади выдувания с поверхности груза (S_B) и скорости воздушных потоков вблизи этой поверхности (v_B), полученных при моделировании аэродинамики полувагона с грузом. Варианты смежного следования моделей полувагонов в составе поезда, для которых были вычислены значения S_B и v_B , представлены в табл. 2.

По результатам моделирования для некоторых из рассмотренных вариантов определена конфигурация площади выдувания на поверхности груза (табл. 3). Наименьшее значение S_B характерно для варианта следования двух моделей полувагонов в составе поезда, когда высота верхней обвязки идущего вслед полувагона меньше на 232 мм. Данному варианту соответствует и наименьшее значение скорости v_B , равное 6,19 м/с. При этом разница в ширине и длине кузова смежных следующих моделей полувагонов непосредственного влияния на характер протекания воздушных потоков не оказывает, однако влияет на значение S_B , что обусловлено различной величиной площади пола каждой модели.

Полученные при моделировании значения v_B и S_B представлены на рис. 3 для полувагона, следующего за полувагоном другой/той же модели (как минимум, второго в составе). Отметим, что при дальнейшем увеличении значения ΔH у двух смежных следующих полувагонов v_B и S_B также повышаются. Это объясняется усилением вихря в передней области поверхности груза в полувагоне (заштрихована в левой части рисунков в табл. 3). Данной области соответствует часть площади S_B в передней части кузова полувагона, где наблюдается наибольшая интенсивность выдувания мелких частиц угля и их безвозвратного уноса.

Непосредственный расчет Q производился на основании полученных значений S_B и v_B и дальнейшей подстановки результатов в выражения (5)–(8) [8] с учетом следующих исходных данных: $d = 0,25$ мм, $\omega = 3$ %, $\rho = 1300$ кг/м³, $j_B = 1,01$ м/с², $\rho_B = 1,2041$ кг/м³. Так, для варианта следования № 1 (см. табл. 3):

$$Q_{\text{№1}} = 1,2041 \cdot 7,55 \cdot 36,56 \cdot (0,10837 \cdot \frac{1,2041 \cdot 7,55^2}{1300 \cdot 0,25 \cdot 10^{-3}} + 0,1703 \cdot \frac{1,01^2}{9,81} - 0,3217 \cdot 3 - 0,3546) \cdot 10^{-2} = 71,74 \text{ г/с.}$$

Полученные значения Q сведены в порядке убывания ΔH у полувагона, идущего позади (рис. 4).

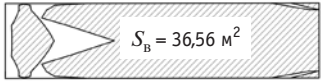
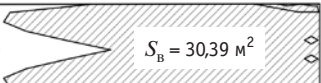

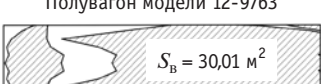
Таблица 2

Рассматриваемые варианты следования полувагонов различных моделей

Смежное расположение моделей полувагонов в составе поезда	Разница, мм		
	по высоте уровня верхней обвязки от УГР, ΔH	по ширине кузова	по длине кузова
12-9548 и 12-9763	623	94	410
12-9548 и 12-1704-01	313	160	100
12-9548 и 12-196-02	232	132	70

Таблица 3

Конфигурации площади выдувания при некоторых вариантах следования полувагонов различных моделей

№ 1	 $S_B = 36,56 \text{ м}^2$	Следует за полувагоном модели 12-9763 (верхняя обвязка выше на 623 мм)
№ 2	 $S_B = 30,39 \text{ м}^2$	Следует за полувагоном модели 12-9548 (верхняя обвязка на одном уровне)
№ 3	 $S_B = 27,14 \text{ м}^2$	Следует за полувагоном модели 12-9548 (верхняя обвязка ниже на 232 мм)
№ 4	 $S_B = 30,01 \text{ м}^2$	Следует за полувагоном модели 12-9548 (верхняя обвязка ниже на 623 мм)

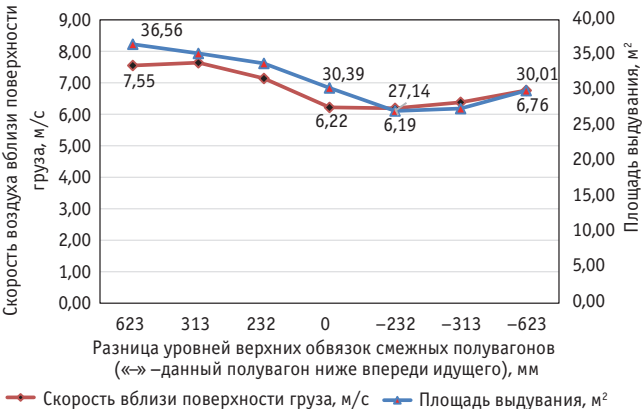


Рис. 3. Зависимость значений v_B и S_B идущего позади полувагона при различных вариантах его следования в составе поезда

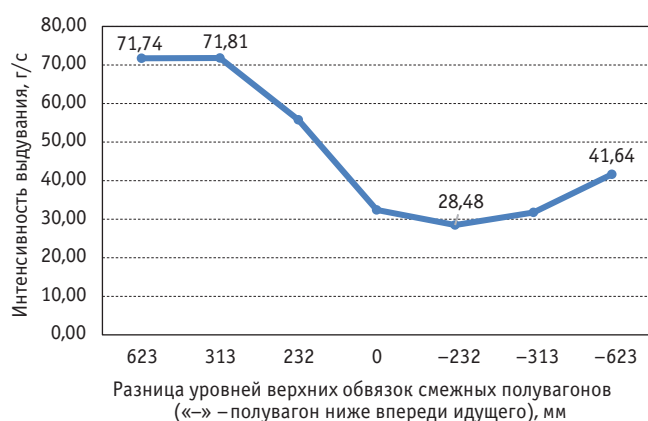


Рис. 4. Зависимость значения интенсивности выдувания Q позади идущего полувагона при различных вариантах его следования в составе поезда

В целом анализ полученных значений Q позволил установить следующее:

наиболее предпочтительный вариант для снижения интенсивности выдувания — следование полувагонов, максимально одинаковых по высоте. При этом будет достигаться лучшая обтекаемость состава и наименьшая интенсивность выдувания в области между первой стойкой кузова и передней торцевой стеной, подверженной действию вихря;

при следовании за более низким полувагоном воздушные потоки, выходящие с поверхности перевозимого в нем груза, встречают препятствие в виде возвышающейся передней торцевой стены полувагона, идущего следом. В результате в области межвагонного пространства образуется завихрение, ко-

торое огибает эту торцевую стену, усиливая вихрь в передней части кузова более высокого полувагона;

при следовании за более высоким полувагоном общее значение интенсивности выдувания с поверхности груза снижается, однако этот эффект наблюдается при ΔH до 232 мм. При большей разнице сильнее проявляется эффект фальшборта, оказываемый торцевой стеной впереди идущего полувагона, который приводит к усилению вихря в передней части кузова (см. рис. 2). В свою очередь, этот вихрь вызывает увеличение значений скорости v_v и, следовательно, S_v . Причем при увеличении значения ΔH (в случае более низкого впереди идущего полувагона) более 313 мм интенсивность выдувания не изменяется. Это объясняется ограничением влияния воздушных потоков, выходящих с поверхности груза впереди идущего полувагона, и преобладанием влияния верхних слоев воздуха, которые обтекают состав поезда в целом и имеют большие значения скорости.

Исходя из полученных результатов можно дать такие рекомендации о формировании угольных маршрутов:

предпочтительно наиболее плавное уменьшение значения ΔH у смежных полувагонов в составе поезда от головы к хвосту;

если в составе поезда невозможно расположить полувагоны в порядке уменьшения их высоты от головы к хвосту, нужно обеспечить минимальные значения ΔH у смежно следующих полувагонов. Это требование необходимо выполнять и при чередовании увеличения и уменьшения высоты полувагонов, смежно следующих в составе поезда;

при организации закольцованных маршрутов целесообразно формировать состав из моделей полувагонов, имеющих одинаковую высоту верхней обвязки, что обеспечит минимальную интенсивность выдувания в обоих направлениях движения.

Сведения об авторах:

Елена Дмитриевна Псеровская,

кандидат технических наук, доцент, заведующая кафедрой «Логистика, коммерческая работа и подвижной состав» Сибирского государственного университета путей сообщения

Роман Андреевич Овчинников,

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

Authors information:

Elena D. Pserovskaya,

PhD in Engineering, Associate Professor, Head of Logistic, Commercial Work and Rolling Stock Department, Siberian Transport University

Roman A. Ovchinnikov,

postgraduate student of Logistic, Commercial Work and Rolling Stock Department, Siberian Transport University

Литература

1. Островский А. М. Исследование целесообразности применения защитных пленок для предотвращения потерь некоторых видов сыпучих грузов от выдувания при железнодорожных перевозках : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Новосибирск, 1967. 285 с.
2. О применении в 2024 и 2025 годах ставок платы за негативное воздействие на окружающую среду : Постановление Правительства Российской Федерации от 17.04.2024 г. № 492. URL: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=479669&ysclid=m4pb6hm8eb984863900> (дата обращения: 08.12.2024).

References

1. Ostrovskiy A. M. Investigation of the feasibility for using drop sheet to prevent the loss of certain types of bulk cargo during railways transportation : PhD in Engineering Thesis. Novosibirsk, 1967. 285 p. (In Russian).
2. On the application of payment rates for negative environmental impact in 2024 and 2025 : the Order of the Government of the Russian Federation dated 17.04.2024 No. 492. URL: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=479669&ysclid=m4pb6hm8eb984863900> (access date: 08.12.2024). (In Russian).

3. Грузоведение, сохранность и крепление грузов / А. А. Смехов, А. Д. Малов, А. М. Островский [и др.] ; под ред. А. А. Смехова. Москва : Транспорт, 1989. 239 с.
4. Псеровская Е. Д., Овчинников Р. А. Исследование влияния формы поверхности навалочных грузов на выдувание при транспортировке // Вестник СГУПС. 2022. № 4 (63). С. 53–61. DOI: 10.52170/1815-9265_2022_63_53.
5. Малиновская Е. А., Чхетиани О. Г. Об условиях ветрового выноса частиц почвы // Вычислительная механика сплошных сред. 2020. Т. 13. № 2. С. 175–188. DOI: 10.7242/1999-6691/2020.13.2.14.
6. Псеровская Е. Д., Овчинников Р. А. Моделирование процесса выдувания угля при перевозке в полувагоне // Фундаментальные и прикладные вопросы транспорта. 2022. № 4 (7). С. 23–29. DOI: 10.52170/2712-9195_2022_4_23.
7. Шпилев Г. Н. Исследование влияния конструкции кузова полувагона и его технического состояния на сохранность сыпучих грузов при перевозке : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Новосибирск, 1969. 242 с.
8. Щапов В. И. Исследование динамики и аэродинамики груженого вагона с целью совершенствования условий перевозок сыпучих грузов : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Новосибирск, 1972. 227 с.
9. Вагоны СССР : каталог-справочник. Москва : НИИинформтяжмаш, 1975. 198 с.
10. Вагон.by. URL: <https://vagon.by/railcars/list/6> (дата обращения: 10.12.2024).
11. Лохов Д. С. Будущее обогащательных фабрик, какое оно? // Уголь. 2020. № 10. С. 50–51. ISSN 0041-5790.
12. Антрацит, производимый АО «Шахтоуправление «Обуховская». URL: <https://obuhugol.ru/production/quality/> (дата обращения: 11.12.2024).
13. Обеспечение сохранности грузов при железнодорожных перевозках / Под ред. В. К. Бешкетов и В. И. Щапова. Новосибирск : НИИЖТ, 1974. 176 с.
14. Оленцевич В. А. Вертикальные колебания вагона с грузом при движении подвижного состава по волнам неровности пути // Транспорт Урала. 2010. № 1 (24). С. 49–53. ISSN 1815-9400.
15. Исследование характеристик колебаний железнодорожных грузовых вагонов с целью определения технических требований к конструкции автономных пьезоэлектрических генераторов тока / И. Васильев, С. Генералов, О. Краснобаев, А. Чуприн // Наноиндустрия. 2016. № 3 (65). С. 72–77. ISSN 1993-8578.
16. Комонов С. В., Комонова Е. Н. Ветровая эрозия и пылеподавление. Красноярск : Изд-во СФУ, 2008. 192 с.
17. Организационно-технологические особенности обеспыливания поверхности угля при его перевозках железнодорожным транспортом / В. Е. Кошкарров, Д. Г. Неволлин, Е. В. Кошкарров, С. Е. Бурмистров // Транспорт Урала. 2016. № 4 (51). С. 33–40. DOI: 10.20291/1815-9400-2016-4-33-40.
18. Валиев Н. Г. Разработка технологии закрепления пылящей поверхности отвалов угольных разрезов : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Екатеринбург, 1994. 165 с.
3. Smekhov A. A., Malov A. D., Ostrovskiy A. M. [et al.]. Cargo management, safety and cargo fastening ; edited by A. A. Smekhov. Moscow : Transport, 1989. 239 p. (In Russian).
4. Pserovskaya E. D., Ovchinnikov R. A. Influence investigation of bulk cargo surface shape on blowing during transportation. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2022. No. 4 (63). Pp. 53–61. DOI: 10.52170/1815-9265_2022_63_53. (In Russian).
5. Malinovskaya E. A., Chkhetiani O. G. On the conditions for the wind removal of soil particles. *Computational continuum mechanics*. 2020. Vol. 13. No. 2. Pp. 175–188. DOI: 10.7242/1999-6691/2020.13.2.14. (In Russian).
6. Pserovskaya E. D., Ovchinnikov R. A. Simulation of the process of coal blowing during transportation in a gonda car. *Fundamental and applied transport issues*. 2022. No. 4 (7). Pp. 23–29. DOI: 10.52170/2712-9195_2022_4_23. (In Russian).
7. Shpilev G. N. Investigation of the effect of the gondola car body structure and its technical condition on the safety of bulk cargo during transportation : PhD in Engineering Thesis. Novosibirsk, 1969. 242 p. (In Russian).
8. Shchapov V. I. Investigation of dynamics and aerodynamics of a loaded car in order to improve the conditions of transportation of bulk cargoes : PhD in Engineering Thesis. Novosibirsk, 1972. 227 p. (In Russian).
9. USSR cars : directory-reference book. Moscow, 1975. 198 p. (In Russian).
10. Vagon.by. URL: <https://vagon.by/railcars/list/6> (access date: 10.12.2024). (In Russian).
11. Lkhov D. S. The future of enrichment plants, what is it? *Ugol'*. 2020. No. 10. Pp. 50–51. ISSN 0041-5790. (In Russian).
12. Anthracite produced by Obukhovskaya Mine Management JSC. URL: <https://obuhugol.ru/production/quality/> (access date: 11.12.2024). (In Russian).
13. Ensuring the safety of cargoes during railway transportation ; edited by V. K. Beshketo and V. I. Shchapov. Novosibirsk, 1974. 176 p. (In Russian).
14. Olentsevich V. A. Bouncing of a carload when rolling-stock motion on track irregularity waves. *Transport of the Urals*. 2010. No. 1 (24). Pp. 49–53. ISSN 1815-9400. (In Russian).
15. Vasiliev I., Generalov S., Krasnobaev O., Chuprin A. Study of vibration characteristics of railroad freight cars to determine technical design requirements to self-contained piezoelectric generators. *Nanoindustry*. 2016. No. 3 (65). Pp. 72–77. ISSN 1993-8578. (In Russian).
16. Komonov S. V., Komonova E. N. Wind erosion and dust suppression. Krasnoyarsk : Publishing House of Siberian Federal University, 2008. 192 p. (In Russian).
17. Koshkarov V. E., Nevolin D. G., Koshkarov E. V., Burmistrov S. E. Organization and technical aspects of coal surface dedusting during railway transporting. *Transport of the Urals*. 2016. No. 4 (51). Pp. 33–40. DOI: 10.20291/1815-9400-2016-4-33-40. (In Russian).
18. Valiev N. G. Development of technology for fixing the dusty surface of coal mine dumps : PhD in Engineering Thesis. Ekaterinburg, 1994. 165 p. (In Russian).

Научная статья
УДК 656.223

Определение величины эксплуатационного парка локомотивов в условиях закрытия перегонов на длительный период

Ольга Павловна Югрин¹, Лариса Сергеевна Жарикова¹

¹ Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск, Россия

Determination of size for operational fleet of locomotives in conditions of closure of the runs for a long period

Olga P. Yugrina¹, Larisa S. Zharikova¹

¹ Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

Аннотация

В статье предложены уточнения методики оперативного нормирования парка локомотивов грузового движения при закрытии перегонов на период продолжительностью более чем технологические «окна». Разработанные авторами предложения позволяют выполнять расчет эксплуатируемого парка локомотивов при оперативном планировании с большей точностью, а также учитывать возрастающую потребность в парке исправных локомотивов для освоения размеров движения на участке их обращения.

Ключевые слова: эксплуатационный парк локомотивов, оперативное нормирование, организация движения, планирование «окон», коэффициент потребности локомотивов

Abstract

The article offers clarifications of the methodology for the operational rationing of the fleet of freight locomotives when closing crossings for a period of more than technological windows. The proposals developed by the authors make it possible to calculate the operational fleet of locomotives with greater accuracy during operational planning, as well as to take into account the increasing need for a fleet of serviceable locomotives to master the size of traffic in the area of their circulation.

Keywords: operational fleet of locomotives, operational rationing, traffic management, window planning, demand factor for locomotives

DOI: 10.20291/1815-9400-2025-1-40-44

В условиях рыночной экономики и реструктуризации железнодорожного транспорта необходим поиск эффективной технологии перевозочного процесса и методов его реализации, направленный не только на улучшение экономических показателей, но и на повышение качества перевозок. Одной из таких важнейших основ перевозочного процесса является комплексная система управления эксплуатацией локомотивного парка [1]. При этом необходимо также учитывать производство ремонтно-строительных работ, представляющих собой неотъемлемую часть деятельности железнодорожного транспорта по обеспечению безопасности следования грузовых и пассажирских поездов с установленными скоростями [2]. Соответственно особое внимание уделяется вопросам изменения динамики парка эксплуатируемых локомотивов в зависимости от «окон» различной продолжительности.

Целью исследования вариантов оборота тяговых подвижных единиц при «окнах» является расчет количества рабочего парка магистральных грузовых локомотивов для определения лучшего способа оперативного планирования и управления пропуском поездов через ограничивающий участок, а также оптимального способа организации поездопотока. Однако разновидностей организации движения при «окнах» существует множество, вместе с тем без расчетов достаточно сложно решить, какой из них будет оптимальным и с эксплуатационной, и с экономической точки зрения.

Согласно ранее разработанной методике [3] и Инструкции ОАО «РЖД» от 2009 г. [4], большая часть путевых машин и механизмов неэффективна при ремонте пути в «окна» продолжительностью до 6–8 ч, так как значительная часть времени «окна» используется на заезд/выезд с перегона, подготовительно-заключительные операции, зарядку и разрядку машин, технологические перерывы для обслуживания техники [5].

Сегодня единственная технология, позволяющая увеличить объемы ремонта пути, выработку в «окно» и сократить время ремонта перегона, — это работа на закрытых перегонах [6]. Функционирование участка как временно однопутной линии приводит к резкому ограничению пропускной способности перегона и, как следствие, к дополнительным мерам по пропуску поездов: перенаправлению вагонопотока на сети железных дорог по

параллельным ходам и к организации движения по варианному графику для всего полигона.

Представленное в статье исследование базируется на анализе поездной работы железнодорожного участка в течение двух месяцев: это месяц с «окнами» большой продолжительности (6 сут) и месяц без закрытия участков на ремонтные работы. Для рассматриваемого участка в период длительных закрытий ежесуточное отклонение поездопотока на параллельный ход составляет порядка 15 %.

При выполнении заданных размеров движения рассчитывается потребность содержания парка грузовых локомотивов. Фактическим результатом расчета оборота локомотивов является число тяговых подвижных единиц, необходимых для выполнения графика движения поездов (ГДП) заданного веса с установленными скоростями, для каждого локомотивного депо на рассматриваемом полигоне. Размеры парка локомотивов, необходимого для выполнения заданных объемов перевозок, определяются аналитическим методом и напрямую зависят от такого показателя, как оборот локомотива, и рассчитанного на его основе коэффициента потребности.

Коэффициент потребности эксплуатируемых локомотивов на пару поездов вычисляется по формуле

$$k_{п.э.об} = \frac{\Theta_{лок}}{24},$$

где $\Theta_{лок}$ — оборот локомотива, ч.

При этом учитывается, как на него влияет предоставление «окон» для проведения ремонтно-путевых работ:

$$k_{п.э.сп} = k_{п.э.об} + \Delta k_{п.ок},$$

где $k_{п.э.об}$ — коэффициент потребности эксплуатируемых локомотивов, рассчитанный через оборот локомотива; $\Delta k_{п.ок}$ — увеличение на расчетном участке коэффициента потребности эксплуатируемых локомотивов на пару поездов в случае предоставления «окна» для выполнения ремонтно-путевых работ, лок.

При предоставлении «окон» для выполнения ремонтно-путевых работ потребность в парке исправных локомотивов для освоения размеров движения на участке обращения возрастает. Дополнительное нахождение локомотивов непосредственно на расчетном участке с поездами, а также их простои в конечных пунктах оборота увеличивают затраты времени локомотивов. В связи с этим в сутки предоставления «окна» коэффициенты потребности исправных локомотивов на пару поездов по некоторым расчетным участкам необходимо увеличивать на значение $\Delta k_{п.ок}$ [7]. Следует учесть, что исследование проведено для двухпутных линий, поэтому все текущие и последующие формулы актуальны только для них.

В соответствии с методикой оперативного нормирования парка локомотивов грузового движения [8] значение $\Delta k_{п.ок}$ определяется по формуле

$$\Delta k_{п.ок} = \Delta k'_{п.ок} + \Delta k''_{п.ок},$$

где $\Delta k'_{п.ок}$ — увеличение коэффициента потребности из-за дополнительного нахождения локомотивов во главе поездов на

участке, вызванного предоставлением «окна»; $\Delta k''_{п.ок}$ — увеличение коэффициента потребности из-за дополнительных простоев локомотивов в пункте оборота, вызванного предоставлением «окна».

Для двухпутной линии значение $\Delta k'_{п.ок}$ устанавливается по формуле

$$\Delta k'_{п.ок} = \frac{0,015 \cdot T_{ок}}{24 - J_p \cdot (N_{г.пл} + 1,8 \cdot N_{пс.пл})},$$

где $T_{ок}$ — расчетная продолжительность «окна», ч; J_p — величина межпоездного интервала грузовых поездов в пакете, ч; $N_{г.пл}$ и $N_{пс.пл}$ — соответственно планируемые размеры движения грузовых и пассажирских поездов на участке, пар поездов.

Показатель $\Delta k''_{п.ок}$ рассчитывается следующим образом:

$$\Delta k''_{п.ок} = 0,01 \cdot T_{ок} + 0,0002 \cdot N_{г.пл} - 0,06.$$

Оценить применимость итоговых коэффициентов для точного закрытия позволяет определение зависимости потребного числа парка локомотивов от расчетной продолжительности «окна» за трехчасовые периоды.

В расчетах (табл. 1) используются следующие значения показателей: $N_{г.пл} = 60$ пар поездов; $J_p = 0,017$ ч; $N_{пс.пл} = 20$ пар поездов; $k_{п.э.об} = 1,277$.

Таблица 1

Результаты расчетов определения зависимости потребности парка локомотивов от продолжительности «окна»

$T_{ок}$	$\Delta k'_{п.ок}$	$\Delta k''_{п.ок}$	$\Delta k_{п.ок}$	$k_{п.э.сп}$	$N, \text{лок.}$	Прирост
3	0,017	0	0,017	1,294	78	–
6	0,067	0,012	0,079	1,356	81	3
9	0,151	0,042	0,193	1,470	88	11
12	0,269	0,072	0,341	1,618	97	19
15	0,421	0,102	0,522	1,800	108	30
18	0,606	0,132	0,738	2,015	121	43
21	0,825	0,162	0,986	2,264	136	58
24	1,077	0,192	1,269	2,546	153	75

На основании полученных данных можно сделать вывод о том, что ранее разработанная методика [8], скорректированная распоряжением ОАО «РЖД» от 25.02.2019 № 348/р [9], подходит только для закрытия путей перегона в рамках технологических «окон». Потребный парк локомотивов, рассчитанный при большей продолжительности, чем технологические «окна», не соответствует действительности и значительно завышен (в табл. 1 эти результаты выделены красным). Поэтому по имеющимся отчетным данным и «оконным» графикам значнейшее увеличение коэффициента потребности для «окон» большей продолжительности необходимо определять с использованием других параметров.

Увеличение коэффициента потребности в связи с дополнительным нахождением локомотивов во главе поездов на рассматриваемом участке, вызванным длительным закрытием пути, вычислено путем определения суточного отклонения поездо-часов от нормальных условий работы. Для расчета потребного коэффициента проанализированы два графика движения поездов в будний день на период 12 ч с «окнами» и без «окон» (рис. 1).

Суммарное число грузовых ниток для графика с закрытиями — 30, без закрытий — 35 пар. При этом количество пассажирских ниток для двух анализируемых графиков полностью совпадает.

Согласно предлагаемой авторами методики, значение $\Delta k'_{п.ок}$ можно рассчитать по формуле

$$\Delta k'_{п.ок} = \frac{(N_{6/ок} - N_{с/ок}) \cdot t_{сл.сп} \cdot 2}{N_{6/ок} \cdot t_{сл.сп}},$$

где $N_{6/ок}$ и $N_{с/ок}$ — суммарное количество грузовых составов, проследовавших за 12 ч без «окон» и с «окнами», пар поездов; $t_{сл.сп}$ — усредненное время следования по участку, ч.

Таким образом:

$$\Delta k'_{п.ок} = \frac{(35 - 30) \cdot 4,25 \cdot 2}{35 \cdot 4,25} = 0,28.$$

Увеличение коэффициента потребности из-за дополнительных простоев локомотивов в пункте оборота, вызванных предоставлением окна ($\Delta k''_{п.ок}$), определено по предлагаемой методике на основе отчетных данных об обороте грузовых локомотивов с заходами и без заходов в депо (в/из) для базисных и обусловленных длительным закрытием значений локомотивного парка за два месяца (с «окнами» и без). Однако дополнительные простои на пункте технического обслуживания формируются из-за перегруженности его канав для проведения ТО-2 в зависимости от норм пробега электровозов. Пробег электровозов серии 2ЭС6, используемых на рассматриваемом участке, равен 180 ч (7,5 сут), следовательно, при продолжительности закрытий, равной 6 сут, $\Delta k''_{п.ок}$ не окажет влияния на общий коэффициент. Итоговое значение $\Delta k_{п.ок}$ при выполнении ремонтно-путевых работ на рассматриваемом участке с $T_{ок} = 6$ сут составит 0,28. Полученная величина $\Delta k_{п.ок}$ при ремонтно-путевых работах до 6 сут включительно будет одинаковой.

Для закрытий продолжительностью более 6 сут значение $\Delta k''_{п.ок}$ также определяется по предлагаемой методике с использованием формулы

$$\Delta k''_{п.ок} = \frac{T_{осн/об} - T'_{осн/об}}{T'_{осн/об}},$$

где $T_{осн/об}$ и $T'_{осн/об}$ — средний для рассматриваемого участка простой локомотива на станциях основного и оборотного депо (в/из) за два месяца с «окнами» и без «окон», ч.

$$\Delta k''_{п.ок} = \frac{(4,40 + 2,68) - (4,05 + 2,56)}{4,05 + 2,56} = 0,07.$$

Итоговое значение $\Delta k_{п.ок}$ при выполнении ремонтно-путевых работ на рассматриваемом участке с $T_{ок} > 6$ сут:

$$\Delta k_{п.ок} = 0,28 + 0,07 = 0,35.$$

Итоговые значения $k_{п.эксп}$ приведены в табл. 2.

Таблица 2

Итоговые значения коэффициента потребности $k_{п.эксп}$

$T_{ок}$, сут	$k_{п.эксп}$
3	1,457
6	1,457
9	1,464
12	1,471

Полученные значения $k_{п.эксп}$ можно использовать для последующих расчетов потребного эксплуатируемого парка локомотивов.

Возросшая потребность в эксплуатируемых локомотивах для 6-, 9- и 12-суточных закрытий перегонов определена по размерам планируемого на период «окон» поездопотока (табл. 3).

Расчеты потребного парка локомотивов грузового движения показывают, что основное увеличение связано с вынужденным применением пакетного графика в период «окон», при этом дополнительные затраты времени, обусловленные проведением ТО-2, менее значимы и необходимы при «окнах» продолжительностью более 6 сут. Сравнение полученных результатов с данными табл. 1 подтверждает целесообразность использования

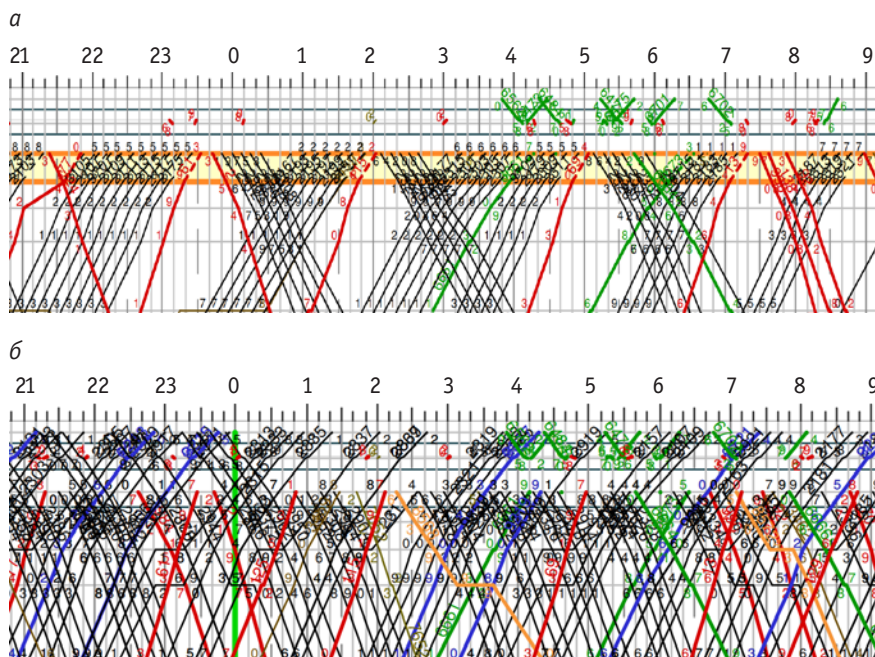


Рис. 1. Графики движения поездов с «окнами» (а) и без «окон» (б)

предлагаемой методики определения коэффициентов $\Delta k'_{\text{п.ок}}$ и $\Delta k''_{\text{п.ок}}$.

В целом значение выполненного исследования заключается в повышении точности расчетов эксплуатируемого парка локомотивов грузового движения при оперативном планировании эксплуатационной работы. Это особенно важно, так как современные программные комплексы для автоматизации управления процессом перевозок требуют достоверности используемых данных и учета всех факторов, влияющих на изменения в технологии работы железнодорожного транспорта.

Результаты расчетов парка локомотивов при проведении «окон» были признаны соответствующими реальным и одобрены работниками локомотивного отдела службы движения.

Изменение потребности в локомотивах при длительных закрытиях перегонов

Потребность парка локомотивов в зависимости от продолжительности «окна»	Увеличение количества локомотивов в зависимости от продолжительности окна, лок.-сут			
	3 сут	6 сут	9 сут	12 сут
Количество локомотивов в период «окон»	87	87	88	89
Прирост парка локомотивов к периоду без «окон», лок.	+10	+10	+11	+12

При поиске рационального варианта продолжительности «окон» установлено, что для путейцев более целесообразны длительные сроки ремонта пути. Это связано с тем, что затраты на организацию и подготовительно-заключительные работы значительны и при сравнении вариантов обратно пропорциональны срокам

ремонтных работ. Но для организации беспрепятственного пропуска грузовых поездов предпочтительнее вариант продолжительности «окна» в 6 сут и менее, так как при этом минимизируется дополнительный рабочий парк локомотивов.

Сведения об авторах:

Ольга Павловна Югина,

кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление эксплуатационной работой» Сибирского государственного университета путей сообщения

Лариса Сергеевна Жарикова,

кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление эксплуатационной работой» Сибирского государственного университета путей сообщения

Authors information:

Olga P. Yugrina,

PhD in Engineering, Associate Professor of Management of Exploitation Work Department, Siberian Transport University

Larisa S. Zharikova,

PhD in Engineering, Associate Professor of Management of Exploitation Work Department, Siberian Transport University

Литература

- Валинский О. С. Повышать эффективность планирования и управления локомотивным парком // Железнодорожный транспорт. 2017. № 2. С. 41–44. ISSN 0044-4448.
- Феоктистов Л. В. Комплексное планирование ремонтно-строительных работ и движения поездов // Железнодорожный транспорт. 2013. № 4. С. 21–24. ISSN 0044-4448.
- О взаимодействии в организации ремонтных работ в период длительно закрытых перегонов : распоряжение ОАО «РЖД» от 07.04.2014 № 872. Москва, 2014. 76 с.
- Инструкция о порядке предоставления и использования «совмещенных окон» для выполнения ремонтных работ на объектах инфраструктуры, принадлежащих ОАО «РЖД» от 25 августа 2009 г. № 14216.
- Одуденко Т. А. Технология пропуска поездов при перерывах в движении на железнодорожных участках Дальневосточного региона : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва, 2014. 161 с.
- Широкова В. В. Организация движения поездов в период летних путевых работ. Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2001. 40 с.
- Об утверждении Инструкции по учету локомотивов : распоряжение ОАО «РЖД» от 21.03.2022 г. № 2155р. Москва, 2022. 82 с.

References

- Valinsky O. S. To improve the efficiency of locomotive fleet planning and management. *Railway Transport*. 2017. No. 2. Pp. 41–44. ISSN 0044-4448. (In Russian).
- Feoktistov L. V. Integrated planning of repair and construction works and train movement. *Railway Transport*. 2013. No. 4. Pp. 21–24. ISSN 0044-4448. (In Russian).
- On cooperation in the organization of repair work during the period of long-term closed crossings : the Order of JSC «RZD» dated 07.04.2014 No. 872. Moscow, 2014. 76 p. (In Russian).
- Instructions on the procedure for the provision and use of «combined windows» for carrying out repair work at infrastructure facilities owned by Russian Railways dated 25.08.2009 No. 14216. (In Russian).
- Odudenko T. A. Technology of passing trains during breaks in traffic on railway sections of the Far Eastern region : PhD in Engineering Thesis. Moscow, 2014. 161 p. (In Russian).
- Shirokova V. V. Organization of train traffic during summer track work. Khabarovsk : Publishing House of FESTU, 2001. 40 p. (In Russian).
- Approval of the Instructions for the accounting of locomotives : the Order of JSC «RZD» dated 21.03.2022 No. 2155r. Moscow, 2022. 82 p. (In Russian).

8. Методика оперативного нормирования парка локомотивов грузового движения : утв. начальником Центральной дирекции управления движением — филиала ОАО «РЖД» Ивановым П. А. 29.12.2012. Москва, 2012. 102 с.
9. Об утверждении Инструкции о порядке планирования, разработки, предоставления и использования технологических «окон» для ремонтных и строительно-монтажных работ : распоряжение ОАО «РЖД» от 25.02.2019 № 348/р. Москва, 2019. 40 с.

8. The methodology of operational rationing of the fleet of freight locomotives : approved by Head of the Central Directorate of Traffic Management — Branch of JSC «RZD» Ivanov P. A. 29.12.2012. Moscow, 2012. 102 p. (In Russian).
9. Approval of the Instructions on the procedure for planning, developing, providing and using technological «windows» for repair and construction and installation work : the Order of JSC «RZD» dated 25.02.2019 No. 348/r. Moscow, 2019. 40 p. (In Russian).

Объем статьи 0,45 авторских листа

Научная статья

УДК 621.391

Анализ условий распространения сигнала АЛСН в рельсовой линии в процессе движения поезда

Руслан Рифович Юсупов¹, Алексей Сергеевич Хохрин¹¹ Приволжский государственный университет путей сообщения, Самара, Россия

Analysis of propagation conditions for signal of CALS in a rail line during train movement

Ruslan R. Yusupov¹, Alexey S. Khokhrin¹¹ Volga State Transport University, Samara, Russia

Аннотация

Повышение помехоустойчивости локомотивного приемного устройства сигналов автоматической локомотивной сигнализации непрерывного типа (АЛСН) до настоящего времени остается актуальной задачей. Согласно теории оптимального приема, алгоритм функционирования и структура оптимального (в смысле минимального искажения сообщения) приемника во многом определяются свойствами принимаемого сигнала. Для решения задачи выбора структуры оптимального (или квазиоптимального) приемника авторами проанализированы условия распространения сигнала АЛСН в рельсовой линии при движении поезда. Для этого с использованием теории рельсовых цепей разработана математическая модель, которая позволила исследовать зависимости изменения амплитуды и фазы несущей сигнала АЛСН от ординаты поездного шунта. Выполнен расчет зависимостей для двух числовых кодовых рельсовых цепей с частотой сигнального тока 50 Гц и длиной рельсовой линии 1 и 2,6 км при значениях сопротивления изоляции РЛ 0,5, 1 и 50 Ом·км. Исследование показало, что сигнал АЛСН — это сигнал со случайными, изменяющимися в процессе движения поезда амплитудой и начальной фазой. Следовательно, задача оптимального приема сигнала АЛСН должна рассматриваться как задача различения сигнала со случайными амплитудой и начальной фазой.

Ключевые слова: автоматическая локомотивная сигнализация непрерывного типа, рельсовая линия, сопротивление изоляции, ордината поездного шунта, сигнал АЛСН, случайная амплитуда, случайная начальная фаза

Abstract

Increasing the noise immunity of the locomotive receiver for signals of continuous automatic locomotive signaling (CALS) remains an urgent task to date. According to theory of optimal reception, the algorithm of functioning and structure of optimal receiver (in the sense of minimal distortion of the message) are largely determined by the properties of received signal. To solve the problem of choosing the structure of an optimal (or quasi-optimal) receiver, the authors analyzed the conditions for propagation of CALS signal in a rail line during train movement. For this purpose, using the theory of rail circuits, a mathematical model was developed that made it possible to study the dependence of the amplitude and phase changes of CALS carrier signal on the ordinate of the train shunt. The dependencies were calculated for two numerical code rail circuits with a signal current frequency of 50 Hz and a rail line length of 1 and 2.6 km with insulation resistance values of 0.5, 1 and 50 ohm·km. The study showed that CALS signal is a signal with a random amplitude and initial phase that change during the movement of the train. Therefore, the problem of optimal reception of CALS signal should be considered as the problem of distinguishing a signal with random amplitude and initial phase.

Keywords: continuous automatic locomotive signaling, rail line, insulation resistance, train shunt ordinate, signal of automatic locomotive continuous signaling, random amplitude, random initial phase

DOI: 10.20291/1815-9400-2025-1-45-51

ВВЕДЕНИЕ

Для обеспечения устойчивого функционирования канала автоматической локомотивной сигнализации непрерывного типа (АЛСН) локомотивное приемное устройство должно осуществлять безошибочный прием сигналов АЛСН, поступающих из рельсовой линии (РЛ). Согласно теории оптимального приема, алгоритм функционирования и структура оптимального (в смысле минимального искажения сообщения) приемника во многом определяются свойствами принимаемого сигнала [1]. Для решения задачи выбора структуры оптимального (или квазиоптимального) приемника сигналов АЛСН проанализированы условия распространения сигнала в рельсовой линии в процессе движения поезда с целью определения зависимости изменения амплитуды и фазы несущей сигнала АЛСН от ординаты поездного шунта.

Сигнал АЛСН представляет собой амплитудно-манипулированное гармоническое колебание с частотой несущей 25, 50 или 75 Гц, т. е. последовательность радиоимпульсов низкой частоты.

Принимаемый на локомотиве сигнал АЛСН при отсутствии помех можно представить как

$$s(t) = a(t) \cdot A \cdot f(t) \cos[\omega t - \varphi(t)], \quad (1)$$

где $a(t)$ — множитель, характеризующий относительное изменение амплитуды сигнала в индуктивно-рельсовой линии, в процессе движения локомотива от приемного конца РЛ к передающему происходит увеличение $a(t)$; A — амплитуда сигнала на входе РЛ; $f(t)$ — закон (функция) амплитудной манипуляции (оглашающая кодового сигнала АЛСН — последовательность видеоимпульсов); ω — угловая частота колебаний несущей сигнала АЛСН, рад/с; $\varphi(t)$ — фазовый сдвиг по несущей частоте сигнала на выходе РЛ относительно сигнала на входе РЛ, °.

На рис. 1 представлены временные диаграммы функций $f_j(t)$ амплитудной манипуляции сигналов АЛСН, формируемых кодовыми путевыми трансмиттерами КПТШ-5 и КПТШ-7 (с длительностью кодового цикла 1,6 и 1,86 с соответственно).

Рельсовая линия представляет собой электрическую цепь с равномерно распределенными параметрами. Особенностью РЛ является наличие несимметричной утечки тока в землю и непосредственно между рельсовыми нитями по верхнему слою балласта и шпалам [2].

Величины $a(t)$ и $\varphi(t)$ в выражении (1) определяются первичными параметрами РЛ, ее длиной, частотой несущей сигнала

АЛСН, а также для конкретной рельсовой цепи (РЦ) зависят от ординаты поездного шунта, непрерывно изменяющейся во времени в процессе движения поезда.

При незначительных изменениях $a(t)$ и $\varphi(t)$ от минимального до максимального значения при движении локомотива сигнал $s(t)$ можно считать сигналом с постоянными амплитудой и начальной фазой. В противном случае $s(t)$ следует считать сигналом со случайными амплитудой и начальной фазой. В зависимости от этого определяется структура оптимального приемника для обнаружения или различения сигналов.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА РАСПРОСТРАНЕНИЯ СИГНАЛА АЛСН В РЕЛЬСОВОЙ ЛИНИИ ПРИ ДВИЖЕНИИ ПОЕЗДА

Для решения задачи выбора структуры оптимального (или квазиоптимального) приемника следует оценить диапазон возможных значений $a(t)$ и $\varphi(t)$, что приводит к необходимости анализа условий распространения сигнала АЛСН по рельсовой линии в процессе движения поезда. Выполним такой анализ с использованием теории рельсовых цепей.

При расчете основных режимов рельсовую линию представляют в виде электрической цепи, состоящей из трех проводов — двух рельсов и земли, рельсы обладают удельным продольным сопротивлением z_1, z_2 и сопротивлением взаимной индуктивности z_m , удельное сопротивление земли как провода с очень большим сечением принимается равным нулю. Эти провода параллельно соединены между собой равномерно распределенными проводимостями изоляции g_1, g_2 и g_{12} . Проводимость g_{12} характеризует величину тока утечки, проходящую как бы непосредственно из рельса в рельс по верхнему слою балласта и шпалам.

Схема замещения элемента dx рельсовой линии изображена на рис. 2, на котором используются следующие обозначения: z_1, z_2 — удельные сопротивления одиночных рельсов, Ом; z_m — сопротивление взаимной индукции, Ом; g_1, g_2 — удельные проводимости заземления рельсовых нитей (РН), См; g_{12} — удельная проводимость верхнего слоя балласта и шпал, См; x — расстояние от конца рельсовой линии, где подключена

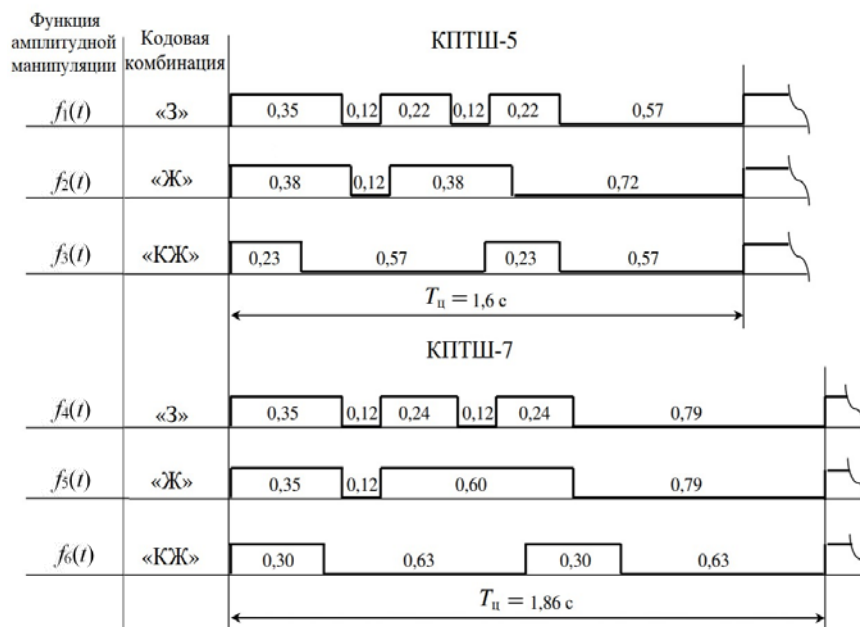


Рис. 1. Временные диаграммы функций $f_j(t)$ амплитудной манипуляции сигналов АЛСН

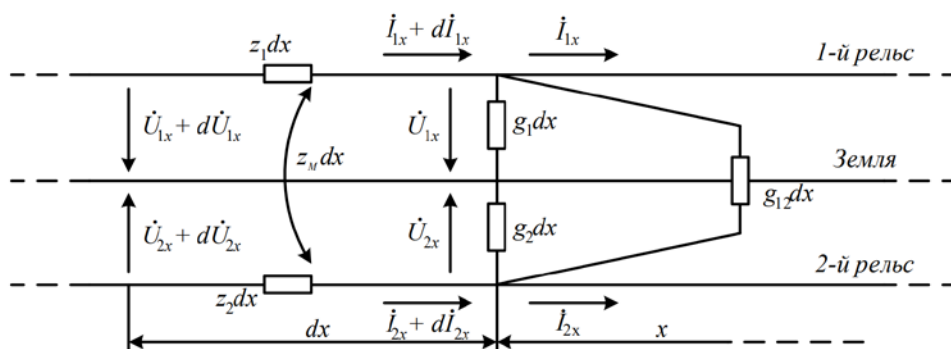


Рис. 2. Схема замещения элемента dx рельсовой линии

нагрузка, км; i_{1x}, i_{2x} — соответственно токи в первой и второй РН с положительным направлением от питающего конца к нагрузке, А; $\dot{U}_{1x}, \dot{U}_{2x}$ — напряжение соответственно первой и второй РН относительно земли с положительным направлением от рельсов к земле, В.

Напряжения \dot{U}_{1x} и \dot{U}_{2x} рассчитываются по выражениям:

$$\dot{U}_{1x} = A_1 \operatorname{ch} \gamma_1 x + A_2 \operatorname{sh} \gamma_1 x + A_3 \operatorname{ch} \gamma_2 x + A_4 \operatorname{sh} \gamma_2 x; \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_{2x} = & \frac{\gamma_1^2 - z_1(g_1 + g_{12}) + z_m g_{12}}{z_m(g_2 + g_{12}) - z_1 g_{12}} (A_1 \text{ch} \gamma_1 x + A_2 \text{sh} \gamma_1 x) + \\ & + \frac{\gamma_2^2 - z_1(g_1 + g_{12}) + z_m g_{12}}{z_m(g_2 + g_{12}) - z_1 g_{12}} (A_3 \text{ch} \gamma_2 x + A_4 \text{sh} \gamma_2 x), \end{aligned} \quad (3)$$

где γ_1 — коэффициент распространения волны земляного тракта РЛ; γ_2 — коэффициент распространения волны фазового тракта РЛ,

$$\gamma_1 = \sqrt{\frac{1}{2}a_1} - \sqrt{\frac{1}{4}a_1^2 - a_2};$$

$$\gamma_2 = \sqrt{\frac{1}{2}a_1} + \sqrt{\frac{1}{4}a_1^2 - a_2},$$

где $a_1 = g_{12}(z_1 + z_2 - 2z_m) + g_1 z_1 + g_2 z_2$;

$$a_2 = (z_1 z_2 - z_m^2)(g_1 g_2 + g_1 g_{12} + g_2 g_{12}).$$

Токи в РН определяются выражениями:

$$\begin{aligned} \dot{I}_{1x} = & \gamma_1 \frac{z_2 - Mz_m}{z_1 z_2 - z_m^2} (A_1 \text{sh}\gamma_1 x + A_2 \text{ch}\gamma_1 x) + \\ & + \gamma_2 \frac{z_2 - Nz_m}{z_{12} - z_m^2} (A_3 \text{sh}\gamma_2 x + A_4 \text{ch}\gamma_2 x); \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned}
\dot{I}_{2x} = & \gamma_1 \frac{Mz_1 - z_M}{z_1 z_2 - z_M^2} (A_1 \text{sh}\gamma_1 x + A_2 \text{ch}\gamma_1 x) + \\
& + \gamma_2 \frac{Nz_1 - z_M}{z_1 z_2 - z_M^2} (A_3 \text{sh}\gamma_2 x + A_4 \text{ch}\gamma_2 x),
\end{aligned} \quad (5)$$

$$\text{где } M = \frac{\gamma_1^2 - z_1(g_1 + g_2) + z_m g_{12}}{z_m(g_2 + g_{12}) - z_1 g_{12}}; N = \frac{\gamma_2^2 - z_1(g_1 + g_2) + z_m g_{12}}{z_m(g_2 + g_{12}) - z_1 g_{12}}.$$

Величины A_1, A_2, A_3 и A_4 в (2)–(5) являются постоянными интегрирования и находятся для каждой конкретной РЦ на основании граничных условий [2].

Схема замещения РЦ с локомотивным приемником в нормальном режиме представлена на рис. 3. Как видно из схемы,

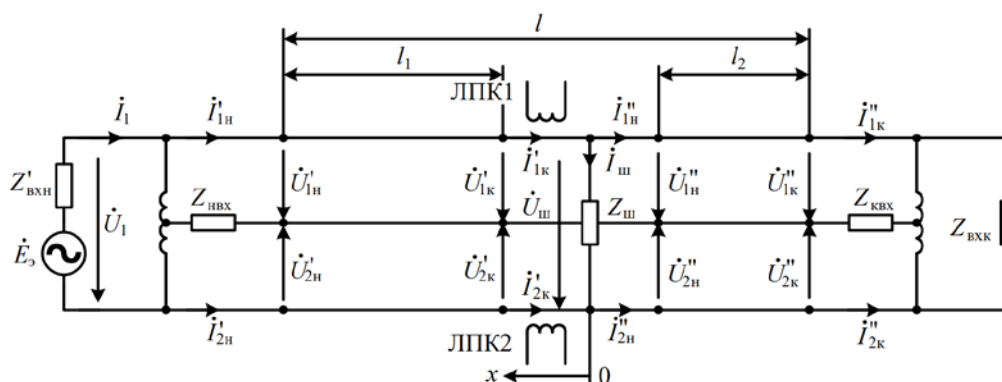


Рис. 3. Схема замещения рельсовой цепи с локомотивным приемником в нормальном режиме

рельсовая линия длиной l состоит из двух участков l_1 и l_2 с различным изменением напряжения и тока вдоль РЛ. На схеме сопротивление $Z_{\text{НВХ}}$ представляет собой входное сопротивление между средней точкой дроссель-трансформатора смежной рельсовой цепи и землей для рельсовой цепи, смежной с началом данной РЦ, а $Z_{\text{ВХ}}$ — входное сопротивление между средней точкой дроссель-трансформатора смежной РЦ и землей для РЦ, смежной с концом данной РЦ.

На рис. 3 использованы следующие обозначения: $Z_{\text{ш}}$ — полное сопротивление поездного шунта, Ом; $\dot{I}_{\text{ш}}$ и $\dot{U}_{\text{ш}}$ — ток (А) и напряжение (В) на поездном шунте; \dot{I}_1 и \dot{U}_1 — ток (А) и напряжение (В) в начале РЛ; $Z'_{\text{ВХ}}$ — обратное входное сопротивление устройств согласования в начале РЛ при замкнутых накоротко зажимах источника сигнала, Ом; $Z_{\text{ВХ}}$ — входное сопротивление устройств согласования в конце рельсовой линии, на выходе которых подключен путевой приемник рельсовой цепи, Ом; ЛПК1, ЛПК2 — локомотивные приемные катушки.

На рис. 3 также показаны положительные направления токов и напряжений, начало ординат располагается у места подключения локомотивного приемника.

Величины \dot{U}_1 и \dot{I}_1 для РЦ с локомотивным приемником в нормальном режиме определяются выражениями [2]:

$$\dot{U}_1 = B_{\text{л}} \dot{I}_{\text{л}}; \quad (6)$$

$$\dot{I}_1 = D_{\text{л}} \dot{I}_{\text{л}}, \quad (7)$$

где $B_{\text{л}}$, $D_{\text{л}}$ — коэффициенты рельсового четырехполюсника; $\dot{I}_{\text{л}} = \frac{\dot{I}_{1\text{к}} - \dot{I}'_{2\text{к}}}{2}$ — средняя величина тока в рельсах под локомотивными приемными катушками (ЛПК), А.

В случае симметричных РЛ выражения для $B_{\text{л}}$ и $D_{\text{л}}$ имеют вид

$$\left. \begin{aligned} B_{\text{л}} &= Z_{\text{в}} \text{sh} \gamma l_1 + \frac{Z_{\text{ш}} Z_{\text{ш}} (Z_{\text{ВХ}} \text{ch} \gamma l_2 + Z_{\text{в}} \text{sh} \gamma l_2) \text{ch} \gamma l_1}{(Z_{\text{ш}} Z_{\text{ВХ}} + Z_{\text{в}}^2) \text{sh} \gamma l_2 + Z_{\text{в}} (Z_{\text{ш}} + Z_{\text{ВХ}}) \text{ch} \gamma l_2}; \\ D_{\text{л}} &= \text{ch} \gamma l_1 + \frac{Z_{\text{ш}} (Z_{\text{ВХ}} \text{ch} \gamma l_2 + Z_{\text{в}} \text{sh} \gamma l_2) \text{sh} \gamma l_1}{(Z_{\text{ш}} Z_{\text{ВХ}} + Z_{\text{в}}^2) \text{sh} \gamma l_2 + Z_{\text{в}} (Z_{\text{ш}} + Z_{\text{ВХ}}) \text{ch} \gamma l_2}, \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

где $Z_{\text{в}}$ — волновое сопротивление симметричной РЛ, Ом.

В процессе движения локомотива вдоль рельсовой линии от ее конца к ее началу расстояния l_1 и l_2 непрерывно изменяются.

В момент вступления головы локомотива на конец РЛ ($l_2 = 0$, $l_1 = l$) выражения для $B_{\text{л}}$ и $D_{\text{л}}$ примут вид

$$\left. \begin{aligned} B_{\text{л}} &= Z_{\text{в}} \text{sh} \gamma l + \frac{Z_{\text{ш}} Z_{\text{ВХ}}}{Z_{\text{ш}} + Z_{\text{ВХ}}} \text{ch} \gamma l; \\ D_{\text{л}} &= \frac{1}{Z_{\text{в}}} \frac{Z_{\text{ш}} Z_{\text{ВХ}}}{Z_{\text{ш}} + Z_{\text{ВХ}}} \text{sh} \gamma l + \text{ch} \gamma l. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

В момент, когда голова локомотива проезжает точку подключения передающей аппаратуры канала АЛСН к РЛ ($l_1 = 0$, $l_2 = l$), выражения для $B_{\text{л}}$ и $D_{\text{л}}$ примут вид

$$B_{\text{л}} = \frac{Z_{\text{в}} Z_{\text{ш}} (Z_{\text{ВХ}} \text{ch} \gamma l + Z_{\text{в}} \text{sh} \gamma l)}{(Z_{\text{ш}} Z_{\text{ВХ}} + Z_{\text{в}}^2) \text{sh} \gamma l + Z_{\text{в}} (Z_{\text{ш}} + Z_{\text{ВХ}}) \text{ch} \gamma l}; \quad D_{\text{л}} = 1.$$

В (1) величина $a(t)$ определяется выражением

$$a(t) = \left| \frac{\dot{E}_{\text{л}}(t)}{\dot{E}_{\text{л.к}}(t)} \right|,$$

где $\dot{E}_{\text{л}}(t)$ — ЭДС на выходе ЛПК, изменяющаяся во времени при движении локомотива вдоль рельсовой линии, В; $\dot{E}_{\text{л.к}}$ — ЭДС на выходе ЛПК в момент вступления локомотива на приемный конец рельсовой цепи (при $t = 0$), В.

ЭДС на выходе одной ЛПК определяется выражением [3]

$$\dot{E}_{\text{л}}(t) = -M(t) \frac{d\dot{I}_{\text{л}}(t)}{dt} - \dot{I}_{\text{л}}(t) \frac{dM(t)}{dt}, \quad (10)$$

где $M(t)$ — взаимная индуктивность между ЛПК и рельсовой нитью, Гн.

Дальнейший анализ будем проводить, основываясь на следующих допущениях:

локомотив движется по прямолинейному участку пути с неразветвленной рельсовой линией;

боковая качка и галопирование кузова локомотива отсутствуют;

асимметрия подвеса ЛПК над уровнем головки рельса и асимметрия их электрических и магнитных параметров отсутствуют;

внешние помехи отсутствуют.

В этом случае взаимная индуктивность между ЛПК и рельсовой нитью является величиной постоянной, а выражение (10) примет вид

$$\dot{E}_{\text{л}}(t) = -M \frac{d\dot{I}_{\text{л}}(t)}{dt},$$

т. е. изменение ЭДС на выходе ЛПК пропорционально изменению тока в рельсовой нити под ЛПК.

Тогда можно записать

$$a(t) = \left| \frac{\dot{I}_{\text{л}}(t)}{\dot{I}_{\text{л.к}}(t)} \right|, \quad (11)$$

где $\dot{I}_{\text{л.к}}$ — средняя величина тока в рельсовых нитях под ЛПК в момент нахождения локомотива в конце рельсовой линии, А.

На основании аналогичных рассуждений приходим к выводу, что величину $\varphi(t)$ в выражении (1) можно определить как

$$\varphi(t) = \varphi_{i_{\text{л}}}(t) - \varphi_{i_{\text{л.к}}}, \quad (12)$$

где $\varphi_{i_{\text{л}}}(t)$ — фаза колебания тока $\dot{I}_{\text{л}}$, изменяющаяся в процессе движения локомотива вдоль РЛ, °; $\varphi_{i_{\text{л.к}}}$ — фаза колебания тока $\dot{I}_{\text{л}}$ в момент нахождения локомотива в конце РЛ, °.

В выражениях (11) и (12) от переменной t можно перейти к однозначно связанной с ней переменной x — ординате поездного шунта.

В результате получаем зависимости:

$$a(x) = \left| \frac{\dot{I}_l(x)}{\dot{I}_{л.к}} \right|; \quad (13)$$

$$\varphi(x) = \arg(\dot{I}_l(x)) - \arg(\dot{I}_{л.к}). \quad (14)$$

Поскольку фаза гармонического колебания является относительным параметром, а в выражении (14) нас интересует не абсолютное значение фазы, а ее изменение (сдвиг) в ординате x относительно значения в конце РЛ (при $x = 0$), то можно положить, что $\arg(\dot{I}_{л.к}) = 0$, соответственно

$$\varphi(x) = \arg(\dot{I}_l(x)). \quad (15)$$

Оценим диапазон изменения значений $a(x)$ и $\varphi(x)$ в процессе движения локомотива вдоль РЛ (при изменении ординаты x).

Согласно [2], величина $\dot{I}_л$ определяется выражением

$$\dot{I}_л = \frac{\dot{E}_э}{Z_{лпо}}, \quad (16)$$

где $\dot{E}_э$ — ЭДС эквивалентного генератора, В; $Z_{лпо}$ — сопротивление передачи основной схемы замещения РЦ с локомотивным приемником, Ом.

ЭДС эквивалентного генератора можно определить через напряжение $\dot{U}_{ист}$ источника сигнала АЛСН:

$$\dot{E}_э = \frac{\dot{U}_{ист}}{A_H}. \quad (17)$$

Напряжение $\dot{U}_{ист}$ определяется выражением

$$\dot{U}_{ист} = A_H \dot{U}_1 + B_H \dot{I}_1, \quad (18)$$

где A_H и B_H — коэффициенты четырехполюсника N_H замещающего устройство согласования в начале РЦ.

Тогда (17) примет вид

$$\dot{E}_э = \frac{A_H \dot{U}_1 + B_H \dot{I}_1}{A_H} = \dot{U}_1 + \frac{B_H \dot{I}_1}{A_H} = \dot{U}_1 + Z'_{вхн} \dot{I}_1, \quad (19)$$

где $Z'_{вхн} = \frac{B_H}{A_H}$ — обратное входное сопротивление аппаратуры в начале РЛ, Ом.

В (19) величины \dot{U}_1 и \dot{I}_1 можно определить из (6) и (7) для случая, когда $l_2 = 0$, $l_1 = l$ (поездный шунт находится в конце РЛ). Согласно [1], при электротяге постоянного тока минимальный расчетный ток $\dot{I}_{л.к \min}$ под ЛПК в конце РЛ (через шунт, накладываемый на входной конец РЦ) при частоте сигнала 50 Гц должен быть не менее 2 А (принимая

наихудшее значение $\dot{I}_{л.к \min} = 2$ А). Значения коэффициентов $B_{л}$ и $D_{л}$ в данном случае будут определяться по (9). Тогда из (6), (7) и (9) получаем:

$$\dot{U}_1 = \left(Z_{в} \operatorname{sh} \gamma l + \frac{Z_{ш} Z_{вхк}}{Z_{ш} + Z_{вхк}} \operatorname{ch} \gamma l \right) \dot{I}_{л.к \min}; \quad (20)$$

$$\dot{I}_1 = \left(\frac{1}{Z_{в}} \frac{Z_{ш} Z_{вхк}}{Z_{ш} + Z_{вхк}} \operatorname{sh} \gamma l + \operatorname{ch} \gamma l \right) \dot{I}_{л.к \min}. \quad (21)$$

Соответственно выражение (19) примет вид

$$\begin{aligned} \dot{E}_э = & \left(Z_{в} \operatorname{sh} \gamma l + \frac{Z_{ш} Z_{вхк}}{Z_{ш} + Z_{вхк}} \operatorname{ch} \gamma l \right) \dot{I}_{л.к \min} + \\ & + Z'_{вхн} \left(\frac{1}{Z_{в}} \frac{Z_{ш} Z_{вхк}}{Z_{ш} + Z_{вхк}} \operatorname{sh} \gamma l + \operatorname{ch} \gamma l \right) \dot{I}_{л.к \min}. \end{aligned} \quad (22)$$

В выражении (16) сопротивление передачи основной схемы замещения РЦ с локомотивным приемником определяется следующим образом:

$$Z_{лпо}(x) = D_{л}(x) \cdot Z'_{вхн} + B_{л}(x), \quad (23)$$

где коэффициенты $D_{л}(x)$ и $B_{л}(x)$ являются функциями ординаты x поездного шунта, связанной с длинами l_1 и l_2 участков РЛ выражениями $l_1 = l - x$ и $l_2 = x$.

В соответствии с (8) функции $B_{л}(x)$ и $D_{л}(x)$ имеют вид

$$\left. \begin{aligned} B_{л}(x) = & Z_{в} \operatorname{sh} \gamma l_1(x) + \\ & + \frac{Z_{в} Z_{ш} (Z_{вхк} \operatorname{ch} \gamma l_2(x) + Z_{в} \operatorname{sh} \gamma l_2(x)) \operatorname{ch} \gamma l_1(x)}{(Z_{ш} Z_{вхк} + Z_{в}^2) \operatorname{sh} \gamma l_2(x) + Z_{в} (Z_{ш} + Z_{вхк}) \operatorname{ch} \gamma l_2(x)}; \\ D_{л}(x) = & \operatorname{ch} \gamma l_1(x) + \\ & + \frac{Z_{ш} (Z_{вхк} \operatorname{ch} \gamma l_2(x) + Z_{в} \operatorname{sh} \gamma l_2(x)) \operatorname{sh} \gamma l_1(x)}{(Z_{ш} Z_{вхк} + Z_{в}^2) \operatorname{sh} \gamma l_2(x) + Z_{в} (Z_{ш} + Z_{вхк}) \operatorname{ch} \gamma l_2(x)}. \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

Тогда в соответствии с (16) и с учетом (23) зависимость $\dot{I}_{л}(x)$ будет иметь вид

$$\dot{I}_{л}(x) = \frac{\dot{E}_э}{D_{л}(x) \cdot Z'_{вхн} + B_{л}(x)}. \quad (25)$$

Для получения выражения зависимости $a(x)$ подставим в (13) выражение (25), учитывая, что в знаменателе дроби $\dot{I}_{л.к} = \dot{I}_{л.к \min}$. Получаем

$$a(x) = \left| \frac{\dot{E}_э}{\dot{I}_{л.к \min} [D_{л}(x) \cdot Z'_{вхн} + B_{л}(x)]} \right|. \quad (26)$$

Зависимость (15) с учетом (25) примет вид

$$\varphi(x) = \arg \left(\frac{\dot{E}_0}{D_{\text{л}}(x) \cdot Z'_{\text{вхн}} + B_{\text{л}}(x)} \right). \quad (27)$$

ПОСТРОЕНИЕ ЗАВИСИМОСТЕЙ $a(x)$ И $\varphi(x)$

В соответствии с выражениями (26) и (27) выполним расчеты и построим графики зависимостей $a(x)$ и $\varphi(x)$ для числовых кодовых рельсовых цепей с частотой сигнального тока 50 Гц (при электротяге постоянного тока) и рельсовых линий длиной 1 и 2,6 км (пример расчета такой РЦ длиной 2,6 км в различных режимах работы представлен в [4]). При этом будем использовать коэффициенты четырехполюсника начала РЦ, которые для направления расчета от приемника к источнику сигнала АЛСН имеют значения

$$\begin{vmatrix} A_{\text{н}} & B_{\text{н}} \\ C_{\text{н}} & D_{\text{н}} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 16,424e^{0,78j} & 4,81e^{80,78j} \\ 0,031e^{31,05j} & 0,067e^{5,23j} \end{vmatrix}.$$

Расчеты выполним при следующих значениях сопротивления изоляции РЛ: $r_{\text{из1}} = 0,5 \text{ Ом}\cdot\text{км}$ (при влажном балласте [5]); $r_{\text{из2}} = 1 \text{ Ом}\cdot\text{км}$ (расчетное сопротивление изоляции); $r_{\text{из3}} = 50 \text{ Ом}\cdot\text{км}$ (при сухом или слабо промерзшем балласте) [6, 7].

Графики зависимостей (26) и (27), полученные в результате расчетов, представлены на рис. 4 и 5 соответственно.

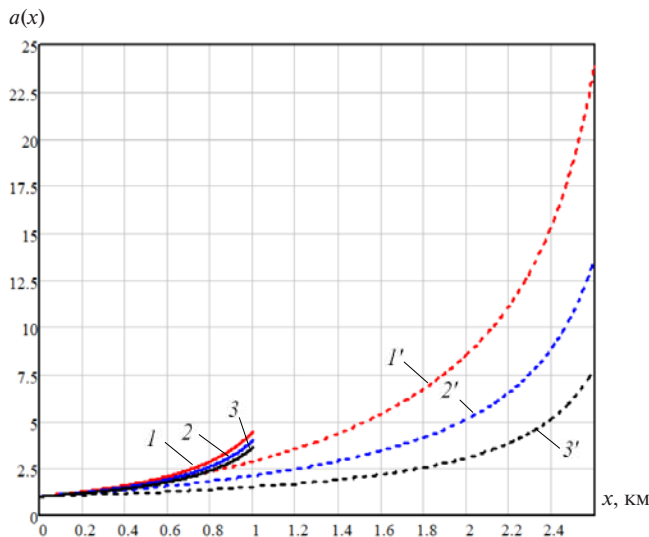


Рис. 4. Графики зависимости $a(x)$:

1, 1' — при $r_{\text{из1}} = 0,5 \text{ Ом}\cdot\text{км}$ и длине РЛ, равной 1 и 2,6 км соответственно; 2, 2' — при $r_{\text{из2}} = 1 \text{ Ом}\cdot\text{км}$ и длине РЛ, равной 1 и 2,6 км соответственно; 3, 3' — при $r_{\text{из3}} = 50 \text{ Ом}\cdot\text{км}$ и длине РЛ, равной 1 и 2,6 км соответственно

Как показывают расчеты и представленные на рис. 4 графики, в процессе движения поезда вдоль РЛ длиной 2,6 км в зависимости от значения $r_{\text{из}}$ величина $a(x)$ изменяется в 78–24 раза, а вдоль РЛ длиной 1 км — в 3,6–4,4 раза, что говорит о существенной зависимости $a(x)$ от длины и сопротивления изоляции РЛ, являющихся в процессе движения поезда по участку железнодорожного пути случайными величинами. Таким образом, сигнал АЛСН можно считать сигналом со случайной амплитудой.

Анализ графиков, представленных на рис. 5, показывает, что при движении поезда фазовый сдвиг $\varphi(x)$ колебания несущей сигнала в рельсах под ЛПК относительно фазы этого же колебания на входе РЛ может изменяться в широких пределах (в процессе движения поезда вдоль РЛ длиной 2,6 км от $-2,09^\circ$ до $77,46^\circ$, а вдоль РЛ длиной 1 км — от $-2,37^\circ$ до $18,15^\circ$). Кроме того, имеется существенная зависимость величины фазового сдвига от сопротивления изоляции РЛ. Следовательно, сигнал АЛСН на входе локомотивного приемного устройства можно считать сигналом со случайной фазой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ условий распространения сигнала АЛСН в рельсовой линии дает основания считать его сигналом со случайными амплитудой и начальной фазой. Поэтому задача оптимального приема сигнала АЛСН должна рассматриваться как различение сигнала со случайными амплитудой и начальной фазой. С учетом результатов представленной работы дальнейшие исследования будут посвящены оценке потенциальных возможностей оптимального приема сигналов АЛСН.

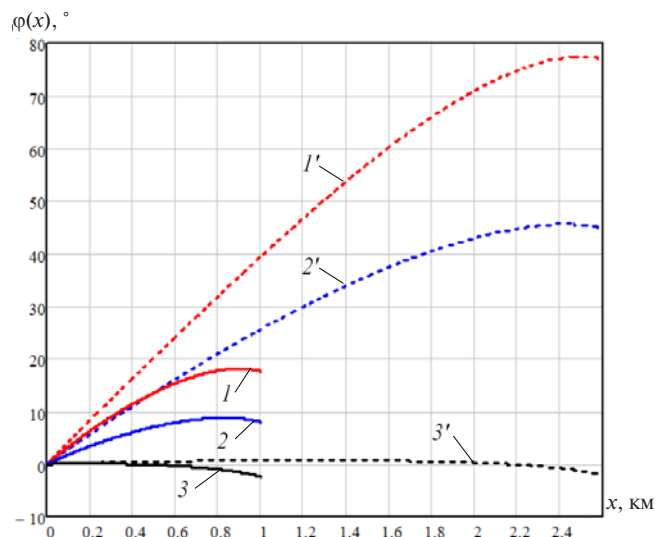


Рис. 5. Графики зависимости $\varphi(x)$:

1, 1' — при $r_{\text{из1}} = 0,5 \text{ Ом}\cdot\text{км}$ и длине РЛ, равной 1 и 2,6 км соответственно; 2, 2' — при $r_{\text{из2}} = 1 \text{ Ом}\cdot\text{км}$ и длине РЛ, равной 1 и 2,6 км соответственно; 3, 3' — при $r_{\text{из3}} = 50 \text{ Ом}\cdot\text{км}$ и длине РЛ, равной 1 и 2,6 км соответственно

Сведения об авторах:**Руслан Рифович Юсупов,**

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» Приволжского государственного университета путей сообщения

Алексей Сергеевич Хохрин,

аспирант, преподаватель кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» Приволжского государственного университета путей сообщения

Authors information:**Ruslan R. Yusupov,**

PhD in Engineering, Associate Professor, Associate Professor of Automation, Telemechanics and Communication in Railway Transport Department, Volga State Transport University

Alexey S. Khokhrin,

postgraduate student, Lecturer of Automation, Telemechanics and Communication in Railway Transport Department, Volga State Transport University

Литература

1. Тихонов В. И. Оптимальный прием сигналов. Москва : Радио и связь, 1983. 320 с.
2. Брылеев А. М., Кравцов Ю. А., Шишляков А. В. Теория, устройство и работа рельсовых цепей. Москва : Транспорт, 1978. 344 с.
3. Шаманов В. И., Шульц В. А., Ведерников Б. М. Электромагнитные процессы, создающие помехи в работе автоматической локомотивной сигнализации // Вестник КазАТК. 2013. № 4 (83). С. 103–108. ISSN 1609-1817.
4. Рельсовые цепи магистральных железных дорог : справочник / В. С. Аркатов, В. Ю. Аркатов, С. В. Казеев, Ю. В. Ободовский. Москва : Миссия-М, 2006. 496 с.
5. Кулик П. Д., Ивакин Н. С., Удовиков А. А. Тональные рельсовые цепи в системах ЖАТ: построение, регулировка, обслуживание, поиск и устранение неисправностей, повышение эксплуатационной надежности. Киев : Мануфактура, 2004. 288 с.
6. Бушуев А. В., Бушуев В. И., Бушуев С. В. Рельсовые цепи: теоретические основы и эксплуатация : монография. Екатеринбург : Изд-во УрГУПС, 2014. 311 с.
7. Техничко-нормировочная карта № ТНК ЦШ 0188-2020. Электрические рельсовые цепи длиной более 300 м. Измерение сопротивления изоляции рельсовой линии (балласта). Москва, 2020. 7 с.

References

1. Tikhonov V. I. Optimal signal reception. Moscow : Radio and communications, 1983. 320 p. (In Russian).
2. Bryleev A. M., Kravtsov Yu. A., Shishlyakov A. V. Theory, design and operation of rail circuits. Moscow : Transport, 1978. 344 p. (In Russian).
3. Shamanov V. I., Shultz V. A., Vedernikov B. M. Electromagnetic processes that interfere with the operation of automatic locomotive signaling. *Bulletin of KazATC*. 2013. No. 4 (83). Pp. 103–108. ISSN 1609-1817. (In Russian).
4. Arkatov V. S., Arkatov V. Yu., Kazeev S. V., Obodovskiy Yu. V. Rail chains of mainline railways : handbook. Moscow : Mission-M, 2006. 496 p. (In Russian).
5. Kulik P. D., Ivakin N. S., Udovikov A. A. Tonal rail circuits in harvester systems: construction, adjustment, maintenance, troubleshooting, improvement of operational reliability. Kyiv : Manufactory, 2004. 288 p. (In Russian).
6. Bushuev A. V., Bushuev V. I., Bushuev S. V. Rail chains: theoretical foundations and operation : monograph. Ekaterinburg : Publishing House of USURT, 2014. 311 p. (In Russian).
7. Technical and rationing card No. 0188-2020. Electric rail circuits with a length of more than 300 m. Measuring the insulation resistance of a rail line (ballast). Moscow, 2020. 7 p. (In Russian).

Объем статьи 0,61 авторских листа



Научная статья
УДК 621.391

Оценка потенциальных возможностей оптимального приема сигналов АЛСН

Руслан Рифович Юсупов¹, Алексей Сергеевич Хохрин¹

¹ Приволжский государственный университет путей сообщения, Самара, Россия

Assessment of the potential for optimal signal reception of CALS

Ruslan R. Yusupov¹, Alexey S. Khokhrin¹

¹ Volga State Transport University, Samara, Russia

Аннотация

Предыдущие исследования авторов об условиях распространения сигнала автоматической локомотивной сигнализации непрерывного типа (АЛСН) в рельсовой линии показали, что он является сигналом со случайными амплитудой и начальной фазой. Представленная статья посвящена оценке потенциальных возможностей оптимального приема сигналов АЛСН при использовании корреляционного приемника, осуществляющего «прием в целом». Установлено, что такой приемник не способен обеспечить достоверное различение всех сигналов АЛСН даже при идеальной цикловой, частотной и фазовой синхронизации и при отсутствии помех. Кроме того, выявлена инвариантность функций правдоподобия, определяемых в приемнике, к начальной фазе колебания несущей принимаемого сигнала. Сделан вывод, что коррелятор приемника можно использовать для амплитудного детектирования огибающей сигнала АЛСН при поэлементном приеме сигнала.

Ключевые слова: автоматическая локомотивная сигнализация непрерывного типа, сигнал, оптимальный прием, корреляционный приемник, «прием в целом», поэлементный прием

Abstract

Previous research by authors on propagation conditions for signal of continuous automatic locomotive signaling (CALS) in a rail line has shown that it is a signal with random amplitude and initial phase. This article is devoted to assessing the potential for optimal reception of CALS signals when using a correlation receiver that performs «reception in general». It has been established that such a receiver is not capable of reliably distinguishing all CALS signals even with perfect cyclic, frequency and phase synchronization and in the absence of interference. In addition, the invariance of the likelihood functions determined in the receiver to the initial oscillation phase of the carrier of the received signal is revealed. It is concluded that the receiver correlator can be used for amplitude detection of the envelope of the CALS signal during piecemeal signal reception.

Keywords: continuous automatic locomotive signaling, signal, optimal reception, correlation receiver, «reception in general», piecemeal reception

DOI: 10.20291/1815-9400-2025-1-52-59

ВВЕДЕНИЕ

Из работы [1] известно, что задача различения радиосигналов со случайными амплитудой и начальной фазой оптимальным образом решается при использовании многоканального приемника, содержащего согласованные фильтры, или корреляционного приемника с квадратурными каналами. Схема, представленная на рис. 1, реализует «прием в целом», т. е. когда решение о передаваемом сообщении принимается на основе анализа всего сигнала (не менее одного кодового цикла) без выделения его отдельных структурных элементов (элементарных сигналов — импульсов и интервалов кодового сигнала АЛСН, соответствующих элементам передаваемой кодовой комбинации). Этот оптимальный приемник не предназначен для наилучшего воспроизведения формы принимаемого сигнала АЛСН. Он формирует на своем выходе напряжение сигнала с максимальным отношением «сигнал/помеха» в момент времени $t = T$ и определяет наибольшее значение этого напряжения. Указанный момент времени должен соответствовать окончанию анализируемого кодового цикла (кодových циклов) принимаемого сигнала.

Кроме «приема в целом» возможен и поэлементный прием сигнала АЛСН, который осуществляется выделением элементов сигнала (импульсов и интервалов) и последующим подсчетом количества импульсов в одном цикле принимаемого сигнала. Потенциально «прием в целом» может обеспечить более высокую достоверность за счет использования дополнительной информации о структуре принимаемого сигнала, определяемого передаваемой кодовой комбинацией.

ОЦЕНКА ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ВОЗМОЖНОСТИ РАЗЛИЧЕНИЯ СИГНАЛОВ АЛСН ОПТИМАЛЬНЫМ КОРРЕЛЯЦИОННЫМ ПРИЕМНИКОМ

На вход оптимального корреляционного приемника (см. рис. 1) из индуктивно-рельсовой линии поступает колебание $\xi(t)$, представляющее собой случайную функцию от полезного сигнала $s_i(t)$ и помехи $n(t)$. В квадратурных подканалах каждого из шести каналов приемника на выходах интеграторов формируются квадратурные составляющие X_{ijc} и X_{ijs} в соответствии с выражениями:

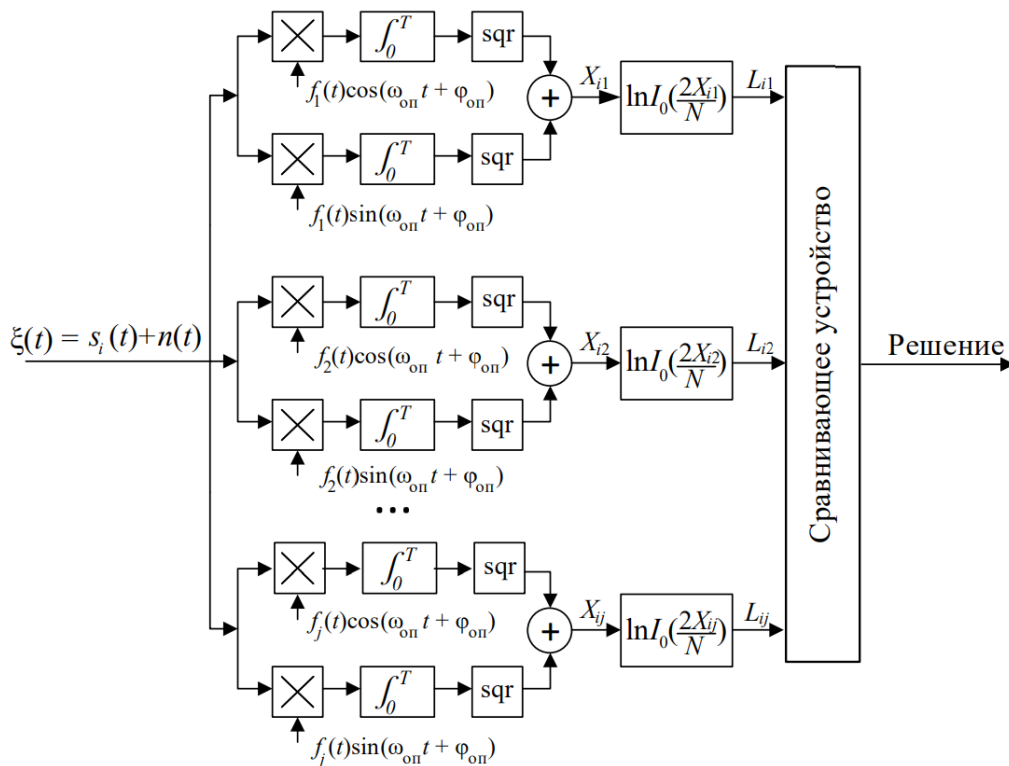


Рис. 1. Структурно-функциональная схема оптимального корреляционного приемника для различения сигналов АЛСН

$$X_{ijc} = \int_0^T \xi(t) f_j(t - \tau) \cos(\omega_{\text{оп}} t + \varphi_{\text{оп}}(t - \tau)) dt; \quad (1)$$

$$X_{ijs} = \int_0^T \xi(t) f_j(t - \tau) \sin(\omega_{\text{оп}} t + \varphi_{\text{оп}}(t - \tau)) dt, \quad (2)$$

где τ — сдвиг во времени (с) начала цикла опорного (эталонного) сигнала $f_j(t)$ относительно начала цикла принимаемого колебания $\xi(t)$; $\omega_{\text{оп}}$, $\varphi_{\text{оп}}$ — соответственно угловая частота (рад/с) и начальная фаза (°) опорных колебаний $\cos(\omega_{\text{оп}} t + \varphi_{\text{оп}})$ и $\sin(\omega_{\text{оп}} t + \varphi_{\text{оп}})$, формируемых в приемнике.

На выходах сумматоров формируются положительные функции X_{ij} :

$$X_{ij} = \sqrt{X_{ijc}^2 + X_{ijs}^2} \geq 0. \quad (3)$$

Физически величина X_{ij} представляет собой значение огибающей суммы сигнала $s_i(t)$ и помехи $n(t)$ в момент времени $t = T$ на выходе согласованного фильтра, имеющего импульсную характеристику

$$h_i(t) = \begin{cases} s_i(T-t) & \text{при } 0 \leq t \leq T, \\ 0 & \text{при } t < 0, t > T. \end{cases}$$

Величина

$$L_{ij} = \ln I_0(2X_{ij}/N) \quad (4)$$

представляет собой логарифмическую функцию правдоподобия на выходе детектора огибающей с законом $\ln I_0(x)$. Здесь N — спектральная плотность мощности белого шума на входе приемника, Вт/Гц.

Сравнивающее устройство принимает решение о принятом сигнале $s_i(t)$ по функции L_{ij} с максимальным значением.

В канале АЛСН при реализации оптимального приемника по схеме рис. 1 сложность представляет формирование функций $f_j(t)$ ($j = \overline{1,6}$), представляющих собой эталонные огибающие сигналов кодовых комбинаций АЛСН.

Функции амплитудной манипуляции $f_j(t)$, используемые при формировании сигнала АЛСН, можно представить кусочно-линейными функциями:

$$f_1(t) = \begin{cases} 1 & \text{при } 0 \leq t < 0,35 \text{ с}; 0,47 \text{ с} \leq t < 0,69 \text{ с}; 0,81 \text{ с} \leq t < 1,03 \text{ с}; \\ 0 & \text{при } 0,35 \text{ с} \leq t < 0,47 \text{ с}; 0,69 \text{ с} \leq t < 0,81 \text{ с}; 1,03 \text{ с} \leq t < 1,60 \text{ с}; \end{cases}$$

$$f_2(t) = \begin{cases} 1 & \text{при } 0 \leq t < 0,38 \text{ с}; 0,50 \text{ с} \leq t < 0,88 \text{ с}; \\ 0 & \text{при } 0,38 \text{ с} \leq t < 0,50 \text{ с}; 0,88 \text{ с} \leq t < 1,60 \text{ с}; \end{cases}$$

$$f_3(t) = \begin{cases} 1 & \text{при } 0 \leq t < 0,23 \text{ с}; 0,80 \text{ с} \leq t < 1,03 \text{ с}; \\ 0 & \text{при } 0,23 \text{ с} \leq t < 0,80 \text{ с}; 1,03 \text{ с} \leq t < 1,60 \text{ с}; \end{cases}$$

$$f_4(t) = \begin{cases} 1 & \text{при } 0 \leq t < 0,35 \text{ с}; 0,47 \text{ с} \leq t < 0,71 \text{ с}; 0,83 \text{ с} \leq t < 1,07 \text{ с}; \\ 0 & \text{при } 0,35 \text{ с} \leq t < 0,47 \text{ с}; 0,71 \text{ с} \leq t < 0,83 \text{ с}; 1,07 \text{ с} \leq t < 1,86 \text{ с}; \end{cases}$$

$$f_3(t) = \begin{cases} 1 & \text{при } 0 \leq t < 0,35 \text{ с; } 0,47 \text{ с} \leq t < 1,07 \text{ с;} \\ 0 & \text{при } 0,35 \text{ с} \leq t < 0,47 \text{ с; } 1,07 \text{ с} \leq t < 1,86 \text{ с;} \end{cases}$$

$$f_6(t) = \begin{cases} 1 & \text{при } 0 \leq t < 0,30 \text{ с; } 0,93 \text{ с} \leq t < 1,23 \text{ с;} \\ 0 & \text{при } 0,30 \text{ с} \leq t < 0,93 \text{ с; } 1,23 \text{ с} \leq t < 1,86 \text{ с.} \end{cases}$$

Присвоим условно всем кодовым комбинациям АЛСН порядковые номера от одного до шести следующим образом:

кодированная комбинация	порядковый номер	условное обозначение
«З» длительностью 1,6 с	1	«З _{1,6} »
«Ж» длительностью 1,6 с	2	«Ж _{1,6} »
«КЖ» длительностью 1,6 с	3	«КЖ _{1,6} »
«З» длительностью 1,86 с	4	«З _{1,86} »
«Ж» длительностью 1,86 с	5	«Ж _{1,86} »
«КЖ» длительностью 1,86 с	6	«КЖ _{1,86} »

Тогда в выражениях (1)–(4) значения индекса $i = 1, 6$ будут представлять собой порядковый номер функции амплитудной манипуляции **принимаемого** сигнала, а $j = 1, 6$ — порядковый номер функции амплитудной манипуляции **опорного** сигнала.

Поскольку принимаемый сигнал АЛСН $s_i(t)$ является циклически повторяющимся с длительностью $T_{\text{ц}}$ кодового цикла 1,6 или 1,86 с, функции $f_j(t)$ также должны быть циклическими с той же длительностью кодового цикла. Причем для получения максимальных значений функции X_{ij} начало циклов и принимаемого сигнала $s_i(t)$, и опорных сигналов $f_j(t)$ должно совпадать во времени, т. е. должно выполняться условие $\tau = 0$. Таким образом, в приемнике необходима система цикловой синхронизации принимаемого сигнала $s_i(t)$ и опорных (эталонных) сигналов $f_j(t)\cos(\omega_{\text{оп}}t + \varphi_{\text{оп}})$ и $f_j(t)\sin(\omega_{\text{оп}}t + \varphi_{\text{оп}})$.

Оценим потенциальные возможности различения сигналов АЛСН оптимальным корреляционным приемником в предположении, что функция $f_j(t)$ с точностью до постоянного множителя соответствует огибающей принимаемого сигнала АЛСН $s_i(t)$ (идеальная цикловая синхронизация: $\tau = 0$), а помехи отсутствуют. В этом случае различие в вычисляемых приемником значениях логарифмических функций правдоподобия L_{ij} при прочих равных условиях будет определяться структурой кодовых комбинаций АЛСН, а также несовпадением угловых частот и начальных фаз несущего колебания принимаемого сигнала и опорных колебаний.

Наибольший интерес представляют следующие случаи:

1) угловая частота и начальная фаза опорных колебаний равны соответственно угловой частоте и начальной фазе несущего колебания принимаемого сигнала АЛСН: $\omega_{\text{оп}} = \omega_{\text{н}}$, $\varphi_{\text{оп}} = \varphi_{\text{н}}$ (идеальная подстройка опорных колебаний под принимаемое несущее колебание по частоте и фазе);

2) опорные и несущее колебания различаются по начальной фазе при одинаковой угловой частоте: $\varphi_{\text{оп}} - \varphi_{\text{н}} = \Delta\varphi \neq 0$, $\omega_{\text{оп}} = \omega_{\text{н}}$ (расстройка опорных колебаний по фазе);

3) опорные и несущее колебания различаются по угловой частоте: $\Delta\omega_{\text{оп}} = \omega_{\text{оп}} - \omega_{\text{н}} \neq 0$ (расстройка опорных колебаний по частоте).

Рассмотрим их.

Первый случай. Для упрощения математических выкладок и наглядности данных примем допущения, не оказывающие принципиального влияния на получаемые результаты и выводы по ним:

амплитуда принимаемого сигнала $A = 1$ В;

начальные фазы несущего и опорных колебаний равны нулю, т. е. $\varphi_{\text{оп}} = \varphi_{\text{н}} = 0$.

С учетом этих допущений принимаемый сигнал АЛСН будет описываться выражением $s_i(t) = f_j(t)\cos(\omega_{\text{оп}}t + \varphi_{\text{оп}})$, $i = j$.

Далее выполним расчеты значений L_{ij} в соответствии с (1)–(4). В расчетах частота $\omega_{\text{н}}$ несущей принимаемого сигнала АЛСН и частоты опорных колебаний $\omega_{\text{оп}}$ приняты равными 50 Гц, мощность N белого шума принята равной 10^{-2} Вт. Результаты расчетов представлены на рис. 2 в виде диаграммы.

Согласно диаграмме, при приеме сигнала «З_{1,6}» максимальное рассчитанное значение $L_{1j_{\text{max}}}$ соответствует двум опорным сигналам: $f_1(t)$ (сигнал «З_{1,6}») и $f_5(t)$ (сигнал «Ж_{1,86}»). При приеме сигнала $s_3(t)$ (сигнал «КЖ_{1,6}») все шесть значений L_{3j} одинаковы. В целом же при приеме сигналов четырех кодовых комбинаций из шести (сигналы «З_{1,6}», «КЖ_{1,6}», «З_{1,86}», «КЖ_{1,86}») невозможно по рассчитанным значениям функции правдоподобия принять однозначное решение о передаваемой КК. Причина кроется в структуре кодовых сигналов АЛСН, обладающих высокой взаимной корреляцией.

Таким образом, использование «приема в целом» не позволяет однозначно различать сигналы АЛСН даже в условиях идеальной цикловой, частотной и фазовой синхронизации.

Второй случай. В приемнике генерируются копии всех возможных передаваемых сигналов АЛСН, но опорные и несущее колебания различаются по начальной фазе, т. е. $\varphi_{\text{оп}} - \varphi_{\text{н}} \neq 0$.

Для определения чувствительности функции правдоподобия L_{ij} к несовпадению фаз опорных и несущего колебаний выполним расчет в соответствии с выражениями (1)–(4), в которых значение $\varphi_{\text{н}}$ будем изменять в диапазоне от 0 до 350° с шагом 10° , а $\varphi_{\text{оп}} = 0$.

Расчеты показывают, что при любых задаваемых значениях $\varphi_{\text{н}}$ рассчитанные значения L_{ij} равны ранее представленным на рис. 2. Это позволяет сделать вывод, что корреляционный приемник, структурно-функциональная схема которого показана на рис. 1, инвариантен к начальной фазе колебания несущей принимаемого сигнала.

Третий случай. В корреляционном приемнике генерируются копии всех возможных передаваемых сигналов АЛСН с угловой частотой опорных колебаний, отличающейся от угловой частоты несущего колебания принимаемого сигнала, т. е. $\Delta\omega_{\text{оп}} = \omega_{\text{оп}} - \omega_{\text{н}} \neq 0$.

Рассчитаем значения L_{ij} при $\omega_{\text{н}} = 50$ Гц и изменении $\Delta\omega_{\text{оп}}$ от -1 Гц до $+1$ Гц с шагом $0,1$ Гц. Графики полученных зависимостей $L_{ij}(\Delta\omega_{\text{оп}})$ изображены на рис. 3–8.

Графики, представленные на рис. 3–8, показывают высокую зависимость значений L_{ij} от $\Delta\omega_{\text{оп}}$. Так, при величине расстройки $\Delta\omega_{\text{оп}} = 0,4$ Гц значение L_{11} уменьшается в 1,45 раза, а при $\Delta\omega_{\text{оп}} = 0,8$ Гц — уже в 12,44 раза. Из рис. 3–8 также следует, что при величине расстройки $\Delta\omega_{\text{оп}}$ более $0,7$ Гц достоверный прием любого сигнала АЛСН становится невозможным.

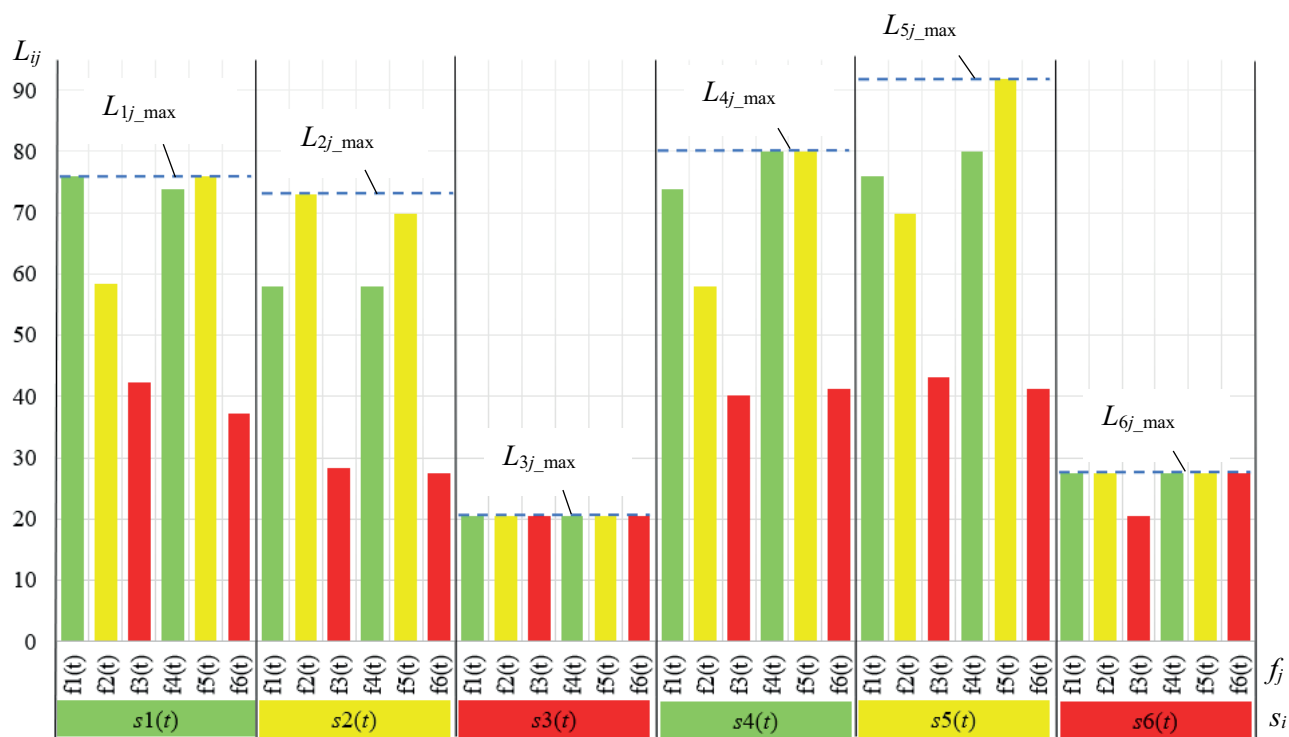


Рис. 2. Диаграмма значений функции правдоподобия L_{ij} при различных сочетаниях принимаемых и опорных сигналов (всего 36 возможных сочетаний)

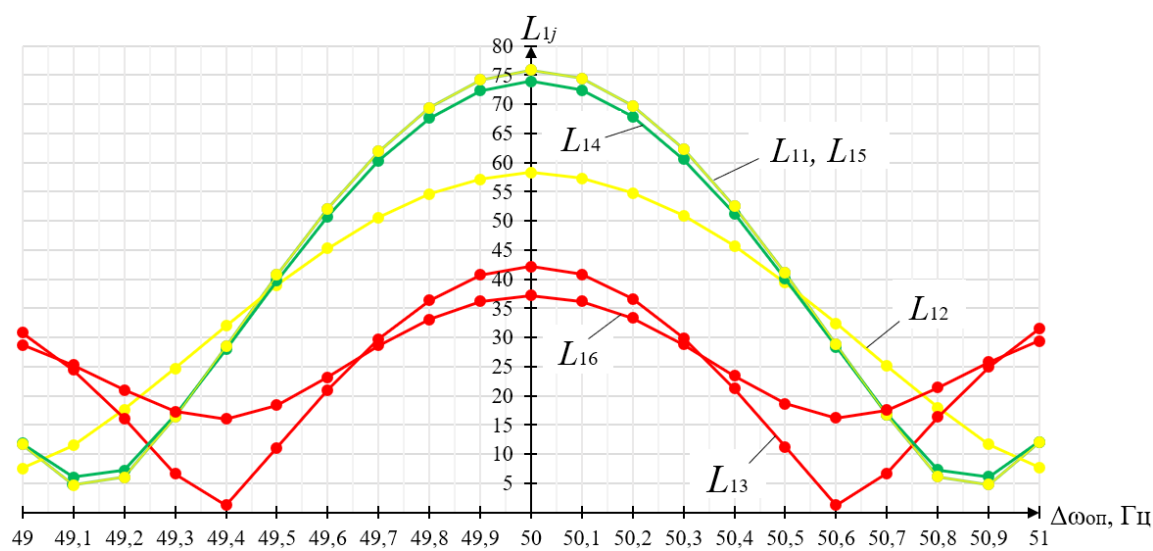


Рис. 3. Графики зависимостей $L_{ij}(\Delta\omega_{оп})$ (при приеме сигнала «3_{1,6}»)

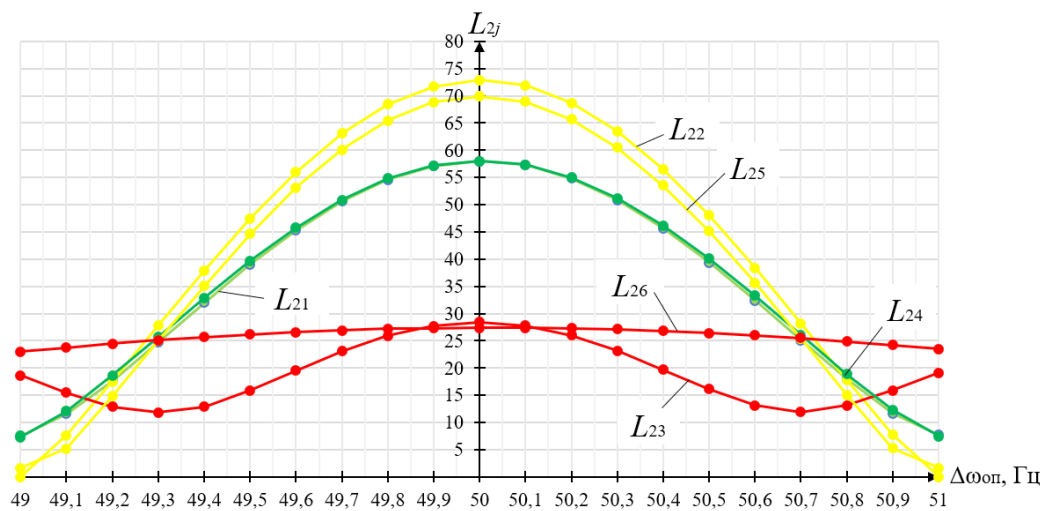


Рис. 4. Графики зависимостей $L_{2j}(\Delta\omega_{оп})$ (при приеме сигнала «Ж_{1,6}»)

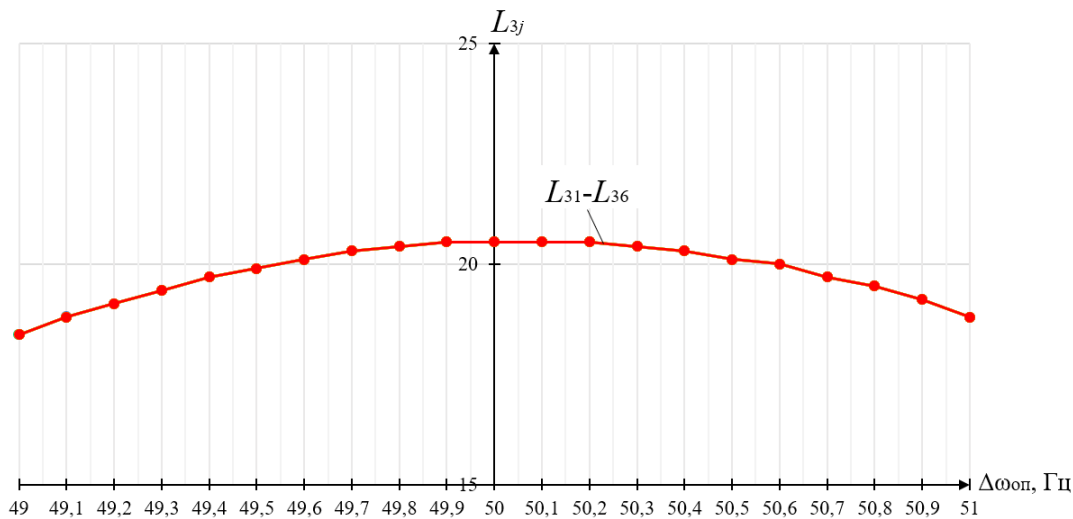


Рис. 5. Графики зависимостей $L_{3j}(\Delta\omega_{оп})$ (при приеме сигнала «КЖ_{1,6}»)

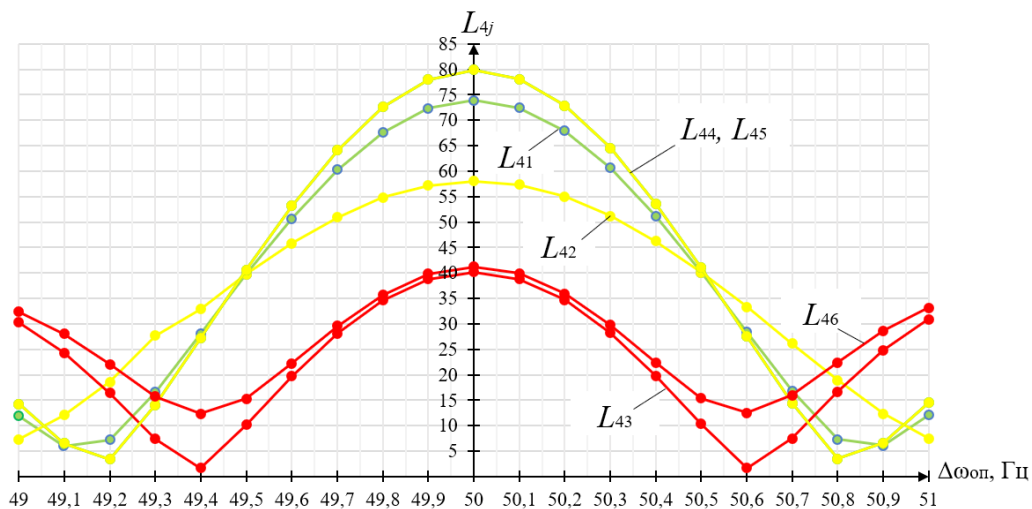


Рис. 6. Графики зависимостей $L_{4j}(\Delta\omega_{оп})$ (при приеме сигнала «3_{1,86}»)

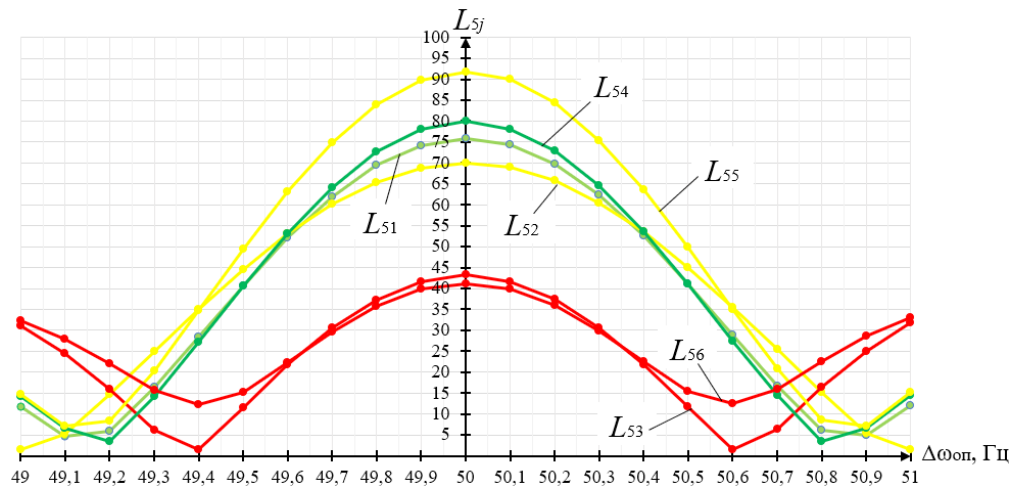


Рис. 7. Графики зависимостей $L_{5j}(\Delta\omega_{оп})$ (при приеме сигнала «Ж_{1,86}»)

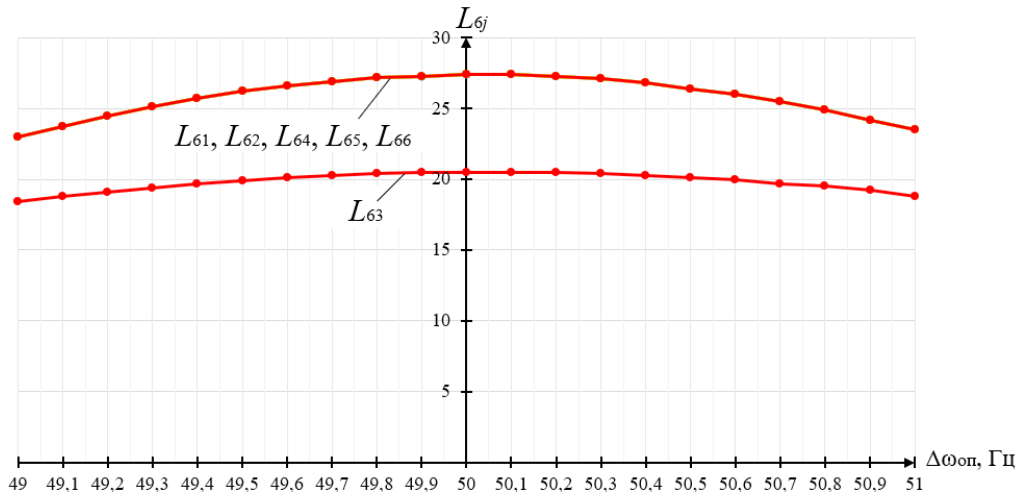


Рис. 8. Графики зависимостей $L_{6j}(\Delta\omega_{оп})$ (при приеме сигнала «КЖ_{1,86}»)

Таким образом, по совокупности трех случаев можно сделать вывод, что рассматриваемый оптимальный корреляционный приемник сигналов АЛСН, осуществляющий «прием в целом», не способен обеспечить однозначное различение всех сигналов АЛСН даже при идеальной цикловой, частотной и фазовой синхронизации и отсутствии помех, а при рассогласовании частот опорных и несущего колебаний более чем на 0,7 Гц (при частоте несущей 50 Гц) становится невозможным достоверный прием любого сигнала АЛСН.

Однако выявленная при рассмотрении второго случая инвариантность функций правдоподобия к начальной фазе колебания несущей принимаемого сигнала позволяет предположить, что применяемый в приемнике коррелятор можно использовать для решения задачи амплитудного детектирования огибающей сигнала АЛСН при его поэлементном приеме. В этом случае, поскольку в канале АЛСН применяется амплитудная манипуляция гармонической несущей, в приемнике

решается задача не различения сигналов, а обнаружения сигнала на фоне помехи.

Таким образом, приемник, представленный на рис. 1, можно упростить за счет отказа от амплитудной манипуляции опорных колебаний, приняв $f_i(t) = 1$. При этом за ненадобностью исключается система цикловой синхронизации, что упрощает схему приемника. Приемник, решающий задачу обнаружения сигнала АЛСН, будет представлять собой приемник с квадратурным амплитудным детектированием и пороговым решающим устройством, как показано на рис. 9.

В схеме, представленной на рис. 9, в квадратурном амплитудном детекторе огибающей принимаемого колебания $\xi(t)$ организуются два квадратурных канала с опорными синусоидальным и косинусоидальным колебаниями частотой $\omega_{оп}$ и начальной фазой $\varphi_{оп}$. По сути, в данном приемнике осуществляется синхронное амплитудное детектирование комплексной огибающей принимаемого сигнала АЛСН с тем отличием от известного синхронного приемника [2], что для обеспечения

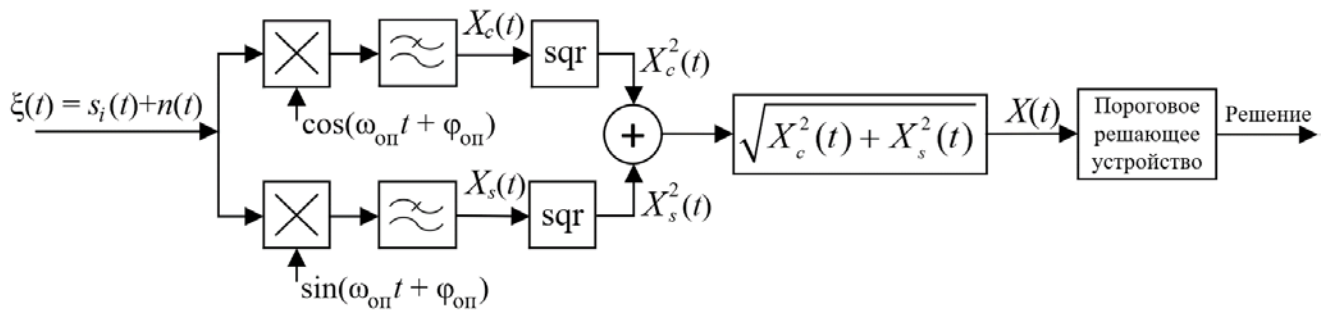


Рис. 9. Структурно-функциональная схема приемника с квадратурным амплитудным детектированием и пороговым решающим устройством

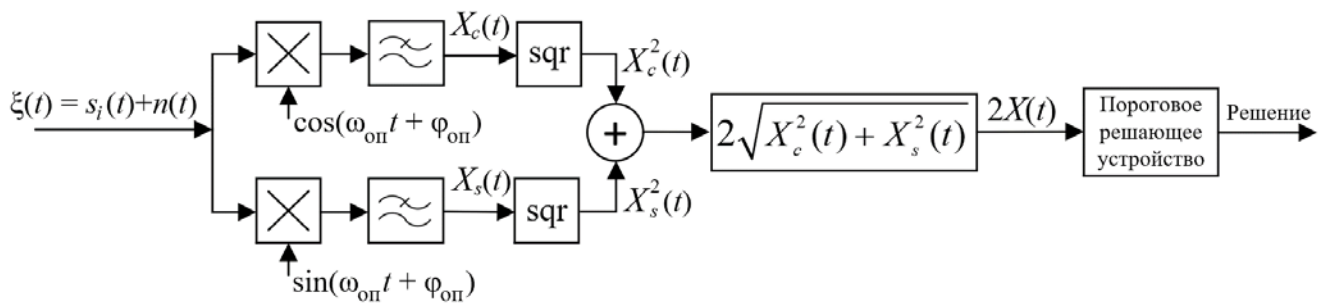


Рис. 10. Структурно-функциональная схема приемника с квадратурным амплитудным детектированием, восстановлением амплитуды огибающей и пороговым решающим устройством

инвариантности результата детектирования к начальной фазе несущего колебания используются два квадратурных канала.

Формируемые на выходе квадратурного амплитудного детектора отсчеты модуля $X(t)$ комплексной огибающей поступают на вход порогового решающего устройства, принимающего решение о наличии или отсутствии сигнала АЛСН.

В данном приемнике вследствие его инвариантности к начальной фазе принимаемого несущего колебания не требуется синхронизация опорных и несущего колебаний с точностью до фазы. Это позволяет также отказаться и от системы фазовой автоподстройки частоты, что дополнительно упрощает схему приемника. Однако несовпадение частот несущего и опорных колебаний будет приводить к «биениям» (с частотой, равной удвоенной частоте несущей) огибающей на выходе квадратурного амплитудного детектора, что может негативно сказаться на помехоустойчивости приемника [3]. Это обстоятельство требует дополнительных исследований о зависимости амплитуды огибающей на выходе квадратурного амплитудного детектора от несинхронности опорных и несущего колебаний.

Другой недостаток квадратурного амплитудного детектирования — уменьшение в 2 раза амплитуды сигнала на выходе детектора по сравнению с амплитудой сигнала на входе, что приводит к снижению чувствительности приемника с квадратурным амплитудным детектированием в 2 раза. Устранить этот недостаток можно, восстановив амплитуду огибающей за счет увеличения в 2 раза модуля комплексной огибающей. В результате структурно-функциональная схема приемника принимает вид, представленный на рис. 10.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты выполненного исследования показали, что приемник, осуществляющий «прием в целом», не обеспечивает однозначное различение всех сигналов АЛСН даже при идеальной цикловой, частотной и фазовой синхронизации и отсутствии помех. Также в ходе исследования выявлена инвариантность функций правдоподобия, определяемых в приемнике, к начальной фазе колебания несущей принимаемого сигнала. Это позволило сделать вывод, что используемый в приемнике коррелятор может применяться для решения задачи амплитудного детектирования огибающей сигнала АЛСН при поэлементном приеме, а следовательно, можно отказаться от системы фазовой автоподстройки частоты и упростить схему приемника.

Представленный приемник с квадратурным амплитудным детектированием, восстановлением амплитуды огибающей и пороговым решающим устройством, осуществляющий поэлементный прием, был предложен авторами в [4]. Процесс функционирования этого приемника в номинальных условиях эксплуатации и при воздействии помех рассмотрен в [5–7]. Выполненные исследования показали эффективность квадратурного амплитудного детектирования огибающей сигнала АЛСН. Впоследствии [8, 9] приемник был дополнен блоками нелинейного преобразования сигнала, что позволило повысить его помехоустойчивость [10–12]. Дальнейшие работы авторов будут направлены на изучение помехоустойчивости приемника на записях реальных сигналов и помех.

Сведения об авторах:

Руслан Рифович Юсупов,

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» Приволжского государственного университета путей сообщения

Алексей Сергеевич Хохрин,

аспирант, преподаватель кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» Приволжского государственного университета путей сообщения

Authors information:

Ruslan R. Yusupov,

PhD in Engineering, Associate Professor, Associate Professor of Automation, Telemechanics and Communication in Railway Transport Department, Volga State Transport University

Alexey S. Khokhrin,

postgraduate student, Lecturer of Automation, Telemechanics and Communication in Railway Transport Department, Volga State Transport University

Литература

1. Тихонов В. И. Оптимальный прием сигналов. Москва : Радио и связь, 1983. 320 с.
2. Аксененко В. Д., Матвеев С. И. Синхронное детектирование методами цифровой обработки сигналов // Навигация и управление движением : материалы докладов IV конференции молодых ученых, Санкт-Петербург, 12–30 марта 2002 г. Санкт-Петербург : ЦНИИ «Электроприбор», 2002. С. 225–229.
3. Поляков В. Эксперименты с синхронным детектированием // Радио. 2001. № 4. С. 20–22. ISSN 0033-765X.
4. Юсупов Р. Р., Хохрин А. С. Корреляционный приемник с квадратурными каналами для автоматической локомотивной сигнализации непрерывного типа АЛСН // Транспорт Урала. 2022. № 3 (74). С. 49–54. DOI: 10.20291/1815-9400-2022-3-49-54.
5. Юсупов Р. Р., Хохрин А. С. Исследование процесса функционирования корреляционного приемника с квадратурными каналами автоматической локомотивной сигнализации непрерывного типа в номинальных условиях эксплуатации // Транспорт Урала. 2023. № 1 (76). С. 51–58. DOI: 10.20291/1815-9400-2023-1-51-58.
6. Юсупов Р. Р., Хохрин А. С., Леушин В. Б. Оценка качества функционирования квадратурного приемника сигналов АЛСН при различных уровнях сигнала // Наука и образование транспорту. 2022. № 1. С. 374–379.
7. Юсупов Р. Р., Хохрин А. С. Исследование качества функционирования квадратурного приемника сигналов АЛСН при воздействии аддитивных импульсных помех // Наука и образование транспорту. 2022. № 1. С. 371–373.
8. Хохрин А. С., Юсупов Р. Р. О применении нелинейной обработки в квадратурном приемнике сигналов АЛСН // Транспорт: наука, техника, управление. 2024. № 4. С. 20–25. DOI: 10.36535/0236-1914-2024-04-4.
9. Юсупов Р. Р., Хохрин А. С., Леушин В. Б. Комбинированный приемник сигналов автоматической локомотивной сигнализации // Наука и образование транспорту. 2021. № 1. С. 325–329.
10. Хохрин А. С., Юсупов Р. Р., Плохов Е. М. Об эффективности корреляционного приема и нелинейной обработки в приемнике сигналов АЛСН // Электротехника. 2023. № 10. С. 50–54.
11. Хохрин А. С., Юсупов Р. Р. Анализ качества функционирования квадратурных приемников с нелинейной обработкой сигналов АЛСН в условиях воздействия флуктуационной помехи // Транспорт Урала. 2024. № 1 (80). С. 73–78. DOI: 10.20291/1815-9400-2024-1-73-78.
12. Юсупов Р. Р., Хохрин А. С. О снижении влияния помех от линий электропередачи на функционирование канала автоматической локомотивной сигнализации непрерывного типа // Вестник ВНИИЖТ. 2024. Т. 83. № 1. С. 70–80. ISSN 2223-9731.

References

1. Tikhonov V. I. Optimal signal reception. Moscow : Radio and communications, 1983. 320 p. (In Russian).
2. Akseenko V. D., Matveev S. I. Synchronous detection by digital signal processing methods. *Navigation and traffic control* : proceedings of the 4th conference of young scientists, St. Petersburg, March 12–30, 2002. St. Petersburg : Electrical Device, 2002. Pp. 225–229. (In Russian).
3. Polyakov V. Experiments with synchronous detection. *Radio*. 2001. No. 4. Pp. 20–22. ISSN 0033-765X. (In Russian).
4. Yusupov R. R., Khokhrin A. S. Correlation receiver with quadrature channels for continuously working automatic cab signaling. *Transport of the Urals*. 2022. No. 3 (74). Pp. 49–54. DOI: 10.20291/1815-9400-2022-3-49-54. (In Russian).
5. Yusupov R. R., Khokhrin A. S. Study of operation of correlation receiver with quadrature continuously working automatic cab signalling channels in nominal conditions of operation. *Transport of the Urals*. 2023. No. 1 (76). Pp. 51–58. DOI: 10.20291/1815-9400-2023-1-51-58. (In Russian).
6. Yusupov R. R., Khokhrin A. S., Leushin V. B. Evaluation the quality for functioning of quadrature receiver of signals of automatic cab signalling at various signal levels. *Science and education for transport*. 2022. No. 1. Pp. 374–379. (In Russian).
7. Yusupov R. R., Khokhrin A. S. Research the quality for functioning of quadrature receiver for signals of automatic cab signalling when exposed to additive pulse interference. *Science and education for transport*. 2022. No. 1. Pp. 371–373. (In Russian).
8. Khokhrin A. S., Yusupov R. R. Application of nonlinear processing in a quadrature receiver of ALSN signals. *Transport: science, equipment, management*. 2024. No. 4. Pp. 20–25. DOI: 10.36535/0236-1914-2024-04-4. (In Russian).
9. Yusupov R. R., Khokhrin A. S., Leushin V. B. Combined receiver for signals of automatic cab signaling. *Science and education for transport*. 2021. No. 1. Pp. 325–329. (In Russian).
10. Khokhrin A. S., Yusupov R. R., Plokhov E. M. On the effectiveness of correlation reception and nonlinear processing in the receiver of CAALS signals. *Russian Electrical Engineering*. 2023. No. 10. Pp. 50–54. (In Russian).
11. Khokhrin A. S., Yusupov R. R. Quality analysis of operating the quadrature receivers with nonlinear processing of CALS signals under the influence of fluctuation interference. *Transport of the Urals*. 2024. No. 1 (80). Pp. 73–78. DOI: 10.20291/1815-9400-2024-1-73-78. (In Russian).
12. Yusupov R. R., Khokhrin A. S. Reducing powerline interference with the continuous automatic cab signalling channel. *Russian Railway Science Journal*. 2024. Vol. 83. No. 1. Pp. 70–80. ISSN 2223-9731. (In Russian).

Научная статья

УДК 656.078

Развитие логистики перевозки грузов контейнерными поездами: новые аспекты, требования, решения

Олег Валерьевич Москвичев¹, Елена Евгеньевна Москвичева¹, Дмитрий Владиславович Васильев¹

¹ Приволжский государственный университет путей сообщения, Самара, Россия

Development of cargo transportation logistics by container trains: new aspects, requirements, solutions

Oleg V. Moskvichev¹, Elena E. Moskvicheva¹, Dmitriy V. Vasilyev¹

¹ Volga State Transport University, Samara, Russia

Аннотация

В статье определены логистические и инфраструктурные ограничения, которые препятствуют эффективной организации перевозок грузов контейнерными поездами. Проведен оценочный анализ существующей практики организации контейнерных поездов с выделением двух групп параметров: организационных и технологических, определяющих соответственно требования к назначению контейнерных поездов и техническому, технологическому обеспечению маршрутов их следования, а также выполнению начально-конечных операций. Рассмотрены основные недостатки действующих организационно-технологических требований к перевозкам груженых и порожних контейнеров в составе контейнерных поездов.

Ключевые слова: транспортно-логистический рынок, контейнерные перевозки, контейнерный поезд, ограничения, организационно-технологические требования

Abstract

The logistical and infrastructural constraints that impede the effective organization of cargo transportation by container trains are outlined. An evaluative analysis of the existing practice of organizing container trains was carried out with the allocation of two groups of parameters: organizational and technological, which determine, respectively, the requirements for the purpose of container trains and technical, technological support for the organization of container train routes, as well as the implementation of initial and final operations. The main disadvantages of the current organizational and technological requirements for the transportation of loaded and empty containers as part of container trains are considered.

Keywords: transport and logistics market, container transportation, container train, restrictions, organizational and technological requirements

DOI: 10.20291/1815-9400-2025-1-60-65

Перевозка продукции с высоким уровнем переделов осуществляется с использованием контейнерных технологий и представляет собой стратегически важную для обеспечения конкурентоспособности национальной экономики сферу транспортной деятельности. Значительная часть контейнеропригодной продукции традиционно перевозится железнодорожным транспортом.

В свою очередь, в настоящее время в сфере грузовых железнодорожных перевозок наиболее востребованным транспортным продуктом является перевозка грузов контейнерными поездами. В многочисленных научных и практических исследованиях (например, в [1–3]) приводятся достоверные и обоснованные выводы, что по сравнению с различными вариантами железнодорожных перевозок контейнеров перевозки контейнерными поездами имеют очевидное маркетинговое преимущество: они не только более быстрые, но и более дешевые, чем другие виды отправок. За счет таких конкурентных преимуществ объемы контейнерных грузоперевозок железнодорожным транспортом интенсивно растут, при этом совокупный среднегодовой темп прироста составляет 8,6 % (табл. 1).

В условиях санкционной политики по отношению к Российской Федерации появились новые аспекты, определившие процессы трансформации логистических цепочек поставок контейнеропригодной продукции. Среди основных факторов, оказавших значительное влияние на объемы, структуру, емкость и пространственную конфигурацию транспортно-логистического рынка, в том числе контейнерных перевозок, можно выделить следующие:

изменение торгового партнерства (снижение доли США, Великобритании, Канады, стран Евросоюза и возрастание доли стран Южной, Восточной, Юго-Восточной Азии, Африки, Центральной и Южной Америки);

массовый уход крупных иностранных транспортно-логистических компаний, в том числе судоходных линий, отказ судовладельцев предоставлять суда для перевозки российских товаров, в том числе исключенных из санкций;

Таблица 1

Динамика контейнерных перевозок по видам сообщения железнодорожным транспортом, тыс. ДФЭ*

Год	Внутренние перевозки	Экспорт	Импорт	Транзит	Итого за год	Среднегодовой темп прироста
2011	1422,9	712,1	562,2	173,6	2870,8	+13 %
2012	1446,6	760,8	622,5	239,0	3068,9	+7 %
2013	1390,2	809,1	692,9	237,6	3129,8	+2 %
2014	1500,3	849,7	621,0	252,1	3223,1	+3 %
2015	1499,1	744,1	507,2	217,7	2968,1	-8 %
2016	1678,2	803,2	528,8	259,3	3269,5	+10 %
2017	1807,1	962,1	703,8	414,4	3887,3	+19 %
2018	1901,6	1130,2	855,9	553,0	4440,7	+14 %
2019	2079,3	1260,3	1060,4	581,9	5001,9	+13 %
2020	2320,4	1453,0	1225,5	800,6	5799,4	+16 %
2021	2467,9	1566,4	1392,3	1076,0	6502,5	+12 %
2022	2545,5	1504,8	1625,2	845,6	6521,1	+0,2 %
2023	3006,4	1660,3	1928,2	843,7	7438,6	+14 %

* По материалам 41-го заседания открытого межвузовского научно-практического семинара «Экономика железнодорожного транспорта», Москва, НИУ ВШЭ, 22.10.2024 г.

ограничения/запрет на заход в иностранные порты судов под российским флагом или судов, принадлежащих российским лицам;

ограничения/запрет на заход в иностранные порты судов, у которых предыдущий порт захода был российским или последующий порт захода будет российским;

отказ международных страховых компаний страховать/перестраховывать суда, перевозящие российские товары;

внешние запреты на группы товаров в части импорта и экспорта;

ограничения для российского наземного транспорта в странах Европы.

Для оценочного анализа существующей практики организации контейнерных поездов необходимо также обозначить основные текущие ограничения в логистике перевозки грузов контейнерными поездами.

1. Усиление дефицита пропускных возможностей железнодорожной инфраструктуры Восточного полигона. Сокращение объемов контейнерооборота через порты Северо-Западного бассейна, переориентация экспортных контейнеропотоков на восточное направление привели к росту загрузки железнодорожной инфраструктуры Восточного полигона. Из-за недостаточной пропускной способно-

сти железнодорожной инфраструктуры на подходах к портам Дальнего Востока возросло количество «брошенных поездов», что приводит к срывам сроков доставки груза железнодорожным перевозчиком, увеличению времени оборота специализированных фитинговых платформ и контейнеров, нарушениям сроков и норм единовременного хранения груза в порту, простоям судов в ожидании погрузки и к демереджу.

2. Ограниченная пропускная способность железнодорожных пограничных переходов. Снижение экспортных контейнеропотоков провоцирует скопление импорта на сухопутных погранпереходах и в портах Дальнего Востока. Оцениваемый дефицит пропускных способностей железнодорожных пограничных переходов (Забайкальск, Наушки, Гродеково, Камышовая) составляет около 2,6 млн т/мес. (или около 1/3 от потребностей) [4]. Возникающие заторы на железнодорожных пограничных переходах приводят к сокращению согласования наряд-заказов на перевозки контейнеров в направлении Забайкальской и Дальневосточной железных дорог.

3. Повышенная загрузка терминальных и портовых мощностей Дальнего Востока. Значительный рост объемов перевалки контейнеров в Дальневосточном бассей-

не за счет снижения контейнерооборота в других российских бассейнах (на том же уровне остались лишь доли Каспийского и Арктического бассейнов) привели к загрузке терминальной и портовой инфраструктуры на 90 % и более. В связи с тем что с российского рынка морских линейных контейнерных перевозок ушли крупнейшие транснациональные контейнерные операторы, эксплуатирующие суда нового поколения вместимостью до 13 тыс. контейнеров ДФЭ и выше, и увеличилось число используемых судозаходов контейнеровозов меньшей вместимости, среднее время постановки судна и ожидания его обработки выросло. Кроме того, в течение последних 30 лет развитие инфраструктуры российских портов Дальнего Востока было нацелено преимущественно на перевалку угля. Наблюдается острый дефицит мощностей для перевалки генеральных (тарно-штучных) грузов, насыпных грузов, предполагающих наличие специального оборудования.

Существующая практика организации контейнерных поездов (КП) как вида маршрутной перевозки грузов предусматривает соблюдение установленных на сети российских железных дорог организационно-технологических требований (табл. 2). Данные требования регламентированы Правилами перевозок железнодорожным транспортом грузов в контейнерах и порожних контейнеров (утверждены Приказом Минтранса России от 18 декабря 2019 г. № 405), а также Порядком организации груженых и порожних контейнеров в составе контейнерных поездов (утверждены распоряжением ОАО «РЖД» от 2 октября 2020 г. № 2191/р). При этом, согласно действующим нормативным документам, организация продвижения вагонов с контейнерами обеспечивается исходя из экономической целесообразности для холдинга ОАО «РЖД», из технических и технологических возможностей инфраструктуры для организации движения поездов и маневровых передвижений, из плана формирования грузовых поездов.

Выполним оценочный анализ представленных требований к контейнерным поездам.

Согласно табл. 2, организационно-технологические параметры контейнерных поездов можно разбить на две группы:

Таблица 2

Организационно-технологические требования к контейнерным поездам, установленные на сети российских железных дорог

№ п/п	Организационно-технологические параметры	Организационно-технологические требования
1	Формирование КП	На железнодорожных путях необщего пользования организатора КП или на станции отправления силами перевозчика
2	Уборка вагонов на станцию отправления для формирования КП	За ограниченное время и ограниченным числом подач
3	Весовая норма и длина поезда	Не более чем 3,4 тыс. т; 71 условный вагон или 57 вагонов
4	Пропуск КП по сети железных дорог	На основании плана формирования поездов или отдельной телеграммы ОАО «РЖД» по установленному расписанию (нитке графика)
5	Скорость движения КП	Выше, чем скорость при отправке груза «большой скоростью». Приоритетность пропуска КП на уровне пассажирских поездов
6	Срок доставки грузов, перевозимых в КП	Определяется не по Правилам исчисления сроков доставки грузов, а по графику движения КП

1) организационные, определяющие требования к назначению КП;

2) технологические, определяющие требования к техническому и технологическому обеспечению организации маршрута следования КП и выполнения начально-конечных операций.

Очевидно, что доминирующими факторами успешного продвижения КП на рынке транспортно-логистических услуг являются относительно высокая маршрутная скорость по большинству осуществляемых перевозок, прежде всего за счет приоритетности пропуска КП на уровне пассажирских и проследования без переработки попутных технических станций, а также своевременность доставки грузов, которая обеспечивается созданием расписания движения КП по выделенным «жестким ниткам» графика.

Основным организационным параметром является длина КП. Необходимо отметить, что строгое соблюдение унифицированной длины КП не всегда удовлетворяет клиентоориентированным принципам транспортного обслуживания. Одним из главных требований товаровладельцев остается минимизация издержек во всех элементах логистической цепочки поставок. При этом расходы грузоотправителей или организатора КП стремятся к минимуму только в случае своевременной отправки контейнеропригодной продукции, которая не всег-

да выполняется из-за длительных периодов консолидации контейнерных грузов или накопления контейнеров до установленных длин КП на сети РЖД (как правило, в 71 условный вагон).

Кроме того, на направлениях с малоинтенсивным контейнеропотоком строгое соблюдение длины КП требует от организатора контейнерного поезда снижать частоту его отправления. Для товаровладельцев это чревато повышением эксплуатационных расходов, связанных с хранением материальных запасов, резервированием транспортных мощностей и др., а для железнодорожного перевозчика — снижением прибыли, так как товаровладельцы контейнеропригодной продукции выбирают для перевозок другие виды транспорта.

На направлениях с высокой интенсивностью контейнеропотоков в условиях дефицита пропускных способностей железнодорожной инфраструктуры возникает необходимость увеличения длины КП до 114–140 условных вагонов.

С другой стороны, при установлении длины КП дирекцией управления движением (при следовании КП в пределах одной железной дороги) или Центральной дирекцией управления движением (при следовании КП в пределах двух и более железных дорог) учитываются только отраслевые требования о соблюдении унифицированной нормы длины соста-

вов грузовых поездов на сети железных дорог, которая должна соответствовать длине приемо-отправочных путей станций, выполняющих технические операции на направлении (71 условный вагон соответствует длине приемо-отправочных путей 1050 м). Для КП во избежание перелома их длины на некоторых направлениях (например, при экспортно-импортных перевозках контейнерных грузов со странами СНГ) принято ограничивать число условных вагонов до 57, что соответствует вместимости лимитирующих приемо-отправочных путей, полезная длина которых составляет 850 м.

Невозможность организации КП не унифицированной длины или применения дифференцированных длин КП в диапазоне от 57 до 71 условного вагона обусловлена дефицитом железнодорожных пропускных мощностей. В 2018 г. в АО «ВНИИЖТ» было выполнено исследование «Разработка методологии определения комплексной эффективности контейнерных поездов», в котором дана оценка целесообразности организации контейнерных поездов в зависимости от числа вагонов и контейнеров в составе поезда. По результатам данного исследования было установлено, что рентабельность контейнерного поезда обеспечивается при длине поезда в 71 условный вагон и полной его загрузке.

В свою очередь, Центром стратегических разработок совместно с Центром экономики инфраструктуры и Евразийским союзом участников железнодорожных грузовых перевозок (ЕСП) для условий дефицита пропускных возможностей железнодорожной инфраструктуры был выполнен комплексный анализ вклада в экономику государства от перевозки разных грузов [5]. Согласно исследованию, наибольший вклад в ВВП России вносит экспорт таких контейнерных грузов, как металлы и металлопродукт, продукция химической промышленности, пластмассы, каучук, продукция агропромышленного комплекса, а вагонные отправки нефтепродуктов, черной руды и угля вносят меньший вклад в экономику страны. Прежде всего это связано с тем, что в контейнерах перевозится высокотехнологичная продукция с высокой удельной стоимостью.

Доказано, что платформа с контейнерами обеспечивает в 3 раза больший вклад в ВВП России, чем сопоставимый вагон с углем, и в 1,5 раза больше, чем средневзвешенный железнодорожный груз [5]. С учетом эффектов на смежные отрасли платформа с контейнерами генерирует в 5 раз больше вклада в ВВП России, чем вагон с углем, и почти в 2 раза больше средневзвешенного железнодорожного груза.

Публикации, посвященные повышению экономической эффективности перевозок и качества транспортного обслуживания, позволяют выделить объективные параметры, влияющие на установление целесообразных длин составов КП для всех участников производства и потребления данной услуги [6–13]. Так, в исследовании [13] определено, что повышение качества транспортного обслуживания как инструмент стимулирования спроса на перевозки является вдвое более результативным, чем ценовые методы. Получение значения неценовой эластичности позволяет прогнозировать изменение спроса и доходов от перевозок, что принципиально меняет методику оценки экономической целесообразности организации контейнерного поезда на направлении.

На основании вышеизложенного, по нашему мнению, отраслевой методический подход установления целесообразных организационных требований к назначению КП необходимо уточнить с учетом таких логистических принципов, как:

устойчивость транспортно-логистических цепочек поставок контейнерных грузов при оказании транспортно-логистической услуги с параметрами высокого уровня транспортного обслуживания (высокая скорость доставки, регулярность и ритмичность перевозки с большой частотой, высокая точность исполнения заявленных сроков доставки, свободный доступ к продаже услуг на линейном сервисе);

увеличение рыночной стоимости транспортно-логистической услуги при повышении параметров качества за счет минимизации вмененных издержек товарладельца и грузовладельца;

снижение затрат в транспортно-логистической цепочке за счет повыше-

ния качественных показателей работы транспорта.

Моделирование определения целесообразных длин составов КП рассматривалось авторами в работах [6, 8, 9, 14]. При этом учитывалось взаимное влияние показателей объемов контейнерных перевозок, стоимости транспортной услуги и ее качественных параметров на технологические возможности перевозчика по формированию транспортно-логистической услуги.

Технологические параметры (количество подач вагонов на пути терминала; количество уборок вагонов с терминала на пути станции; время формирования КП; время расформирования КП, прибывшего на железнодорожную станцию погрузки, выгрузки; скорость движения КП и др.) зависят от технической и технологической обеспеченности инфраструктуры контейнерных перевозок.

Известно, что повышенная скорость доставки грузов КП достигается маршрутной скоростью, которая, например, для ускоренных КП (1200–1500 км/сут) соответствует параметрам скорого пассажирского поезда. При этом положительная динамика роста маршрутной скорости движения КП на сети российских железных дорог обеспечивается в основном за счет увеличения технической скорости. Чтобы повысить технические скорости, железнодорожный перевозчик увеличивает расходы топливно-энергетических ресурсов на тягу поездов, расходы на техническое обслуживание объектов инфраструктуры и пр.

Такие технологические параметры, как время формирования КП, время расформирования КП, имеют прямую зависимость от технических и технологических условий выполнения начально-конечных операций на станциях отправления и назначения КП. Количество подач вагонов на пути терминала, количество уборок вагонов с терминала на пути станции зависят от структурно-планировочных решений контейнерного терминала и технологий станционного и терминального обслуживания. В целом уровень развития инфраструктуры контейнерных перевозок является сдерживающим фактором в обеспечении технологических требований, предъявляемых к КП. Существующие технологические ограничения

инфраструктуры приводят к завышенным технологическим и межоперационным простоям вагонов и контейнеров на станциях и контейнерных терминалах и, как следствие, к увеличению времени доставки контейнерных грузов.

Чтобы обеспечить реализацию таких технологических требований, как ускоренное выполнение начально-конечных операций и операций терминального обслуживания, предлагается дополнить транспортно-технологические системы регулярного контейнерного сообщения контейнерными терминалами или контейнерными площадками сквозного типа с последовательным и параллельным расположением к основному парку железнодорожной станции примыкания [15, 16].

Ключевая отличительная особенность этих типов контейнерных терминалов должна заключаться в соблюдении таких структурно-планировочных решений и технологических принципов, как:

последовательное или параллельное расположение контейнерного терминала к основному путевому развитию (паркам) станции с возможностью сквозного приема и отправления контейнерных поездов;

наличие путевого развития контейнерного терминала полезной длиной, соответствующей унифицированной длине контейнерных поездов, с возможностью их обработки без дополнительного переформирования на группы;

проведение графикового терминального обслуживания контейнерных поездов, включая сортировку контейнеров по назначениям с помощью погрузочно-разгрузочных механизмов.

В целом для дальнейшего эффективного развития логистики перевозки грузов контейнерными поездами необходимо реализовать такие системные организационные и технико-технологические решения:

увеличение внутренних и экспортных отправок контейнерных поездов за счет формирования и применения клиентоориентированных организационных требований к назначению КП;

совершенствование механизмов согласования заявок ГУ-12 на перевозку контейнеров, утверждение наряд-заказов, обеспечивающих ликвидацию перезаявок, применение приоритизации контейнерных перевозок;

диверсификация маршрутов и развитие новых клиентоориентированных контейнерных сервисов, в том числе перевозок массовых грузов в специализированных контейнерах;

развитие альтернативных способов перевозки железнодорожным транспортом (вывоза) с портов Дальнего Востока

импортных контейнеропотоков (погрузка импортных контейнеров в полувагоны); внедрение цифровых технологий и автоматизации производственных процессов с контейнерами;

развитие транспортно-логистической инфраструктуры, в том числе контейнерных терминалов сквозного типа с по-

следовательным и параллельным расположением к основным паркам железнодорожных станций примыкания, обеспечивающих реализацию технологических требований к контейнерным поездкам (ускоренное выполнение начально-конечных операций и терминального обслуживания).

Сведения об авторах:

Олег Валерьевич Москвичев,

доктор технических наук, директор Института управления и экономики, заведующий кафедрой «Управление эксплуатационной работой» Приволжского государственного университета путей сообщения

Елена Евгеньевна Москвичева,

кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии грузовой и коммерческой работы, станции и узлы» Приволжского государственного университета путей сообщения

Дмитрий Владиславович Васильев,

кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление эксплуатационной работой» Приволжского государственного университета путей сообщения

Authors information:

Oleg V. Moskvichev,

DSc in Engineering, Director of Institute of Management and Economics, Head of Operations Management Department, Volga State Transport University

Elena E. Moskvicheva,

PhD in Engineering, Associate Professor of Freight and Commercial Technologies Department, Volga State Transport University

Dmitriy V. Vasilyev,

PhD in Engineering, Associate Professor of Operations Management Department, Volga State Transport University

Литература

1. Грошев Г. М., Климова Н. В., Васильева Т. В. Оценка эффективности организации контейнерных блок-поездов на станции примыкания транспортно-логистического терминала // Экономика железных дорог. 2013. Т. 5. С. 60–67. ISSN 1727-6500.
2. Давыдов Г. Е. Разработка нормативно-правовых условий развития конкуренции на рынке грузовых железнодорожных перевозок в сегменте регулярного грузового движения : выступление на заседании Экспертного совета ФАС по железнодорожному транспорту. Москва : Национальная ассоциация транспортных, 2015. 14 с.
3. Лукашева И. В. Экономическая эффективность организации регулярного международного контейнерного сообщения : диссертация на соискание ученой степени кандидата экономических наук. Москва, 2008. 176 с.
4. Гераскин В. Логистические вопросы работы на внешних рынках в современных условиях : материалы XVI Международного форума и выставки «Транспортная неделя 2022», Москва, 15–17 ноября 2022 г. Москва, 2022. 15 с.
5. Онищенко В. Контейнерная логистика. Влияние на экономику Российской Федерации : материалы XVI Международного форума и выставки «Транспортная неделя 2022», Москва, 15–17 ноября 2022 г. Москва, 2022. 5 с.
6. Повышение эффективности транспортно-технологических систем регулярного контейнерного сообщения / О. В. Москвичев, Е. Е. Москвичева, Д. В. Васильев, Ю. С. Никонов. Самара : Изд-во СамГУПС, 2023. 130 с.
7. Покровская О. Д. Особенности продвижения блок-трейн и контейнерных поездов по терминальной сети Санкт-Петербургского узла // Известия ПГУПС. 2021. Т. 18. № 1. С. 34–51. DOI: 10.20295/1815-588X-2021-1-34-51.

References

1. Groshev G. M., Klimova N. V., Vasilyeva T. V. Evaluation of effectiveness for organization of container block trains at station adjacent to transport and logistics terminal. *Railway Economy*. 2013. Vol. 5. Pp. 60–67. ISSN 1727-6500. (In Russian).
2. Davydov G. E. Elaboration of regulatory and legal conditions for the development of competition in the freight rail transportation market in the segment of regular freight traffic : presentation at the meeting of the FAS Expert Council on Railway Transport. Moscow : National Transport Association, 2015. 14 p. (In Russian).
3. Lukasheva I. V. Economic efficiency of the organization of regular international container traffic : PhD in Economics Thesis. Moscow, 2008. 176 p. (In Russian).
4. Geraskin V. Logistical issues of working in foreign markets in modern conditions. *Proceedings of the 16th International Forum and Exhibition «Transport Week 2022»*, Moscow, November 15–17, 2022. Moscow, 2022. 15 p. (In Russian).
5. Onischenko V. Container logistics. Impact on the economy of the Russian Federation. *Proceedings of the 16th International Forum and Exhibition «Transport Week 2022»*, Moscow, November 15–17, 2022. Moscow, 2022. 5 p. (In Russian).
6. Moskvichev O. V., Moskvicheva E. E., Vasilyev D. V., Nikonov Yu. S. Improving the efficiency of transport and technological systems of regular container traffic. Samara : Publishing House of SSTU, 2023. 130 p. (In Russian).
7. Pokrovskaya O. D. Special features of block trains and container trains promotion in the terminal network of the Saint Petersburg hub. *Proceedings of Petersburg Transport University*. 2021. Vol. 18. No. 1. Pp. 34–51. DOI: 10.20295/1815-588X-2021-1-34-51. (In Russian).

8. Москвичев О. В., Васильев Д. В. Экономико-математическая модель установления организационно-технологических требований к организации маршрутных контейнерных перевозок // Академик Владимир Николаевич Образцов — основоположник транспортной науки : труды международной научно-практической конференции, посвященной 125-летию университета, Москва, 22 октября 2021 г. Москва : Изд-во РУТ (МИИТ), 2021. С. 509–520. DOI: 10.47581/2022/Obrazcov.68.
9. Москвичев О.В., Москвичева Е. Е., Васильев Д. В. Об оптимизации длины контейнерных поездов // Железнодорожный транспорт. 2022. Т. 4. С. 24–28. ISSN 0044-4448.
10. Басыров И. М., Биленко Г. М., Басыров М. А. Укороченные контейнерные блок-поезда в мультимодальных перевозках // Бюллетень транспортной информации. 2020. Т. 1. С. 4–9. ISSN 2072-8115.
11. Кочнева Д. И. Повышение эффективности функционирования региональной контейнерной транспортно-логистической системы : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Екатеринбург, 2012. 173 с.
12. Осинцев Н. А., Рахмангулов А. Н. Устойчивое развитие логистических цепей грузопотоков. Москва : ИНФРА-М, 2025. 303 с.
13. Соколов Ю. Экономическая оценка взаимосвязи уровня качества транспортного обслуживания и спроса на грузовые перевозки : материалы XVI Международного форума и выставки «Транспортная неделя 2022», Москва, 15–17 ноября 2022 г. Москва, 2022. 11 с.
14. Moskvichev O., Moskvicheva E., Vasilyev D. Economically Feasible Requirements for the Appointment of Container Trains // AFE. 2023. Pp. 469–477. DOI : 10.1007/978-3-031-36960-5_53.
15. Moskvichev O., Moskvicheva E., Vasilyev D. Solutions for transport and technological systems of regular container transportation // E3S Web of Conferences. 2024. Vol. 549. 06001. DOI: 10.1051/e3sconf/202454906001.
16. Москвичев О. В., Москвичева Е. Е. Повышение эффективности перевозки грузов в составе контейнерных поездов на основе терминальной инфраструктуры нового типа // Транспорт: наука, техника, управление. 2024. Т. 4. С. 13–19. DOI: 10.36535/0236-1914-2024-04-3.
8. Moskvichev O. V., Vasilyev D. V. Economic and mathematical model for establishing organizational and technological requirements for organization of route container transportation. *Academician Vladimir Nikolaevich Obraztsov — the founder of transport science : proceedings of the International scientific and practical conference, dedicated to the 125th anniversary of RUT (MIIT), Moscow, October 22, 2021.* Moscow : Publishing House of RUT (MIIT), 2021. Pp. 509–520. DOI: 10.47581/2022/Obrazcov.68. (In Russian).
9. Moskvichev O., Moskvicheva E., Vasilyev D. On optimizing the length of container trains. *Railway Transport*. 2022. Vol. 4. Pp. 24–28. ISSN 0044-4448. (In Russian).
10. Basyrov I. M., Bilenko G. M., Basyrov M. A. Shortened container block trains in multimodal transport. *Bulletin of scientific research results*. 2020. Vol. 1. Pp. 4–9. ISSN 2072-8115. (In Russian).
11. Kochneva D. I. Improving the efficiency of the regional container transport and logistics system : PhD in Engineering Thesis. Ekaterinburg, 2012. 173 p. (In Russian).
12. Osintsev N. A., Rakhmangulov A. N. Sustainable development of logistics chains of cargo flows. Moscow : INFRA-M, 2025. 303 p. (In Russian).
13. Sokolov Yu. Economic assessment of the relationship between the level of quality of transport services and the demand for freight transportation. *Proceedings of the 16th International Forum and Exhibition «Transport Week 2022»*, Moscow, November 15–17, 2022. Moscow, 2022. 11 p. (In Russian).
14. Moskvichev O., Moskvicheva E., Vasilyev D. Economically Feasible Requirements for the Appointment of Container Trains. *AFE*. 2023. Pp. 469–477. DOI : 10.1007/978-3-031-36960-5_53.
15. Moskvichev O., Moskvicheva E., Vasilyev D. Solutions for transport and technological systems of regular container transportation. *E3S Web of Conferences*. 2024. Vol. 549. 06001. DOI: 10.1051/e3sconf/202454906001.
16. Moskvichev O. V., Moskvicheva E. E. Improved efficiency of transportation of goods as a part of container trains based on the new type of terminal infrastructure. *Transport: science, equipment, management*. 2024. Vol. 4. Pp. 13–19. DOI: 10.36535/0236-1914-2024-04-3. (In Russian).

Объем статьи 0,73 авторских листа

Научная статья

УДК 656.073

Формирование оптимальных логистических цепей в системе терминальных контейнерных перевозок

Дарья Ивановна Кочнева¹, Анна Викторовна Сметанина¹

¹ Уральский государственный университет путей сообщения, Екатеринбург, Россия

Formation of optimal logistics chains in terminal container transportation system

Darya I. Kochneva¹, Anna V. Smetanina¹

¹ Ural State University of Railway Transport, Ekaterinburg, Russia

Аннотация

В статье рассматриваются математическая модель и алгоритм оптимизации логистических цепей в терминальной сети контейнерных перевозок. Цель представленного математического аппарата — определить оптимальный план распределения контейнеропотока на терминальной сети по критерию общих затрат на доставку. Исходными данными для построения модели служит информация о спросе на поставки грузов в контейнерах, размещении звеньев цепи, ограничении перерабатывающей способности терминалов.

Модель представляет собой четырехиндексную транспортную задачу линейного программирования. Для поиска оптимального решения применяется подход сведения многоиндексных моделей к двухиндексным путем преобразования исходных матриц. Алгоритм преобразования матриц и поиска решения реализован на языке программирования Python с использованием функций библиотеки NumPy.

В развитии предложенная модель позволит определять оптимальную конфигурацию терминальной сети региона, распределять контейнеропоток между транспортными коридорами в условиях ограниченности инфраструктуры, находить оптимальные маршруты контейнерных поездов на существующей терминальной сети.

Ключевые слова: контейнерные перевозки, контейнерный терминал, терминальная сеть, логистическая цепь, транспортная задача, Python

Abstract

Article presents a mathematical model and an algorithm for optimizing logistics chains in terminal container transportation network.

The purpose of presented mathematical apparatus is to determine the optimal plan for distribution of container shipments across terminal network based on criterion of total shipping costs. Initial data for building the model is information about demand for transportation of goods in containers, location of supply chain links and limited capacity of terminals.

The presented model is a linear programming transport problem with four indexes. To find the optimal solution, approach of reducing multi-index models to two-index models is used by transforming initial matrices. Matrix transformation and solution search algorithm is implemented in Python programming language using the functions of NumPy library.

During development process, proposed model will make it possible to determine the optimal configuration of terminal network in region, distribute container shipments between transport corridors in conditions of limited infrastructure, and find optimal container train routes on existing terminal network.

Keywords: container transportation, container terminal, terminal network, logistics chain, transport task, Python

DOI: 10.20291/1815-9400-2025-1-66-71

Устойчивая тенденция рынка транспортных услуг России — развитие железнодорожных контейнерных перевозок, объем которых за последние 10 лет вырос в 2,5 раза. Конкурентное преимущество контейнера — интермодальность, т. е. возможность смены подвижного состава без перевалки самого груза. Поэтому ключевым элементом контейнерной транспортной системы является терминал как пункт стыковки разных видов транспорта.

Современная терминальная сеть представлена множеством перегрузочных мощностей разных собственников, развиваются сервисы перевозки контейнеров в ускоренных поездах, осваиваются новые маршруты. В этих условиях появляется возможность формировать альтернативные варианты транспортно-логистических цепей доставки контейнера с опорой на существующую терминальную сеть.

Проблемам организации терминальных сетей посвящены труды А. С. Балалаева, А. Г. Кирилловой, Р. Г. Короля, Д. И. Кочневой, А. Л. Кузнецова, И. Ю. Мамонтова, О. В. Москвичева, О. Д. Покровской и многих других российских исследователей. В частности, задачи моделирования и организации работы отдельных контейнерных терминалов решаются в работах [1–4]. В [5–8] рассматриваются проблемы размещения контейнерной инфраструктуры в регионе. Исследования [9, 10] посвящены определению оптимальных пространственно-количественных и транспортных параметров сети. В [11, 12] предложен интегрированный подход к формированию и организации терминальных систем, основанный на координации распределения контейнеропотока. В качестве критерия оптимальности движения потока здесь рассматривается совокупный

эффект контейнерной системы региона в целом, а не частная выгода отдельных звеньев, входящих в ее состав.

Настоящее исследование базируется на идеях, изложенных в статье [11], и направлено на разработку математической модели и алгоритма формирования оптимальных логистических цепей контейнерных перевозок в условиях множества альтернативных вариантов движения контейнеропотока.

Представим математическую модель формирования альтернативных логистических цепей при трехэтапной перевозке:

- 1) завоз контейнера на терминал;
- 2) межтерминальная перевозка контейнера;
- 3) доставка контейнера с терминала получателю.

Введем обозначения.

Пусть имеется множество i -х клиентов, желающих отправить груз в контейнерах множеству j -х потребителей. Контейнеропоток может быть переработан множеством k -х контейнерных терминалов отправления и множеством q -х терминалов прибытия.

Таким образом, формируется сеть из возможных вариантов логистической цепи с последовательностью звеньев $i - k - q - j$ (рис. 1).

Общее число вариантов движения контейнеропотока через терминальную сеть составит $N \cdot K \cdot Q \cdot M$, где N и M — общее число пунктов отправления и прибытия контейнеропотока, K — общее число терминалов в регионе отправления контейнеропотока, Q — общее число терминалов в регионе прибытия контейнеропотока,

В качестве исходных данных в модели зададим следующие величины:

L_{ij} — спрос на перевозку контейнеров между i и j за плановый период времени, задан матрицей размера $N \times M$;

G_k и G_q — максимально возможный объем переработки контейнеров терминалом по отправлению и терминалом по прибытию соответственно;

C_{ik} — стоимость подвоза одного контейнера из i -го пункта на k -й терминал, задана матрицей размера $N \times K$, где C_{kq} — стоимость межтерминальной перевозки одного контейнера между k и q , задана матрицей размера $K \times Q$;

C_{qj} — стоимость вывоза одного контейнера с q -го терминала j -му получателю, задана матрицей размера $Q \times M$.

Тогда стоимость доставки контейнера из пункта i в пункт j через контейнерные терминалы k и q представляет собой общую сумму затрат C_{ikqj} :

$$C_{ikqj} = C_{ik} + C_{kq} + C_{qj}. \quad (1)$$

Введем переменную x_{ijkq} — величину контейнеропотока, которая пройдет из i -го пункта в j -й через контейнерные терминалы k и q .

Задача поиска оптимальных цепей доставки контейнеров состоит в поиске таких x_{ikqj} при которых суммарные затраты C_{ikqj} принимают минимальное значение, т. е. целевая функция задачи имеет вид

$$F(x) = \sum_i \sum_j \sum_k \sum_q x_{ikqj} C_{ikqj} \rightarrow \min, \quad (2)$$

где:

$$\sum_k \sum_q x_{ikqj} = L_{ij}, \quad \forall i, j; \quad (3)$$

$$x_{ikqj} \in \{Z\}; \quad (4)$$

$$x_{ikqj} \geq 0. \quad (5)$$

Условие (3) гарантирует, что контейнеры L_{ij} будут доставлены из пункта i в пункт j вне зависимости от выбранной

цепи доставки. Условия (4), (5) задают ограничение на целочисленность и неотрицательность переменных x_{ikqj} .

Также наложим ограничения на перерабатывающую способность терминалов:

$$\sum_i \sum_j \sum_q x_{ikqj} \leq G_k, \quad \forall i, j, q; \quad (6)$$

$$\sum_i \sum_j \sum_k x_{ikqj} \leq G_q, \quad \forall i, j, k. \quad (7)$$

Под перерабатывающей способностью терминалов будем понимать максимально возможный объем переработки контейнеров за заданный плановый период времени, эквивалентный периоду формирования спроса на поставки L_{ij} .

Сформированная модель относится к классу транспортных задач линейного программирования, однако в отличие от классической постановки имеет следующие модификации.

Во-первых, в данной задаче речь идет о неоднородном грузе, т. е. определенный контейнерный груз i -го отправителя должен поступить конкретному j -му получателю [выполнение условия (3)], а спрос на поставки задан не вектором, а матрицей L_{ij} размером $N \times M$.

Во-вторых, стоимость доставки задана не единственной, а тремя матрицами стоимости C_{ik} , C_{kq} и C_{qj} , имеющими разную размерность.

Таким образом, поставленная задача является многоиндексной и классические алгоритмы линейного программирования здесь неприменимы.

В литературных источниках представлены некоторые подходы к решению многоиндексных задач транспортного типа. Например, в [13] разработан алгоритм решения трехиндексной транспортной задачи, основанный на методе роя частиц, в [14, 15] многоиндексная транспортная задача решается путем ее сведения к классу задач поиска потока в сети, в [16] предложена итерационная процедура улучшения плана многоиндексной задачи, реализованная на основе перебора подматриц. Наиболее универсальный подход — сведение многоиндексных моделей к двухиндексным, что позволяет решать задачу с помощью стандартных процедур [17, 18].

В настоящей работе поставлена четырехиндексная транспортная задача

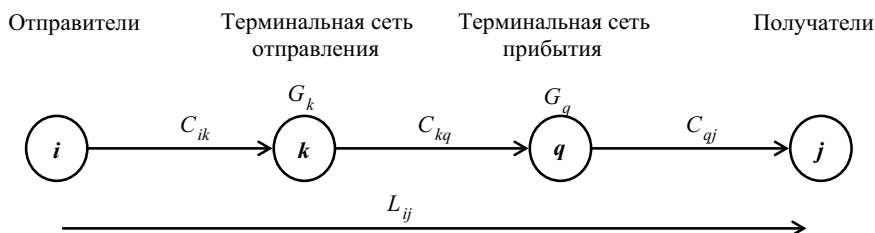


Рис. 1. Граф движения контейнеропотока через терминальную сеть

большой размерности. Для ее решения воспользуемся методом сведения к двухиндексной модели путем преобразования исходных матриц.

Алгоритм поиска оптимальных цепей доставки контейнеров реализуем на языке программирования Python. Воспользуемся следующими модулями Python для решения линейных уравнений и работы с матрицами: NumPy, Pandas и SciPy.

Исходные данные задачи сформируем в табличном виде в MS Excel и импортируем с помощью модуля Pandas. Такой способ позволит вносить изменения в исходные данные модели без правки кода программы (рис. 2).

```
#Импорт библиотек Python
import pandas as pd
import numpy as np
from scipy.optimize import linprog
#Импорт исходных данных
demand=pd.read_excel(data.xlsx,sheet_name='demand')
cost_ik=pd.read_excel(data.xlsx,sheet_name='cost_ik')
cost_kq=pd.read_excel(data.xlsx,sheet_name='cost_kq')
cost_qj=pd.read_excel(data.xlsx,sheet_name='cost_qj')
capacity_K=pd.read_excel(data.xlsx,sheet_name='capacity_K')
capacity_Q=pd.read_excel(data.xlsx,sheet_name='capacity_Q')
```

Рис. 2. Формирование исходных данных модели

Зададим переменные в матричной форме с помощью функции `array()` библиотеки NumPy. Число узлов N , M , K и Q в терминальной сети определим из заданных исходных матриц посредством метода `shape[i]`, где индекс 0 соответствует строке массива, индекс 1 — столбцу (рис. 3).

```
L=np.array(demand)
C_ik=np.array(cost_ik)
C_kq=np.array(cost_kq)
C_qj=np.array(cost_qj)
G_k=np.array(capacity_K)
G_q=np.array(capacity_Q)
N=L.shape[0]
M=L.shape[1]
K=C_kq.shape[0]
Q=C_kq.shape[1]
```

Рис. 3. Определение переменных модели

Коэффициентами целевой функции (2) в разработанной модели являются числа, полученные как произведение спроса на сумму затрат всех этапов перевозки: $L_{ij} \cdot (C_{ik} + C_{kq} + C_{qj})$. Каждый из элементов выражения задан разноразмерными матрицами. Поэтому для возможности вычисления коэффициентов целевой функции предлагается привести все массивы к единому размеру с $N \cdot K$ числом строк и $M \cdot Q$ числом столбцов.

Порядок выполнения необходимых преобразований показан в табл. 1.

Преобразование матриц на языке Python выполним с помощью функций библиотеки NumPy:

`reshape(a, b, order)` придает массиву новую форму, не изменяя его форму, здесь a — число строк новой формы массива,

b — число столбцов, `order` — порядок индексации массива, «`order = C`» означает порядок чтения массива по строкам, «`order = F`» — по столбцам;

`column_stack(a, b)` объединяет одномерные массивы a , b в виде столбцов в двумерный массив;

`vstack(a, b)` располагает массивы a , b последовательно по строкам;

`repeat(a, b, axis)` повторяет каждый элемент массива a после себя b раз, `axis` — ось, вдоль которой повторяются значения, «`axis = 0`» означает повторение по строкам, «`axis = 1`» — по столбцам.

После приведения многомерных массивов к двумерным, можем выполнить поэлементное сложение и умножение матриц для получения искомого индекса целевой функции. На рис. 4 представлен код на языке Python, который использует указанные функции для преобразования матриц.

```
#Матрица стоимости подвоза контейнера:
C_ik=(C_ik).reshape((N*K,1), order='C')
C_ik=np.column_stack([C_ik]*M*Q))
#Матрица стоимости межтерминальной перевозки:
C_kq=np.column_stack([C_kq]*M))
C_kq=np.vstack([C_kq]*N))
#Матрица стоимости доставки получателю:
C_qj=(C_qj).reshape((1,M*Q), order='F')
C_qj=np.vstack([C_qj]*N*K))
#Матрица спроса:
L=np.repeat(L, Q, axis=1)
L=np.repeat(L, K, axis=0)
#Матрица суммарных затрат:
C_ikqj=C_ik+C_kq+C_qj
```

Рис. 4. Сведение многомерных массивов к двумерным на основе функций NumPy Python

Предложенный способ преобразования матриц позволяет исключить потребность в разработке сложных вычислительных циклов, что ускоряет выполнение программы. Этот метод универсален и дает возможность работать с матрицами любой размерности.

Оптимизационную задачу решим с помощью функции `linprog()` библиотеки SciPy Python. Параметры функции следующие:

c — вектор коэффициентов целевой функции, в нашем случае это значения C_{ikqj} целевой функции (2);

A_{ub} — матрица коэффициентов при неизвестных переменных неравенств, т. е. левая часть неравенств (6) и (7);

b_{ub} — вектор ограничений, т. е. значения G_k и G_q неравенств модели (5) и (6);

A_{eq} — матрица коэффициентов при неизвестных переменных равенств, т. е. левая часть ограничения (3);

b_{eq} — вектор равенств, соответствующий правой части равенства (3);

`bounds` указывает нижнюю и верхнюю границы решения, по умолчанию переменные заданы как неотрицательные числа, что соответствует ограничению (4) нашей модели.

Таблица 1

Порядок преобразования исходных данных для приведения задачи к двухиндексной модели

Вид данных	Исходная матрица	Приведенная матрица																																													
Матрица спроса L_{ij}	<table><tr><td></td><td>$j = 1$</td><td>$j = M$</td></tr><tr><td>$i = 1$</td><td>L_{11}</td><td>L_{1M}</td></tr><tr><td>$i = N$</td><td>L_{N1}</td><td>L_{NM}</td></tr></table>		$j = 1$	$j = M$	$i = 1$	L_{11}	L_{1M}	$i = N$	L_{N1}	L_{NM}	<table><tr><td></td><td></td><td colspan="2">$j = 1$</td><td colspan="2">$j = M$</td></tr><tr><td></td><td></td><td>$q = 1$</td><td>$q = Q$</td><td>$q = 1$</td><td>$q = Q$</td></tr><tr><td>$i = 1$</td><td>$k = 1$</td><td>L_{11}</td><td>L_{11}</td><td>L_{1M}</td><td>L_{1M}</td></tr><tr><td></td><td>$k = K$</td><td>L_{11}</td><td>L_{11}</td><td>L_{1M}</td><td>L_{1M}</td></tr><tr><td>$i = N$</td><td>$k = 1$</td><td>L_{N1}</td><td>L_{N1}</td><td>L_{NM}</td><td>L_{NM}</td></tr><tr><td></td><td>$k = K$</td><td>L_{N1}</td><td>L_{N1}</td><td>L_{NM}</td><td>L_{NM}</td></tr></table>			$j = 1$		$j = M$				$q = 1$	$q = Q$	$q = 1$	$q = Q$	$i = 1$	$k = 1$	L_{11}	L_{11}	L_{1M}	L_{1M}		$k = K$	L_{11}	L_{11}	L_{1M}	L_{1M}	$i = N$	$k = 1$	L_{N1}	L_{N1}	L_{NM}	L_{NM}		$k = K$	L_{N1}	L_{N1}	L_{NM}	L_{NM}
	$j = 1$	$j = M$																																													
$i = 1$	L_{11}	L_{1M}																																													
$i = N$	L_{N1}	L_{NM}																																													
		$j = 1$		$j = M$																																											
		$q = 1$	$q = Q$	$q = 1$	$q = Q$																																										
$i = 1$	$k = 1$	L_{11}	L_{11}	L_{1M}	L_{1M}																																										
	$k = K$	L_{11}	L_{11}	L_{1M}	L_{1M}																																										
$i = N$	$k = 1$	L_{N1}	L_{N1}	L_{NM}	L_{NM}																																										
	$k = K$	L_{N1}	L_{N1}	L_{NM}	L_{NM}																																										
Матрица стоимости подвоза контейнера на терминал C_{ik}	<table><tr><td></td><td>$k = 1$</td><td>$k = K$</td></tr><tr><td>$i = 1$</td><td>C_{11}</td><td>C_{1K}</td></tr><tr><td>$i = N$</td><td>C_{N1}</td><td>C_{NK}</td></tr></table>		$k = 1$	$k = K$	$i = 1$	C_{11}	C_{1K}	$i = N$	C_{N1}	C_{NK}	<table><tr><td></td><td></td><td colspan="2">$j = 1$</td><td colspan="2">$j = M$</td></tr><tr><td></td><td></td><td>$q = 1$</td><td>$q = Q$</td><td>$q = 1$</td><td>$q = Q$</td></tr><tr><td>$i = 1$</td><td>$k = 1$</td><td>C_{11}</td><td>C_{11}</td><td>C_{11}</td><td>C_{11}</td></tr><tr><td></td><td>$k = K$</td><td>C_{1K}</td><td>C_{1K}</td><td>C_{1K}</td><td>C_{1K}</td></tr><tr><td>$i = N$</td><td>$k = 1$</td><td>C_{N1}</td><td>C_{N1}</td><td>C_{N1}</td><td>C_{N1}</td></tr><tr><td></td><td>$k = K$</td><td>C_{NK}</td><td>C_{NK}</td><td>C_{NK}</td><td>C_{NK}</td></tr></table>			$j = 1$		$j = M$				$q = 1$	$q = Q$	$q = 1$	$q = Q$	$i = 1$	$k = 1$	C_{11}	C_{11}	C_{11}	C_{11}		$k = K$	C_{1K}	C_{1K}	C_{1K}	C_{1K}	$i = N$	$k = 1$	C_{N1}	C_{N1}	C_{N1}	C_{N1}		$k = K$	C_{NK}	C_{NK}	C_{NK}	C_{NK}
	$k = 1$	$k = K$																																													
$i = 1$	C_{11}	C_{1K}																																													
$i = N$	C_{N1}	C_{NK}																																													
		$j = 1$		$j = M$																																											
		$q = 1$	$q = Q$	$q = 1$	$q = Q$																																										
$i = 1$	$k = 1$	C_{11}	C_{11}	C_{11}	C_{11}																																										
	$k = K$	C_{1K}	C_{1K}	C_{1K}	C_{1K}																																										
$i = N$	$k = 1$	C_{N1}	C_{N1}	C_{N1}	C_{N1}																																										
	$k = K$	C_{NK}	C_{NK}	C_{NK}	C_{NK}																																										
Матрица стоимости межтерминальной перевозки C_{kq}	<table><tr><td></td><td>$q = 1$</td><td>$q = Q$</td></tr><tr><td>$k = 1$</td><td>C_{11}</td><td>C_{1Q}</td></tr><tr><td>$k = K$</td><td>C_{K1}</td><td>C_{KQ}</td></tr></table>		$q = 1$	$q = Q$	$k = 1$	C_{11}	C_{1Q}	$k = K$	C_{K1}	C_{KQ}	<table><tr><td></td><td></td><td colspan="2">$j = 1$</td><td colspan="2">$j = M$</td></tr><tr><td></td><td></td><td>$q = 1$</td><td>$q = Q$</td><td>$q = 1$</td><td>$q = Q$</td></tr><tr><td>$i = 1$</td><td>$k = 1$</td><td>C_{11}</td><td>C_{1Q}</td><td>C_{11}</td><td>C_{1Q}</td></tr><tr><td></td><td>$k = K$</td><td>C_{K1}</td><td>C_{KQ}</td><td>C_{K1}</td><td>C_{KQ}</td></tr><tr><td>$i = N$</td><td>$k = 1$</td><td>C_{11}</td><td>C_{1Q}</td><td>C_{11}</td><td>C_{1Q}</td></tr><tr><td></td><td>$k = K$</td><td>C_{K1}</td><td>C_{KQ}</td><td>C_{K1}</td><td>C_{KQ}</td></tr></table>			$j = 1$		$j = M$				$q = 1$	$q = Q$	$q = 1$	$q = Q$	$i = 1$	$k = 1$	C_{11}	C_{1Q}	C_{11}	C_{1Q}		$k = K$	C_{K1}	C_{KQ}	C_{K1}	C_{KQ}	$i = N$	$k = 1$	C_{11}	C_{1Q}	C_{11}	C_{1Q}		$k = K$	C_{K1}	C_{KQ}	C_{K1}	C_{KQ}
	$q = 1$	$q = Q$																																													
$k = 1$	C_{11}	C_{1Q}																																													
$k = K$	C_{K1}	C_{KQ}																																													
		$j = 1$		$j = M$																																											
		$q = 1$	$q = Q$	$q = 1$	$q = Q$																																										
$i = 1$	$k = 1$	C_{11}	C_{1Q}	C_{11}	C_{1Q}																																										
	$k = K$	C_{K1}	C_{KQ}	C_{K1}	C_{KQ}																																										
$i = N$	$k = 1$	C_{11}	C_{1Q}	C_{11}	C_{1Q}																																										
	$k = K$	C_{K1}	C_{KQ}	C_{K1}	C_{KQ}																																										
Матрица стоимости доставки контейнера получателю C_{qj}	<table><tr><td></td><td>$j = 1$</td><td>$j = M$</td></tr><tr><td>$q = 1$</td><td>C_{11}</td><td>C_{1M}</td></tr><tr><td>$q = Q$</td><td>C_{Q1}</td><td>C_{QM}</td></tr></table>		$j = 1$	$j = M$	$q = 1$	C_{11}	C_{1M}	$q = Q$	C_{Q1}	C_{QM}	<table><tr><td></td><td></td><td colspan="2">$j = 1$</td><td colspan="2">$j = M$</td></tr><tr><td></td><td></td><td>$q = 1$</td><td>$q = Q$</td><td>$q = 1$</td><td>$q = Q$</td></tr><tr><td>$i = 1$</td><td>$k = 1$</td><td>C_{11}</td><td>C_{Q1}</td><td>C_{1M}</td><td>C_{QM}</td></tr><tr><td></td><td>$k = K$</td><td>C_{11}</td><td>C_{Q1}</td><td>C_{1M}</td><td>C_{QM}</td></tr><tr><td>$i = N$</td><td>$k = 1$</td><td>C_{11}</td><td>C_{Q1}</td><td>C_{1M}</td><td>C_{QM}</td></tr><tr><td></td><td>$k = K$</td><td>C_{11}</td><td>C_{Q1}</td><td>C_{1M}</td><td>C_{QM}</td></tr></table>			$j = 1$		$j = M$				$q = 1$	$q = Q$	$q = 1$	$q = Q$	$i = 1$	$k = 1$	C_{11}	C_{Q1}	C_{1M}	C_{QM}		$k = K$	C_{11}	C_{Q1}	C_{1M}	C_{QM}	$i = N$	$k = 1$	C_{11}	C_{Q1}	C_{1M}	C_{QM}		$k = K$	C_{11}	C_{Q1}	C_{1M}	C_{QM}
	$j = 1$	$j = M$																																													
$q = 1$	C_{11}	C_{1M}																																													
$q = Q$	C_{Q1}	C_{QM}																																													
		$j = 1$		$j = M$																																											
		$q = 1$	$q = Q$	$q = 1$	$q = Q$																																										
$i = 1$	$k = 1$	C_{11}	C_{Q1}	C_{1M}	C_{QM}																																										
	$k = K$	C_{11}	C_{Q1}	C_{1M}	C_{QM}																																										
$i = N$	$k = 1$	C_{11}	C_{Q1}	C_{1M}	C_{QM}																																										
	$k = K$	C_{11}	C_{Q1}	C_{1M}	C_{QM}																																										

Прежде чем выполнить функцию *linprog()*, приведем имеющиеся данные к необходимому виду также с помощью библиотеки NumPy.

Преобразуем матрицу коэффициентов целевой функции в вектор длиной $M \cdot N \cdot Q \cdot K$, что соответствует общему числу неизвестных переменных модели. Матрицы коэффициентов при ограничениях (3), (5), (6) необходимо привести к размеру $(z, M \cdot N \cdot Q \cdot K)$, где z — число уравнений/неравенств.

Код записи целевой функции и ограничений модели представлен на рис. 5.

Рассмотренный алгоритм был апробирован при решении задач оптимизации потоков в сетях различной конфигурации и показал свою эффективность. Совершенствование предложенной модели и алгоритма позволит принимать управленческие решения при организации функционирования контейнерных транспортных систем:

определять оптимальное число и местоположение терминалов в регионе с учетом дислокации грузополучателей;

```
#Равенство числа прибывших в j контейнеров числу отправленных из i
a=np.repeat(np.eye(M),Q,axis=1)
a=np.column_stack([a]*K)
b=np.zeros((M,M*Q))
b=np.column_stack([b]*K)
A_eq=np.block([[a,b],[b,a],[b,b]])
b_eq=L.reshape(M*N,1)
#Ограничение перерабатывающей способности терминалов
k1=np.ones((1,M*Q))
k0=np.zeros((1,M*Q))
q1=np.ones((N*K,1))
q0=np.zeros((N*K,1))
k=np.block([[k1,k0,k1,k0],[k0,k1,k0,k1]])
q=np.block([[q1,q0,q1,q0,q1,q0],[q0,q1,q0,q1,q0,q1]]).reshape(Q,M*Q*N*K)
b_ub=np.vstack((G_k,G_q))
A_ub=np.vstack((k,q))*L.reshape(1,M*N*Q*K)
#Целевая функция
c= C_ikqj.reshape(M*N*Q*K,1)
#Запуск оптимизации
f=linprog(c,A_ub,b_ub,A_eq,b_eq)
#Вывод результата оптимизации
print('Оптимальное распределение потока в сети:\n',f.x.reshape(K*N,M*Q)*L)
print('Значение целевой функции:\n',f.fun)
```

Рис. 5. Листинг программы оптимизации цепей доставки контейнера

оптимально распределять контейнеропоток между транспортными коридорами, портами и пограничными переходами в экспортно-импортных перевозках в условиях ограниченной инфраструктуры;

находить оптимальные маршруты назначения контейнерных поездов на существующей терминальной сети;

Сведения об авторах:

Дарья Ивановна Кочнева,
кандидат технических наук, доцент кафедры «Мировая экономика и логистика» Уральского государственного университета путей сообщения

Анна Викторовна Сметанина,
соискатель ученой степени кандидата наук, старший преподаватель кафедры «Мировая экономика и логистика» Уральского государственного университета путей сообщения

исследовать устойчивость плана перевозок в динамике с учетом неравномерного и случайного спроса и устанавливать резервы перерабатывающей способности терминальной сети для покрытия неравномерности.

Решению перечисленных задач будут посвящены дальнейшие исследования авторов.

Authors information:

Darya I. Kochneva,
PhD in Engineering, Associate Professor of World Economy and Logistics Department, Ural State University of Railway Transport

Anna V. Smetanina,
PhD candidate, Senior Lecturer of World Economy and Logistics Department, Ural State University of Railway Transport

Литература

- Кузнецов А. Л., Галин А. В., Попов Г. Б. Дискретно-событийное моделирование грузовых фронтов контейнерного терминала // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. 2023. Т. 15. № 4. С. 589–602. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-4-589-602.
- Кочнева Д. И., Сай В. М. Повышение эффективности организации работ на контейнерном терминале // Транспорт Урала. 2011. № 4. С. 52–57. ISSN 1815-9400.
- Король Р. Г., Акельев А. С. Моделирование пропускной способности пограничных переходов транспортного коридора «Приморье-1» в условиях увеличения грузопотока // Известия Транссиба. 2023. № 2 (54). С. 97–106. ISSN 2220-4245.
- Радочинская А. Ж., Янченко А. А., Маликова Т. Е. Моделирование процесса обработки импортного грузопотока на контейнерном терминале в среде MATLAB // Аэрокосмическое приборостроение и эксплуатационные технологии : сборник докладов Второй Международной научной конференции, Санкт-Петербург, 14–22 апреля 2021 г. Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2021. С. 144–149.
- Москвичев О. В., Москвичева Е. Е., Васильев Д. В. Совершенствование технологии терминальной обработки контейнерных поездов на основе оптимизации порядка выполнения перегрузочных операций // Транспорт Урала. 2022. № 3 (74). С. 10–15. DOI: 10.20291/1815-9400-2022-3-10-15.
- Москвичев О. В. Методологические основы размещения транспортных объектов на основе методов кластерного анализа // Вестник транспорта Поволжья. 2017. № 2 (62). С. 74–81. ISSN 1997-0722.
- Критерии выбора железнодорожных станций для размещения грузовых терминалов по обработке контейнерных поездов «Холодный экспресс» / Д. Ю. Роменский, К. И. Шведин, А. М. Насыбуллин, М. В. Роменская // Вестник ВНИИЖТ. 2021. Т. 80. № 2. С. 100–107. DOI: 10.21780/2223-9731-2021-80-2-100-107.
- Альметова З. В. Оптимизация параметров транзитных терминалов // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 1. С. 240. ISSN 2070-7428.

References

- Kuznetsov A. L., Galin A. V., Popov G. B. Discrete-event modelling of container terminal cargo fronts. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova*. 2023. Vol. 15. No. 4. Pp. 589–602. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-4-589-602. (In Russian).
- Kochneva D. I., Say V. M. Efficiency improvement of organizational management in container terminal. *Transport of the Urals*. 2011. No. 4. Pp. 52–57. ISSN 1815-9400. (In Russian).
- Korol R. G., Akeliev A. S. Modeling of the capacity of border crossings of the «Primorye-1» transport corridor in conditions of increasing cargo traffic. *Journal of Transsib Railway Studies*. 2023. No. 2 (54). Pp. 97–106. ISSN 2220-4245. (In Russian).
- Radochinskaya A. Zh., Yanchenko A. A., Malikova T. E. Simulation of the import bound cargo traffic processing at a container terminal in MATLAB environment. *Aerospace instrumentation and operational technologies : proceedings of the 2nd International scientific conference, St. Petersburg, April 14–22, 2021*. St. Petersburg : Publishing House of St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 2021. Pp. 144–149. (In Russian).
- Moskvichev O. V., Moskvicheva E. E., Vasilyev D. V. Efficiency improvement of organizational management in container terminal. *Transport of the Urals*. 2022. No. 3 (74). Pp. 10–15. DOI: 10.20291/1815-9400-2022-3-10-15. (In Russian).
- Moskvichev O. V. Methodological framework for the placement of transport facilities on the basis of cluster analysis methods. *Bulletin of transport of the Volga region*. 2017. No. 2 (62). Pp. 74–81. ISSN 1997-0722. (In Russian).
- Romenskiy D. Yu., Shvedin K. I., Nasybullin A. M., Romenskaya M. V. Criteria for the selection of railway stations for the placement of freight terminals for handling «Cold Express» container trains. *Russian Railway Science Journal*. 2021. Vol. 80. No. 2. Pp. 100–107. DOI: 10.21780/2223-9731-2021-80-2-100-107. (In Russian).
- Almetova Z. V. Optimization of the parameters of transit terminals. *Modern Problems of Science and Education*. 2014. No. 1. P. 240. ISSN 2070-7428. (In Russian).

9. Голомолзин В. Г., Покровская О. Д. Характеристика и роль терминальной сети транспортного узла в организации контейнерных поездов // Железнодорожный транспорт. 2021. № 2. С. 16–21. ISSN 0044-4448.
10. Покровская О. Д. Формирование терминальной сети региона для организации перевозок грузов : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Новокузнецк, 2011. 235 с.
11. Кочнева Д. И., Сай В. М. Интегрированное управление контейнерной транспортной системой региона // Экономика региона. 2021. Т. 17. № 4. С. 1270–1285. DOI: 10.17059/ekon.reg.2021-4-16.
12. Кочнева Д. И. Организация движения порожнего контейнеропотока в региональной контейнерной транспортно-логистической системе // Вестник УрГУПС. 2012. № 1 (13). С. 46–53. ISSN 2079-0392.
13. Мальковский С. И., Пересветов В. В. Параллельные алгоритмы решения нелинейных трехиндексных планарных транспортных задач методом роя частиц // Информационные технологии XXI века : материалы Международной научной конференции, Хабаровск, 20–24 мая 2013 г. Хабаровск : Тихоокеанский государственный университет, 2013. С. 318–323.
14. Афраймович Л. Г. Многоиндексные транспортные задачи с декомпозиционной структурой // Автоматика и телемеханика. 2012. № 1. С. 130–147. ISSN 0005-2310.
15. Модель основной технологической линии сортировочной станции / А. Э. Александров, А. Г. Галкин, В. Ю. Пермикин, Е. Н. Тимухина // Транспорт Урала. 2018. № 4. С. 7–12. DOI: 10.20291/1815-9400-2018-4-7-12.
16. Получение начального опорного плана многоиндексной задачи транспортной логистики / Е. Б. Ахизер, О. А. Гелярская, О. И. Дунаевская, Н. Т. Процай // Радиоэлектроника и информатика. 2014. № 2 (65). С. 16–18. ISSN 1563-0064.
17. Косенко О. В., Пушнина И. В. Модель управления на основе решения несимметричных транспортных задач // Известия ЮФУ. Технические науки. 2013. № 2 (139). С. 175–180. ISSN 1999-9429.
18. Хухрянская Е. С., Соловей Д. Е. О методе решения некоторых транспортных задач с неоднородностями // Моделирование систем и процессов. 2016. № 2. С. 74–77. ISSN 2219-0767.
9. Golomolzin V. G., Pokrovskaya O. D. Characteristics and role of the terminal network of the transport hub in the organization of container trains. *Railway Transport*. 2021. No. 2. Pp. 16–21. ISSN 0044-4448. (In Russian).
10. Pokrovskaya O. D. Formation of the terminal network of the region for the organization of cargo transportation : PhD in Engineering Thesis. Novokuznetsk, 2011. 235 p. (In Russian).
11. Kochneva D. I., Say V. M. Integrated management of the regional container transport system. *Economy of Regions*. 2021. Vol. 17. No. 4. Pp. 1270–1285. DOI: 10.17059/ekon.reg.2021-4-16. (In Russian).
12. Kochneva D. I. Organization of empty container flow traffic in regional container transport-logistic system. *Herald of the USURT*. 2012. No. 1 (13). Pp. 46–53. ISSN 2079-0392. (In Russian).
13. Malkovskiy S. I., Peresvetov V. V. Parallel algorithms for solving nonlinear three-index planar transport problems by the particle swarm method. *Information technologies of the 21st century : proceedings of the International scientific conference, Khabarovsk, May 20–24, 2013*. Khabarovsk : Pacific National University, 2013. Pp. 318–323. (In Russian).
14. Afraimovich L. G. Multi-index transport problems with decomposition structure. *Automation and Remote Control*. 2012. No. 1. Pp. 130–147. ISSN 0005-2310. (In Russian).
15. Alexandrov A. E., Galkin A. G., Permikin V. Yu., Timukhina E. N. Model of marshalling station main processing line. *Transport of the Urals*. 2018. No. 4. Pp. 7–12. DOI: 10.20291/1815-9400-2018-4-7-12. (In Russian).
16. Akhiezer E. B., Gelyarovskaya O. A., Dunaevskaya O. I., Protsay N. T. Construction of an initial basic plan multi-index problem for bigger logistics. *Radio electronics and informatics*. 2014. No. 2 (65). Pp. 16–18. ISSN 1563-0064. (In Russian).
17. Kosenko O. V., Pushnina I. V. Management model on the basis of the solution of asymmetrical transport tasks. *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*. 2013. No. 2 (139). Pp. 175–180. ISSN 1999-9429 (In Russian).
18. Khukhryanskaya E. S., Solovey D. E. On the solving method for some transportation problems with heterogeneities. *Modeling of systems and processes*. 2016. No. 2. Pp. 74–77. ISSN 2219-0767. (In Russian).

Объем статьи 0,7 авторских листа

Научная статья
УДК 656.025

Устойчивость городской пассажирской автотранспортной системы

Анастасия Олеговна Тишкова¹, Кристина Алексеевна Паршакова¹, Никита Сергеевич Бондаренко¹,
Наталья Владимировна Якунина¹, Николай Николаевич Якунин¹

¹ Оренбургский государственный университет, Оренбург, Россия

Sustainability of urban passenger transportation system

Anastasiya O. Tishkova¹, Kristina A. Parshakova¹, Nikita S. Bondarenko¹, Natalya V. Yakunina¹, Nikolay N. Yakunin¹

¹ Orenburg State University, Orenburg, Russia

Аннотация

На основе общесистемной формулировки Ж. Л. Лагранжа дано определение устойчивости городской пассажирской автотранспортной системы, которая заключается в свойстве оставаться в ограниченной области фазового пространства при наступлении возмущающих воздействий. Приведена методика определения граничных значений состояния системы, при которых она может считаться устойчивой. В качестве основного параметра в методике использован показатель устойчивости. Он отражает долю спроса на пассажирские перевозки по городским улицам, проходящим через транспортные районы с наибольшей плотностью населения, удовлетворяемые перевозчиками, имеющими высокую репутацию и выполняющими условия договоров на перевозки. На примере Оренбурга определены граничные значения спроса и дана оценка существующему состоянию устойчивости.

Ключевые слова: городские пассажирские автомобильные перевозки, устойчивость, доля спроса, граничные значения

Abstract

Based on the system-wide formulation by J. L. Lagrange, the formulation of the stability of the urban passenger transportation system is given, which consists in the property of remaining in alimited area of phase space under the conditions of the onset of disturbing influences. A method is given for determining the boundary values of the system state at which it can be considered stable. The methodology uses the sustainability indicator as the main parameter, reflecting the share of demand for passenger transportation along city streets passing through transport areas with the highest population density, satisfied by carriers with a high reputation and fulfilling the terms of transportation contracts. Using the example of the city of Orenburg, its boundary values are determined, and the existing state of stability is assessed.

Keywords: urban passenger automobile transportation, sustainability, share of demand, boundary values

DOI: 10.20291/1815-9400-2025-1-72-77

ВВЕДЕНИЕ

Научная общественность и работники пассажирского автомобильного транспорта ведут активную деятельность по поиску оптимального состояния городских пассажирских автотранспортных систем, способного укрепить существующие и создать дополнительные привлекательные свойства этому виду перевозок. Разрабатываются измерители такого состояния, совершенствуются автотранспортные системы для достижения их желаемых значений. Например, в монографии Н. В. Якуниной [1] исследуются показатели качества перевозок пассажиров городским автомобильным транспортом по регулярным маршрутам. В результате адаптации типовых процедур квалиметрии к городской пассажирской автотранспортной системе сформулированы основные показатели качества перевозок, определена методология их достижения. В статье [2] изучены показатели привлекательности городского пассажирского автомобильного транспорта, основанные на результатах статистического анализа предпочтений пассажиров, и определены наиболее значимые — стоимостные и временные характеристики перевозок. В работе [3] сформулированы показатели оценки уровня организации регулярных пассажирских перевозок не только с позиции предпочтений пассажиров, но и с позиции других участников транспортного процесса. В [4] в качестве параметра, оценивающего пассажирские автотранспортные системы, предложено использовать соотношение числа легковых автомобилей и автобусов, зарегистрированных в регионе.

Вместе с тем, несмотря на большое количество научных трудов, до сих пор актуальным остается изучение свойства этих систем, характеризующего их способность сохранять желаемое состояние в условиях наступления возмущающих воздействий. Именно этой теме посвящены результаты исследования, представленные в настоящей статье.

Цель исследования заключалась в разработке инструментария для оценки устойчивости городских пассажирских автотранспортных систем, объект исследования — процесс перевозки пассажиров автомобильным транспортом по регулярным маршрутам, предмет исследования — свойство городских пассажирских автотранспортных систем сохранять способ-

ность удовлетворять потребности населения в перемещениях при наступлении возмущающих воздействий.

Устойчивость системы городского пассажирского автомобильного транспорта имеет сложную структуру, зависит от большого количества переменных и должна базироваться на использовании принципов необходимости и достаточности.

В 2015 г. была принята «Повестка дня в области устойчивого развития до 2030 года», определившая 17 глобальных целей, важной составляющей которых является устойчивое развитие городских транспортных систем.

Большой вклад в развитие теории устойчивости внес В. И. Вернадский, который при анализе связей системы «человек — природа» начал учитывать потребности и интересы не только настоящего, но и будущих поколений, а также ввел новое критериальное измерение «человечество как единое целое» [5].

Устойчивость систем изучали Р. Аккоф, Л. фон Берталанфи, Ю. Урманцев, Э. Ласло, отмечавшие способность системы возвращаться в состояние равновесия, после того как она была из этого состояния выведена под влиянием внешних возмущающих воздействий [5]. Такими учеными, как Н. Винер, У. Эшби, В. М. Глушков [5], устойчивость рассматривалась как способность системы функционировать в состояниях, близких к равновесным, в условиях постоянных внешних и внутренних возмущающих воздействий. Авторы статьи [6] раскрывают сущность понятия «устойчивость», рассматривают особенности форм проявления, а также специфику формирования устойчивости в отношении технических, социально-экономических и природных систем.

В работе [7] на основе принципа необходимости и достаточности с использованием метода экспертных оценок решается задача ранжирования показателей качества пассажирских транспортных услуг в межрегиональном сообщении и выделения наиболее значимых из них. В статье [8] устойчивость городских транспортных систем изучается через создание новых маршрутов и введение в эксплуатацию новых автобусов, которые способствуют увеличению транспортной доступности, обеспечению регулярного транспортного обслуживания населения, повышению мобильности граждан и сокращению временных затрат. Устойчивости транспорта общего пользования с учетом особенностей современной транспортной политики посвящена работа [9].

В статье [10] рассмотрена эволюция концептуальных подходов и методов разработки маршрутных схем транспорта общего пользования. Авторы предлагают инновационный подход к созданию маршрутной системы, адаптированной к актуальному структурированному спросу на транспортные услуги. Решения на его основе представляют интерес для перевозчиков и муниципальных властей, так как способствуют достижению ключевых целей устойчивого развития городских агломераций.

На основе анализа вопросов, связанных с разработкой рациональной маршрутной схемы городских агломераций, в статье [11] предложен алгоритм формирования рациональной маршрутной сети, позволяющий удовлетворить потребности населения в поездках.

Модель равновесия на рынке городских пассажирских перевозок рассмотрена в [12], где учитывается такой фактор, как возможность пассажира доехать до пункта назначения с пересадкой. Подобное обобщение позволяет использовать модели для решения задач оптимизации городского пассажирского транспорта.

В статье [13] анализируется формирование новой парадигмы управления городским транспортом общего пользования, которая направлена на создание конкурентной среды через эффективное распределение маршрутной сети, и предлагается метод группировки маршрутов, основанный на экономических показателях. Это позволяет организовать конкурентные процедуры в области транспортного обслуживания населения между муниципальным и частным секторами, причем муниципальный перевозчик наделен функцией гаранта бесперебойного предоставления услуг.

По мнению авторов статьи [14], устойчивый транспорт связан с подходом, учитывающим экономику, ожидания общества и охрану окружающей среды, а также с удовлетворением потребности людей в мобильности. Основным направлением этой работы является получение показателя устойчивости и измерение степени устойчивости в области транспорта.

В статье [15] устойчивость и ее применение рассмотрены для малых и средних городов. С помощью аналитических исследований и математического моделирования изучены категории, представляющие показатели устойчивого транспорта. Наиболее актуальны среди них — показатели транспортного планирования и пешеходной доступности, доступность и удовлетворенность транспортной системой.

Таким образом, анализ рассмотренных работ свидетельствует о большом внимании исследователей к изучению устойчивости автотранспортных систем и разработке методик, направленных на ее повышение. Вместе с тем понимание устойчивости автотранспортных систем требует конкретизации с учетом особенностей методологии решения задачи. В связи с этим наиболее близким к изучаемой системе является определение, сделанное Ж. Л. Лагранжем: устойчивость — это «свойство системы по мере движения оставаться в ограниченной области фазового пространства».

ТЕОРЕТИКО-МЕТОДИЧЕСКИЙ АППАРАТ ИССЛЕДОВАНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ГОРОДСКОЙ ПАССАЖИРСКОЙ АВТОТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ

В настоящей статье использованы положения общенаучных методов исследования — анализа и синтеза, а также математической статистики, теории транспортных процессов и систем, теории управления.

Следствием определения, сделанного Ж. Л. Лагранжем, является поиск показателя устойчивости и его граничных значений, при которых система может считаться устойчивой.

Спрос на перевозки Q пассажиров может быть удовлетворен двумя группами перевозчиков. Первая обладает доказанной высокой репутацией и обоснованной уверенностью в выполнении перевозок согласно требованиям муниципального контракта в условиях наступления возмущающих воздействий. Эта группа удовлетворяет часть спроса $Q_{\text{рейт}}$ на пере-

возки. Вторая группа перевозчиков не обладает качествами, свойственными первой группе, и удовлетворяет часть спроса $Q_{\text{риск}}$. Таким образом:

$$Q = Q_{\text{рейт}} + Q_{\text{риск}}. \quad (1)$$

Под возмущающими воздействиями в настоящей статье понимается наступление событий, которые приводят к прекращению выполнения перевозок пассажиров по регулярным маршрутам, когда причины не форс-мажорного характера отсутствуют. Существование второй группы перевозчиков подтверждается значительным количеством регулярных городских маршрутов, от работы на которых отказались перевозчики первой или второй группы. Репутация перевозчиков может быть определена с использованием методики [1], основанной на объективной информации ГЛОНАСС. В качестве событий, создающих обоснованную уверенность в выполнении перевозок согласно требованиям муниципального контракта в условиях наступления возмущающих воздействий, является отсутствие накопленных отказов от выполнения пассажирских перевозок.

С учетом этого показатель устойчивости Y городской пассажирской автотранспортной системы определяется по зависимости

$$Y = Q_{\text{рейт}} / Q. \quad (2)$$

Наибольший спрос на перевозки пассажиров возможен в случае прохождения регулярных маршрутов по районам с высоким транспортным спросом. Показатель устойчивости характеризует долю спроса на пассажирские перевозки по городским дорогам и улицам, проходящим через транспортные районы с наибольшим транспортным спросом, удовлетворяемые перевозчиками первой группы.

Наибольшее значение показателя Y равно единице, наименьшее допустимое — $Y_{\text{доп}}$. Городская пассажирская автотранспортная система будет устойчива тогда, когда фактическое значение показателя $Y_{\text{факт}}$ находится в пределах от Y до $Y_{\text{доп}}$:

$$Y_{\text{доп}} \leq Y_{\text{факт}} \leq Y. \quad (3)$$

Если неравенство (3) выполняется, то система устойчива, если не выполняется — система неустойчива.

Методика определения граничных значений состояния системы включает в себя следующие основные этапы.

1. Определение транспортных районов с высоким транспортным спросом. Основные положения этой части методики приведены в статье [16].

2. Формирование опорной транспортной сети города, представляющей собой систему городских дорог и улиц, проходящих через транспортные районы с наибольшим транспортным спросом.

3. Определение значений показателей Q , $Q_{\text{рейт}}$, $Y_{\text{факт}}$, $Y_{\text{доп}}$.

С учетом приведенных доводов устойчивость городской пассажирской автотранспортной системы может быть определена как ее свойство оставаться в ограниченной области удовлетворения транспортного спроса в условиях наступления возму-

щающих воздействий не форс-мажорного характера на основе равномерной бесперебойной работы пассажирского автомобильного транспорта по городским улицам, проходящим через транспортные районы с наибольшим транспортным спросом, и осуществляемой перевозчиками, имеющими высокую репутацию и обоснованную уверенность в выполнении перевозок согласно требованиям муниципального контракта.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ГОРОДСКОЙ ПАССАЖИРСКОЙ АВТОТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ

Согласно методике определения граничных значений состояния системы, территорию города разделяют на транспортные районы с установленным количеством потенциальных пассажиров в каждом из них. На рис. 1 представлено такое распределение для Оренбурга. На карте наибольшие значения суточного спроса на регулярные пассажирские перевозки отмечены красным, наименьшие — голубым цветом. Диапазон значений суточных спросов составляет от 4796 до 58 пасс. соответственно.

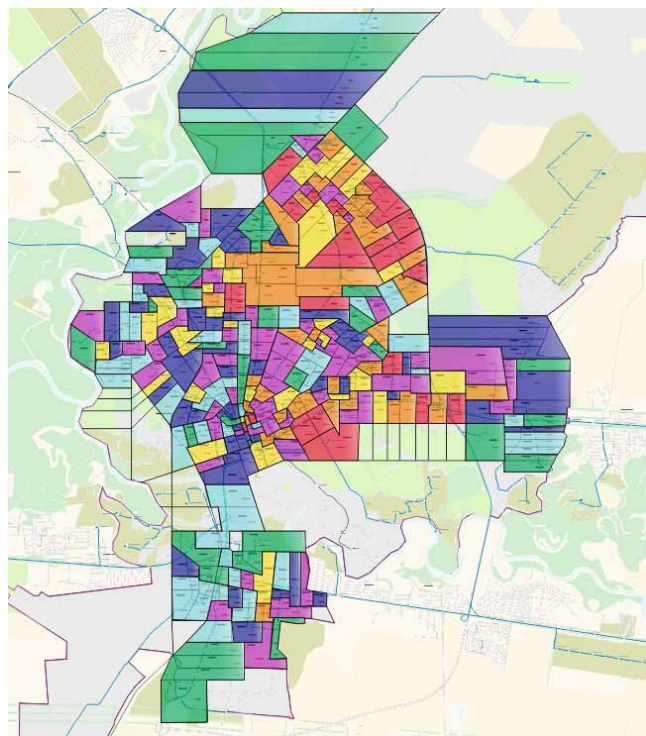


Рис. 1. Результаты разделения территории Оренбурга на транспортные районы с определением количества потенциальных пассажиров в каждом из них

В соответствии с условием удовлетворения наибольшего транспортного спроса разработана опорная транспортная сеть города. На рис. 2 представлен один из ее вариантов на примере Оренбурга. Необходимо подчеркнуть, что вариантов опорной транспортной сети может быть несколько, поиск ее оптимального расположения — предмет дальнейших исследований авторов. Однако уже сейчас можно отметить, что лучшим

вариантом станет тот, в котором значение показателя устойчивости (Y) будет наибольшим.

Опорная транспортная сеть должна содержать не менее шести маршрутов регулярных перевозок. Количество маршрутов и их позиционирование в составе опорной сети требует дальнейшего изучения и в настоящей статье не представлено.

Распределение транспортного спроса по шести маршрутам регулярных перевозок, показанным на рис. 2, приведено в табл. 1. Значения прогнозируемого транспортного спроса определены по результатам обследования пассажирской автотранспортной системы Оренбурга в 2022 г. с использованием методики [16].

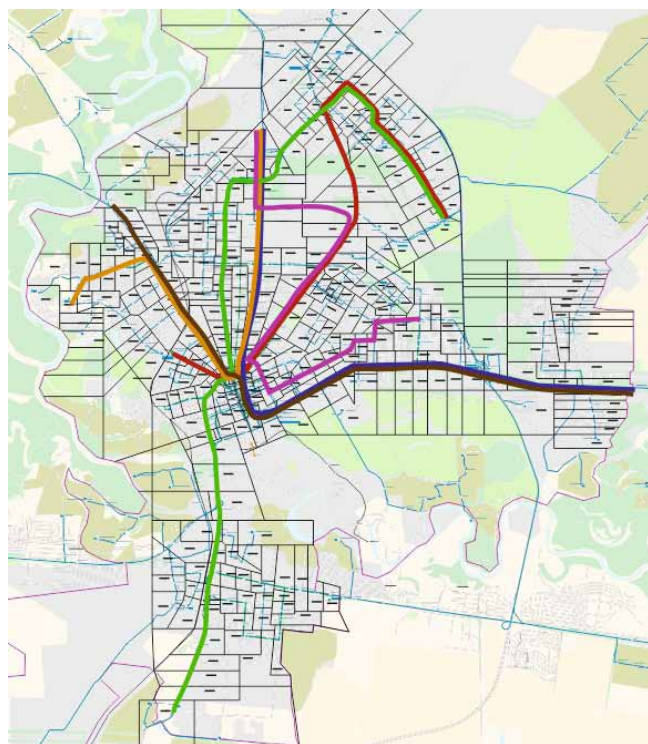


Рис. 2. Вариант опорной транспортной сети Оренбурга

Таблица 1

Распределение транспортного спроса
по маршрутам опорной сети

Цвет линии маршрута на рис. 2	Прогнозируемый транспортный спрос в будние дни, пасс./сут
Красный	42022
Зеленый	49667
Синий	29726
Желтый	16093
Розовый	31319
Коричневый	27221

Как видно из данных табл. 1, транспортный спрос по маршрутам представленного варианта опорной сети является высоким — находится в пределах от 16093 до 49667 пасс./сут. Это означает, что он должен обслуживаться перевозчиками, имеющими высокую репутацию и обоснованную уверенность в выполнении перевозок согласно требованиям муниципального контракта. В таком случае устойчивость пассажирской автотранспортной системы города достигнет необходимого уровня, т. е. спрос $Q_{рейт}$, удовлетворяемый перевозчиками с доказанной высокой репутацией, составит 196049 пасс./сут. Существующий спрос Q на перевозки по всем городским маршрутам в 2024 г. был равен 223736 пасс./сут, наименьшее значение показателя устойчивости $Y_{доп}$ составило 0,876.

Таким образом, анализ существующей маршрутной транспортной сети Оренбурга позволил установить фактическое значение показателя устойчивости $Y_{факт}$, равное 0,302, это указывает на то, что рассматриваемая городская пассажирская автотранспортная система устойчивой не является.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные аналитические исследования позволили сформулировать новое понятие «устойчивость городской пассажирской автотранспортной системы». Оно характеризует свойство системы оставаться в ограниченной области удовлетворения транспортного спроса при наступлении возмущающих воздействий не форс-мажорного характера, обеспечивающей равномерную бесперебойную работу пассажирского автомобильного транспорта. Устойчивость такой системы определяется расположением опорной транспортной сети, охватывающей транспортные районы с наибольшим транспортным спросом. Перевозки пассажиров по опорной транспортной сети должны осуществлять перевозчики, имеющие высокую репутацию и обоснованную уверенность в выполнении перевозок согласно требованиям муниципального контракта.

Для количественной характеристики этого свойства создан инструментарий оценки устойчивости городских пассажирских автотранспортных систем. Его основу образуют показатели устойчивости Y городской пассажирской автотранспортной системы — наименьшее допустимое значение $Y_{доп}$ и фактическое значение $Y_{факт}$. Кроме того, разработана методика определения граничных значений состояния системы, при которых она может считаться устойчивой. Использование представленных в статье теоретико-методических положений для маршрутной транспортной сети Оренбурга подтвердило их работоспособность.

Практическая значимость исследования заключается в том, что предложенную методику оценки можно использовать для определения и повышения устойчивости пассажирской автотранспортной системы городов.

Дальнейшие исследования авторов будут направлены на анализ устойчивости автотранспортных систем городов с различными архитектурно-планировочными решениями и на оценку распределения населения по транспортным районам.

Сведения об авторах:

Анастасия Олеговна Тишкова,
аспирант кафедры автомобильного транспорта Оренбургского государственного университета

Кристина Алексеевна Паршакова,
ассистент кафедры автомобильного транспорта Оренбургского государственного университета

Никита Сергеевич Бондаренко,
магистрант кафедры автомобильного транспорта Оренбургского государственного университета

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

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

Authors information:

Anastasiya O. Tishkova,
postgraduate student of Road Transport Department, Orenburg State University

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

Nikita S. Bondarenko,
master's student of Road Transport Department, Orenburg State University

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

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

Литература

1. Якунина Н. В. Методология повышения качества перевозок пассажиров автомобильным транспортом по регулярным маршрутам : монография. Оренбург : Университет, 2015. 262 с.
2. Якунина Н. В., Нестеренко Д. Х., Арсланов М. А. Факторный анализ направлений повышения активности использования городского пассажирского автомобильного транспорта // Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета. 2018. Т. 21. № 4. С. 533–540. DOI: 10.21443/1560-9278-2018-21-4-533-540.
3. Тишкова А. О., Якунин Н. Н., Якунина Н. В. Система показателей качества для пассажирского автотранспортного комплекса города // Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры. Оренбург : Изд-во ОГУ, 2023. С. 3130–3136.
4. Якунин Н. Н., Якунина Н. В., Любимов И. И. Региональные пассажирские автотранспортные системы: постановка задачи, первые результаты оценивания // Вестник СибАДИ. 2023. Т. 20. № 6 (94). С. 748–761. DOI: 10.26518/2071-7296-2023-20-6-748-761.
5. Новаковская О. А., Митюхин Д. С. Управление устойчивостью региона // Вестник ЗабГУ. 2015. № 2 (117). С. 143–151. ISSN 2227-9245.
6. Косолапов О. В., Игнатьева М. Н. Устойчивость как одна из основных характеристик системы // Известия УГТУ. 2013. № 4 (32). С. 77–81. ISSN 2307-2091.
7. Луконькина К. А., Епифанов В. В. Обоснование показателей качества межрегиональных пассажирских перевозок с применением экспертного метода // Вестник УлГТУ. 2019. № 4. С. 59–63. ISSN 1684-7016.
8. Касовская Я. К. Управление устойчивостью городских транспортных систем // Экономика и бизнес: теория и практика. 2022. № 4-1 (86). С. 199–202. DOI: 10.24412/2411-0450-2022-4-1-199-202.
9. Шадиметов Ю. Ш., Айрапетов Д. А. Устойчивый транспорт, важнейший аспект современной транспортной политики // The scientific heritage. 2022. № 98. С. 6–10. DOI: 10.5281/zenodo.7148215.

References

1. Yakunina N. V. The methodology for improving the quality of transportation of passengers by public motor transport on regular routes. Orenburg : University, 2015. 262 p. (In Russian).
2. Yakunina N. V., Nesterenko D. Kh., Arslanov M. A. Factor analysis of ways to activate using the urban passenger motor transport. *Vestnik of MSTU. Scientific journal of Murmansk State Technical University*. 2018. Vol. 21. No. 4. Pp. 533–540. DOI: 10.21443/1560-9278-2018-21-4-533-540. (In Russian).
3. Tishkova A. O., Yakunin N. N., Yakunina N. V. System of quality indicators for the passenger transport complex of the city. *University complex as a regional center of education, science and culture*. Orenburg : Publishing House of OSU, 2023. Pp. 3130–3136. (In Russian).
4. Yakunin N. N., Yakunina N. V., Lyubimov I. I. Regional passenger motor transport systems: problem statement, first estimation results. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2023. Vol. 20. No. 6 (94). Pp. 748–761. DOI: 10.26518/2071-7296-2023-20-6-748-761. (In Russian).
5. Novakovskaya O., Mityukhin D. Management of region's stability. *Bulletin of the Transbaikal State University*. 2015. No. 2 (117). Pp. 143–151. ISSN 2227-9245. (In Russian).
6. Kosolapov O.V., Ignatieva M. N. Stability as one of the main characteristics of the system. *News of the Urals State Mining University*. 2013. No. 4 (32). Pp. 77–81. ISSN 2307-2091. (In Russian).
7. Lukonkina K. A., Epifanov V. V. Substantiation of indicators of quality of passenger transportations with the use of expert method. *Vestnik of UISTU*. 2019. No. 4. Pp. 59–63. ISSN 1684-7016. (In Russian).
8. Kasovskaya Ya. K. Managing the sustainability of urban transport systems. *Journal of Economy and Business*. 2022. No. 4-1 (86). Pp. 199–202. DOI: 10.24412/2411-0450-2022-4-1-199-202. (In Russian).
9. Shadimetov Yu., Ayrapetov D. Sustainable transport, an essential aspect of modern transport policy. *The scientific heritage*. 2022. No. 98. Pp. 6–10. DOI: 10.5281/zenodo.7148215. (In Russian).

10. Бубнова Г. В., Покусаев О. Н., Акимов А. В. Развитие методологии создания маршрутной системы пассажирского транспорта в городской агломерации // Транспортное дело России. 2022. № 2. С. 102–105. DOI: 10.52375/20728689_2022_2_102.
11. Бурлуцкий А. А. Анализ опыта формирования оптимальных маршрутных схем городского пассажирского транспорта // Вестник ТГАСУ. 2013. № 2. С. 371–380. ISSN 1607-1859.
12. Зварыч Е. Б., Корягин М. Е. Ситуация равновесия Нэша на рынке городских пассажирских перевозок при перемещении пассажиров с пересадками // Вестник КузГТУ. 2009. № 5. С. 124–128. ISSN 1999-4125.
13. Шлиппе И. И., Оганесян Т. С. Анализ условий формирования и развития рынка пассажирских перевозок городским автобусным транспортом // Вестник Московского университета. Сер. 6. Экономика. 2017. № 1. С. 86–100. ISSN 0130-0105.
14. Juyal S., Yedla S. Sustainability of transport system: Case study of Greater Mumbai // Journal of Sustainable Development of Transport and Logistics. 2020. Vol. 5 (2). Pp. 153–167. DOI: 10.14254/jsdtl.2020.5-2.14.
15. Application of Sustainability Indicators to Local Public Transport Planning for Small and Medium Cities / M. Garcia, F. Nakamura, M. Matsuyuki [et al.]. // Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies. 2024. Vol. 15. Pp. 1890–1909. DOI: 10.11175/easts.15.1890.
16. Методика прогнозирования транспортной потребности населения городов с высоким туристическим потенциалом в пиковые сезоны / Н. Н. Якунин, Н. В. Якунина, А. Ф. Фаттахова [и др.] // Вестник СибАДИ, 2024. Т. 21. № 2 (96). С. 256–269. DOI: 10.26518/2071-7296-2024-21-2-256-269.
10. Bubnova G., Pokusaev O., Akimov A. Development of methodology for creating a passenger transport route system in an urban agglomeration. *Transport business in Russia*. 2022. No. 2. Pp. 102–105. DOI: 10.52375/20728689_2022_2_102. (In Russian).
11. Burlutskiy A. A. Experience analysis of urban optimal passenger transport networks. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2013. No. 2. Pp. 371–380. ISSN 1607-1859. (In Russian).
12. Zvarych E. B., Koryagin M. E. The Nash equilibrium situation in the urban passenger transportation market when passengers are traveling with transfers. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2009. No. 5. Pp. 124–128. ISSN 1999-4125. (In Russian).
13. Shlepp I. I., Oganessian T. S. The formation and development of the public bus transport market. *Moscow University Economics Bulletin*. 2017. No. 1. Pp. 86–100. ISSN 0130-0105. (In Russian).
14. Juyal S., Yedla S. Sustainability of transport system: Case study of Greater Mumbai. *Journal of Sustainable Development of Transport and Logistics*. 2020. Vol. 5 (2). Pp. 153–167. DOI: 10.14254/jsdtl.2020.5-2.14.
15. Garcia M., Nakamura F., Matsuyuki M. [et al.]. Application of Sustainability Indicators to Local Public Transport Planning for Small and Medium Cities. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*. 2024. Vol. 15. Pp. 1890–1909. DOI: 10.11175/easts.15.1890.
16. Yakunin N. N., Yakunina N. V., Fattakhova A. F. [et al.]. Forecasting technique of transport need for population of cities with high tourist potential during peak seasons. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2024. Vol. 21. No. 2 (96). Pp. 256–269. DOI: 10.26518/2071-7296-2024-21-2-256-269. (In Russian).

Объем статьи 0,7 авторских листа

Научная статья
УДК 621.001.4

Обоснование стратегий взаимодействия предприятий по эксплуатации машин с предприятиями технического сервиса в автомобильно-дорожном комплексе

Виктор Иванович Карагодин¹, Алексей Юрьевич Горелов¹

¹ Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия

Substantiation of strategies for interaction of enterprises operating machines with technical service enterprises in automobile and road construction complex

Viktor I. Karagodin¹, Alexey Yu. Gorelov¹

¹ Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow, Russia

Аннотация

В статье рассмотрена задача рационального распределения работ по ремонту дорожно-строительных машин между эксплуатирующими предприятиями и предприятиями технического сервиса. Задача представлена в многокритериальной постановке, учитывающей хозяйственные интересы обеих групп. Для ее решения используется математическая теория игр. Сформулированы возможные стратегии игроков (эксплуатирующих предприятий и предприятий технического сервиса), определены затраты на реализацию стратегий. Построена платежная матрица, и доказано существование седловой точки. Определены оптимальные стратегии для эксплуатирующих предприятий с разным количеством машин в парке и для предприятий технического сервиса. Установлены закономерности рационального распределения ремонтных работ между предприятиями в зависимости от размера парка машин.

Ключевые слова: дорожно-строительные машины, эксплуатационное предприятие, предприятие технического сервиса, ремонтные работы, распределение работ

Abstract

The article considers the problem of rational distribution of work on the repair of road construction machinery between operating enterprises and technical service enterprises. The task is presented in a multi-criteria formulation that takes into account the economic interests of both groups. Mathematical game theory is used to solve it. Possible strategies of the players (operating enterprises and technical service enterprises) are formulated, and the costs of implementing the strategies are determined. A payment matrix is constructed, and the existence of a saddle point is proved. Optimal strategies have been identified for operating enterprises with different numbers of vehicles in the fleet and for technical service enterprises. The patterns of rational distribution of repair work between enterprises, depending on the size of the fleet, have been established.

Keywords: road construction machinery, operating enterprise, technical service enterprise, repair work, distribution of work

DOI: 10.20291/1815-9400-2025-1-78-82

В постгарантийный период часть работ по техническому обслуживанию (ТО) и ремонту машин выполняют эксплуатирующие предприятия (ЭП), а другую часть работ они могут передавать предприятиям технического сервиса (ПС) [1]. Поэтому встает задача по обоснованию рационального распределения всех работ между предприятиями. Если и ЭП, и ПС принадлежат одному владельцу, что характерно для крупных газо-, нефтедобывающих и других компаний, то решение владелец принимает в условиях полной информации, руководствуясь единым критерием, отражающим хозяйственные интересы всей системы.

Принцип заинтересованности предприятий в экономическом сотрудничестве ради достижения общей цели в условиях хозяйственной самостоятельности не действует, и возникает конфликт интересов [2]. Каждое предприятие руководствуется своим критерием оценки результатов хозяйственной деятельности, что вызывает необходимость постановки и решения многокритериальной задачи. В этих условиях решение о распределении работ может быть обосновано с помощью методов теории игр [3].

Будем полагать, что стратегии ПС определяются исходя из цели их функционирования, которой можно считать получение максимальной прибыли. Цель технической службы ЭП — повышение коэффициента готовности парка машин и снижение затрат на ремонты [4].

Стратегии ЭП могут включать три возможных решения:

стратегия 1 — выполнение всех работ собственными силами;

стратегия 2 — передача в ПС всех комплексов работ по ремонту двигателей, требующих для выполнения снятия двигателя с машины;

стратегия 3 — передача в ПС всех комплексов работ вместе с машиной, включая работы, не требующие для выполнения снятия двигателя с машины.

Стратегии ПС будут различаться расценками на выполняемые ремонтные работы [5]. Ограничим эти стратегии тремя

решениями, дающими разные доли прибыли, которую ПС может получить от оказания услуг технического сервиса: 0, 50 и 100 % от снижения затрат ЭП, достигнутого с помощью ПС. Фактически это означает следующее. Передача части или всех работ с ЭП на ПС, безусловно, приведет к снижению затрат в системе. Чисто гипотетически ПС может выступить в качестве альтруиста, отдав всю прибыль от снижения затрат ЭП. Такая стратегия представляет только теоретический интерес, но может быть реализована и практически, если ЭП и ПС принадлежат одному собственнику. Наиболее реальна вторая стратегия ПС, когда прибыль делится пополам между предприятиями, т. е. по 50 % каждому. И наконец, третья стратегия — получение 100 % прибыли ПС. Она настолько же гипотетическая, как и первая стратегия ПС, но решение такой задачи укажет на реальные границы распределения прибыли от экономии средств между предприятиями.

Пусть ЭП выбирает i -ю стратегию, а ПС — j -ю, причем $1 \leq i \leq m$ и $1 \leq j \leq n$. В результате применения соответствующих стратегий получаем величину, равную a_{ij} и называемую в теории игр платежом. Если $a_{ij} > 0$, то выигрывает один из игроков. Платежная матрица такой игры имеет вид

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{pmatrix}.$$

В парной игре с нулевой суммой стратегии игроков называются соответственно максиминной (игрока 1) и минимаксной (игрока 2). Величина $\alpha = \max_i \min_j a_{ij}$ называется *нижней*

ценой игры, а величина $\beta = \min_j \max_i a_{ij}$ — *верхней ценой игры*.

В случае равенства нижней и верхней цены игры величина, которой они равны, называется *седловой точкой*, а стратегии игроков, соответствующие седловой точке, являются *оптимальными* стратегиями. Исходные данные для поиска оптимальных стратегий были сформированы следующим образом. Среднегодовые затраты на выполнение i -м ЭП ремонтных воздействий непосредственно на машине можно определить по формуле [6]

$$C_i = \sum_{u=1}^U X_{ou} \mu_{vu} \left\{ K_u (k_p + E_n) + \Pi_u + P_u + f_u k_{об.у} \mu_{fvu} \left[\Pi_{зд} (k_p + E_n) + C_{сод} \right] + T_i [c_i k_n (1 + H/100) + c_3] \right\} + \quad (1)$$

где X_{ou} — количество единиц u -го оборудования; μ_{vu} — коэффициент занятости u -го оборудования выполнением v -х работ; K_u — стоимость единицы u -го оборудования, тыс. руб.; k_p — норма реновации основных фондов, определяемая с учетом фактора времени; E_n — норматив приведения разновременных затрат и результатов ($E_n = 0,1$); Π_u — затраты на приоб-

речение и содержание технологической оснастки к u -му оборудованию (могут приниматься в размере 7–8 % от K_u); P_u — годовые затраты на ремонт единицы u -го оборудования (могут приниматься равными 3,5 % от K_u); f_u — производственная площадь, занимаемая единицей u -го оборудования, m^2 ; $k_{об.у}$ — коэффициент плотности расстановки оборудования; μ_{fvu} — коэффициент занятости площади u -м оборудованием при выполнении v -х работ; $\Pi_{зд}$ — средняя стоимость 1 m^2 производственного здания, тыс. руб.; $C_{сод}$ — среднегодовые расходы на содержание (ремонт, отопление, освещение, вентиляцию и уборку) помещений, приходящиеся на 1 m^2 производственной площади, тыс. руб.; T_i — годовой объем работ по ремонту, выполняемых i -м ЭП, чел.-ч; c_i — среднечасовая заработная плата слесаря на i -м ЭП, тыс. руб./ч; k_n — коэффициент, учитывающий начисления на заработную плату; H — накладные расходы производственных рабочих в процентах к заработной плате; c_3 — удельные затраты на электроэнергию, приходящиеся на 1 чел.-ч выполняемых работ, руб./чел.-ч.

Среднегодовые затраты на выполнение i -м ЭП ремонтных воздействий на моторном участке определяются аналогично, но вместо годового объема работ T_i в формуле (1) используется годовой объем работ по ремонту двигателей на моторном участке.

Существенная разница ЭП и ПС в организации работ и в затратах на их выполнение состоит в том, что ЭП обслуживает весь парк своих машин при небольших программах их ремонта и поэтому создает, как правило, универсальные рабочие места, а ПС специализируется на обслуживании техники, как правило, одного производителя и выполняет те же работы с меньшей трудоемкостью на специализированных рабочих местах [7]. Это вызывает необходимость выделить долю затрат ЭП, приходящуюся на рассматриваемую номенклатуру техники, из суммарных затрат на весь парк машин. Будем для определенности считать, что фронтальные погрузчики, по которым собирались все исходные данные, составляют 20 % парка машин ЭП. При иной структуре парка предлагаемая методика может быть использована в полной мере с учетом незначительной корректировки исходных данных.

Согласно полученной информации и принятым допущениям, рабочая формула (1) для расчета затрат ЭП при первой стратегии приведена к следующему виду, тыс. руб.:

$$C = 0,2(0,37K + 26,53F) + 1,42T, \quad (2)$$

где K — суммарная стоимость средств технологического оснащения (оборудования, приспособлений и инструмента), применяемых предприятием; F — суммарная производственная площадь, занятая выполняемыми на предприятии работами; T — суммарная трудоемкость выполняемых работ.

Формулу (2) можно использовать и для ПС. Но, поскольку в ПС для ремонта рассматриваемых машин используются специализированные средства технологического оснащения, предназначенные только для этих машин, из формулы необходимо исключить коэффициент 0,2. Сводные данные по показателям, входящим в формулу (2), приведены в табл. 1 [8].

Таблица 1

Технико-экономические показатели

Показатель	Эксплуатационное предприятие	Предприятие технического сервиса
Суммарная стоимость средств технологического оснащения, руб.*	6 000 000 10 000 000	8 000 000 12 000 000
Суммарная производственная площадь, м ² *	200 80	900 288
Среднегодовая трудоемкость работ по одной машине для 1-й категории условий эксплуатации, чел.-ч	95 21	72 16

* В числителе — данные для зоны ТО и ремонта, в знаменателе — для участка ремонта двигателей.

Парк машин, обслуживаемых ПС рассматриваемой системы, составляет от 200 ед. и более. Для расчетов принят парк в 200 ед. Парк машин ЭП может варьироваться в широких пределах. Ниже рассматривается диапазон от 3 до 50 машин, доля которых в парке составляет 20 %. Пусть в парке машин ЭП имеется 10 однотипных машин. При реализации стратегии 1 за рассматриваемый период затраты предприятия в соответствии с формулой (2) составят, тыс. руб.:

$$C = 0,2[0,37(6000 + 10000) + 26,53(200 + 80)] + 1,42 \cdot 10(95 + 21) = 4317.$$

Если ЭП перейдет к стратегии 2, оно будет выполнять только постовые работы в зоне текущего ремонта: ремонтировать двигатели непосредственно на машине без их снятия, а также снимать и устанавливать двигатели в случаях, предусмотренных технологией ремонта. Затраты на постовые работы составят, тыс. руб.:

$$C = 0,2[0,37 \cdot 6000 + 26,53 \cdot 200] + 1,42 \cdot 10 \cdot 95 = 2854.$$

Затраты на ремонт снятых с машин 200 двигателей на предприятии технического сервиса составят, тыс. руб.:

$$C = [0,37 \cdot 12000 + 26,53 \cdot 288] + 1,42 \cdot 200 \cdot 16 = 16620.$$

Из этой суммы на долю 10 двигателей обслуживаемого ЭП приходится 10/200 часть, т. е. 831 тыс. руб. В таком случае суммарные затраты в системе составят 2854 + 831 = 3685 тыс. руб. Это меньше, чем при первой стратегии ЭП.

При стратегии 3, когда все работы выполняет ПС, себестоимость этих работ составит, тыс. руб.:

$$C = [0,37(8000 + 12000) + 26,53(900 + 288)] + 1,42 \cdot 200(72 + 16) = 63900.$$

Из этой суммы на долю 10 машин обслуживаемого ЭП приходится 10/200 часть, т. е. 3195 тыс. руб.

Платежная матрица будет иметь вид

$$A = \begin{matrix} & \begin{matrix} 0 & 0 & 0 \end{matrix} & \begin{matrix} \longrightarrow \min 0 \\ \longrightarrow \min 316 \\ \longrightarrow \min 561 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 632 \\ 1122 \end{matrix} & \begin{matrix} 316 \\ 561 \end{matrix} & \begin{matrix} 632 \\ 1122 \end{matrix} & \left. \begin{matrix} \\ \\ \end{matrix} \right\} \max \min 561 \\ \begin{matrix} \downarrow \\ \downarrow \\ \downarrow \end{matrix} & & & \\ \begin{matrix} \max 1122 & \max 561 & \max 1122 \end{matrix} & & & \\ & \underbrace{\hspace{10em}} & & \\ & \min \max 561 & & \end{matrix}$$

Первая строка платежной матрицы фиксирует ситуацию, когда экономия за счет централизации работ отсутствует. Затраты ЭП в размере 4317 тыс. руб. являются базой для расчета этой экономии. Прибыль ПС равна нулю, так как оно в процессе ремонта не участвует.

Вторая строка показывает, что выигрыш ЭП от централизации ремонта снятых с машин двигателей составляет 632 тыс. руб. (4317 – 3685), если эти работы выполняет ПС, а ЭП оплачивает их по себестоимости. Отсутствие прибыли ПС приводит к тому, что элемент второй строки первого столбца является его проигрышем. В третьем столбце второй строки ситуация меняется на противоположную: для ПС 632 тыс. руб. будет выигрышем, а для ЭП — проигрышем. Во втором столбце второй строки и ЭП, и ПС имеют выигрыш 316 тыс. руб., который, с другой стороны, может называться проигрышем, так как уступает максимально возможному выигрышу предприятий, который они имели бы в первом и третьем столбцах второй строки.

В третьей строке распределение выигрыша и проигрыша предприятий аналогично.

Далее для каждой стратегии ЭП (по строкам) находим минимальные значения. Из трех полученных величин определяем наибольшую, т. е. $\max \min$ равен 561. Для каждой стратегии ПС (по столбцам) находим максимальные значения. Среди полученных величин определяем наименьшую, которая тоже равна 561.

Итак, максимин и минимакс равны, следовательно, цена игры составляет 561. Существует седловая точка матрицы A , образованная третьей стратегией ЭП и второй стратегией ПС, которые являются оптимальными стратегиями игроков в данной игре.

Принципиальное решение состоит в том, что при условиях поставленной задачи (заданные парк машин и экономические показатели) целесообразно централизация всех работ по ремонту машин. Нетрудно заметить, что полученное решение об-

ладает большой устойчивостью. В нем предусмотрена 50%-я доля от общей экономии затрат каждому участнику. Для ЭП рекомендованная стратегия может уступить стратегии 2 только в том случае, если доля прибыли опустится ниже 316 тыс. руб., т. е. уменьшится более чем на 40 %. Соответственно ПС может увеличивать свою долю прибыли до 40 % в рамках взаимовыгодной стратегии. Любое решение в этом диапазоне будет выгодно обоим предприятиям, только в разной степени. Такой широкий диапазон возможных решений позволяет учесть дополнительные факторы, не рассмотренные в рамках поставленной и решенной задачи, например: затраты на перевозки машин в централизованный ремонт, на создание и содержание оборотного фонда двигателей, потери от увеличения продолжительности ремонта при его централизации и т. д. [9].

Результаты аналогичных расчетов для других количественных значений парков машин представлены на рис. 1.

Сравнивая результаты, полученные для разных парков машин, видим закономерность того, как размер парка влияет на выбор стратегий предприятиями. По признаку целесообразности централизации ремонтных работ можно разделить эксплуатационные предприятия на мелкие, средние и крупные. Мелким (до 15 однотипных машин) нецелесообразно развивать собственную производственно-техническую базу для ремонта и следует передавать все работы по ремонту машин предприятиям технического сервиса. Крупным предприятиям, имеющим свыше 20–25 однотипных машин, наоборот, целесообразно отказаться от услуг предприятий технического сервиса и развивать собственную производственно-техниче-

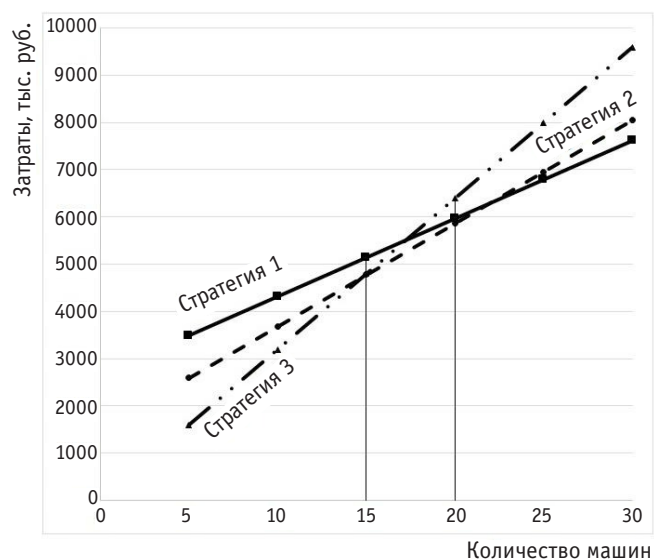


Рис. 1. Зависимость затрат на ремонт от количества однотипных машин в парке

скую базу. Средним предприятиям (от 15 до 20–25 однотипных машин) следует выполнять ремонты машин на собственной производственно-технической базе, но снятые агрегаты направлять в централизованный ремонт на предприятие технического сервиса.

Сведения об авторах:

Виктор Иванович Карагодин,

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Дорожно-строительные машины» Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ)

Алексей Юрьевич Горелов,

кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Дорожно-строительные машины» Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ)

Authors information:

Viktor I. Karagodin,

DSc in Engineering, Professor, Professor of Road Building Machines Department, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI)

Alexey Yu. Gorelov,

PhD in Engineering, Senior Lecturer of Road Building Machines Department, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI)

Литература

1. Рахманов М. Л., Савельев А. Г. Инновационная система управления качеством // Строительные и дорожные машины. 2023. № 6. С. 3–8. ISSN 0039-2391.
2. Озорнин С. П. Оценка эксплуатационной надежности горных транспортно-технологических машин на этапе анализа статистических данных об отказах // Вестник Забайкальского государственного университета. 2023. Т. 29. № 1. С. 21–30. DOI: 10.21209/2227-9245-2023-29-1-21-30.
3. Кремлев А. Г. Основные понятия теории игр. Екатеринбург : Изд-во УрГУ, 2016. 144 с.
4. Карагодин В. И. Распределение наземных транспортных и транспортно-технологических средств по объектам и видам работ с учетом их технического состояния // International Journal of Advanced Studies. 2024. Т. 14. № 3. С. 77–99. DOI: 10.12731/2227-930X-2024-14-3-309.

References

1. Rakhmanov M. L., Savelyev A. G. Innovative quality management system. *Construction and Road Building Machinery*. 2023. No. 6. Pp. 3–8. ISSN 0039-2391. (In Russian).
2. Ozornin S. P. Assessment of Operational Reliability of Mining Transport and Technological Machines at the Stage of Analysis of Statistical Data in Failures. *Transbaikal State University Journal*. 2023. Vol. 29. No. 1. Pp. 21–30. DOI: 10.21209/2227-9245-2023-29-1-21-30. (In Russian).
3. Kremlev A. G. Basic concepts of game theory. Ekaterinburg : Publishing House of Ural State University, 2016. 144 p. (In Russian).
4. Karagodin V. I. Distribution of land transport and transport-technological means by objects and types of work, taking into account their technical condition. *International Journal of Advanced Studies*. 2024. Vol. 14. No. 3. Pp. 77–99. DOI: 10.12731/2227-930X-2024-14-3-309. (In Russian).

5. Павлов А. П., Золотуева Н. В. Исследование факторов, влияющих на изменение технического состояния автомобиля в процессе его производства, ремонта и эксплуатации // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. 2016. № 3 (9). eISSN 2409-7217.
6. Карагодин В. И., Карагодин Д. В. Формирование структуры ремонтного цикла автомобилей и их составных частей : монография. Москва : РУСАЙНС, 2021. 128 с.
7. Подопригора Н. В., Васильев Я. В. Модели управления эксплуатационной надежностью высокоавтоматизированных транспортных средств // Грузовик. 2023. № 8. С. 20–25. ISSN 1684-1298.
8. Локшин Е. С., Карагодин В. И., Горелов А. Ю. Критерии оценки сервисного сопровождения дорожно-строительных машин // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). 2024. № 1 (76). С. 41–48. ISSN 2079-1364.
9. Карагодин В. И., Зиманов Л. Л. Обоснование состава и периодичности выполнения контрольно-диагностических и восстановительных операций при техническом обслуживании автомобилей // Транспорт Урала. 2024. № 2 (81). С. 56–61. DOI: 10.20291/1815-9400-2024-2-56-61.

5. Pavlov A. P., Zolotueva N. V. Study of factors affecting the technical condition of the car in the process of production, repair and maintenance. *Automobile. Road. Infrastructure*. 2016. No. 3 (9). eISSN 2409-7217. (In Russian).
6. Karagodin V. I., Karagodin D. V. Formation of structure for repair cycle of cars and their components : monograph. Moscow : Ru-Science, 2021. 128 p. (In Russian).
7. Podoprigora N. V., Vasilyev Ya. V. Models of operational reliability management of highly automated vehicles. *Gruzovik*. 2023. No. 8. Pp. 20–25. ISSN 1684-1298. (In Russian).
8. Lokshin E. S., Karagodin V. I., Gorelov A. Y. Criteria for evaluating service support road construction machines. *Vestnik MADI*. 2024. No. 1 (76). Pp. 41–48. ISSN 2079-1364. (In Russian).
9. Karagodin V. I., Zimanov L. L. Rationale of the composition and periodicity of performing the diagnostic and restoration operations when car maintenance is being carried out. *Transport of the Urals*. 2024. No. 2 (81). Pp. 56–61. DOI: 10.20291/1815-9400-2024-2-56-61. (In Russian).

Объем статьи 0,5 авторских листа

Кластеризация как метод оптимального распределения зарядных станций для электромобилей: подходы и результаты

Александр Анатольевич Комяков¹, Антон Сергеевич Голубков¹, Юлия Викторовна Заренкова¹

¹ Омский государственный университет путей сообщения, Омск, Россия

Clustering as a method for optimal distribution of charging stations for electric vehicles: approaches and results

Alexander A. Komyakov¹, Anton S. Golubkov¹, Yuliya V. Zarenkova¹

¹ Omsk State Transport University, Omsk, Russia

Аннотация

В городах и агломерациях Европейской части России прослеживается тенденция растущего спроса на электромобили. В контексте перехода современных городов на электромобили необходимо решить проблему развертывания эффективной зарядной инфраструктуры. В статье предложен подход к размещению зарядных станций с использованием такого инструмента, как алгоритмы кластеризации, применительно к анализу пространственно-временных паттернов движения автомобилей на основе реальных данных о поездках такси в исследуемом регионе.

Рассмотрено применение одного из алгоритмов кластеризации, а именно метода k-средних (k-means), реализованного на языке программирования Python. Выполнено объединение начальных и конечных точек поездок такси в исследуемом регионе в обоснованные кластеры. Полученные результаты в дальнейшем будут использоваться при анализе транспортных потоков и разработке оптимальной стратегии размещения зарядной инфраструктуры для электромобилей.

Ключевые слова: кластеризация, алгоритм k-means, Python, зарядные станции, электромобили, анализ маршрутов

Abstract

In the cities and agglomerations of the European part of Russia, there is a growing trend in demand for electric vehicles. In the context of the transition of modern cities to electric vehicles, it is necessary to solve the problem of deploying an efficient charging infrastructure. The article proposes an approach to the placement of charging stations using a tool such as clustering algorithms, applied to the analysis of spatiotemporal patterns of car movement based on real data on taxi rides in the region under study.

The application of one of the clustering algorithms, namely the k-means method, implemented in the Python programming language, is considered. The beginning and ending points of taxi rides in the studied region were combined into well-founded clusters. The results obtained will be used in the future in the analysis of traffic flows and the development of an optimal strategy for the placement of charging infrastructure for electric vehicles.

Keywords: clustering, k-means algorithm, Python, charging stations, electric vehicles, route analysis

DOI: 10.20291/1815-9400-2025-1-83-88

ВВЕДЕНИЕ

Использование электромобилей и других низкоуглеродных технологий становится ключевым направлением для устойчивого развития транспортной отрасли. Одним из основополагающих документов в данной области является Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 года с прогнозом до 2035 года [1]. В этом стратегическом плане определены задачи по снижению объемов выбросов парниковых газов (ПГ) для всех видов транспорта и по переходу на низкоуглеродное развитие сферы, в том числе на активное использование электромобилей. Стратегия включает в себя нормы ESG и учитывает цели устойчивого развития ООН, что отражает обновленное видение транспортной политики в интересах граждан, грузоотправителей и широкой общественности.

Установленный в документе целевой индикатор по снижению выбросов ПГ на период до 2035 г. нацелен на сокращение «углеродного следа» от эксплуатации общественного транспорта в крупных агломерациях на уровне 30–70 % по сравнению с 2019 г. Прогнозные оценки, выполненные в работе [2], показывают, что выбросы автомобильным и городским электрическим транспортом составляют 79,2 % общего объема валовых выбросов ПГ, который достигает 285,4 млн т CO₂-экв.

С учетом вышеизложенного ожидается, что к 2030 г. суммарные выбросы ПГ в транспортном секторе России могут сократиться до 261,2 млн т при реализации инновационного и до 282,0 млн т CO₂-экв. при реализации консервативного сценария [2]. Причем пропорции вклада различных видов транспорта в общие выбросы останутся относительно неизменными, что подчеркивает роль автомобильного транспорта как основного источника выбросов. В связи с этим переход на электромобили представляется не только актуальным, но и необходимым для достижения поставленных экологических целей и устойчивого будущего транспортной системы.

В то же время для комфортного использования электромобилей необходимо создать сеть зарядных станций, которая будет соответствовать потребностям водителей и обеспечивать доступность зарядки. Серьезным стимулом развития городской зарядной инфраструктуры является приобретение электромобилей

службами такси или каршеринга [3]. Но при этом необходимо оптимальное размещение зарядных станций, что улучшит их доступность и сократит время ожидания зарядки для водителей электрических такси. Отсюда следует, что условиях городских пробок и динамичного графика работы такси расположение зарядных станций должно базироваться на анализе реальных данных о маршрутах.

Целью нашего исследования был анализ возможности использования алгоритма k-means для кластеризации маршрутов такси и последующего решения задачи по оптимальной интеграции зарядных станций в транспортные системы городов. Исследование сфокусировано на электромобилях, которые потенциально будут участвовать в функционировании таксопарка, однако предложенные методы вполне могут быть экстраполированы на любые типы транспортных средств.

Необходимо сказать, что оптимизации размещения зарядной инфраструктуры для электромобилей посвящено значительное число научных трудов. Например, статья [4] посвящена решению задачи по размещению и распределению зарядных станций для электромобилей на основе использования методов машинного обучения. По результатам этого исследования была создана тепловая карта Москвы, показывающая районы и конкретные точки, наиболее подходящие для установки новых зарядных станций. Отметим, что методом нашего исследования выбрана кластерная атрибутивная визуализация, позволяющая создать более четкую и структурированную визуализацию результатов и сформировать атрибутивную таблицу, в которой легко проследить количественные данные. Кроме того, этот метод дает возможность фильтровать и сортировать данные в таблицах, что при использовании тепловых карт может быть затруднительно.

Исследование, выполненное Ю. С. Яковлевой и Н. В. Пожиловым, фокусируется на оптимизации расположения в Москве зарядных станций для электробусов, акцентируя внимание на экологических особенностях различных районов города [5].

В статье [6] подробно описан процесс по разработке для размещения зарядных станций модуля, использующего язык программирования Python и платформу геоинформационной системы QGIS. При этом Python обеспечивает реализацию алгоритма, обработку данных и необходимые вычисления, в то время как QGIS служит в качестве пользовательского интерфейса и средства визуализации результатов. В итоге разработан программный продукт, который функционирует как скрипт, интегрируемый в QGIS в виде пользовательского модуля. В нашем исследовании также использовался язык программирования Python.

Что касается зарубежного опыта, то, например, в работе [7] рассматривается двухуровневая оптимизация размещения зарядных станций для электромобилей на дорожных сетях. Результаты исследования, опубликованные в [8], подчеркивают необходимость интеграции анализа маршрутов водителей и планирования зарядной инфраструктуры для повышения доступности и удобства использования зарядных станций, что способствует более эффективному развертыванию зарядной сети и улучшению обслуживания пользователей электромобилей.

ЭМПИРИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОГО АНАЛИЗА ДВИЖЕНИЯ АВТОМОБИЛЕЙ

Эмпирическим материалом нашего исследования были данные о поездках, выполненных одной из служб такси в Омске. Эти данные включали в себя начальные и конечные точки движения, а также время и дату поездки.

На первом этапе исследования была собрана информация, необходимая для использования алгоритма кластеризации, в частности, адреса, по которым водители такси выполняли поездки. В результате массив данных составил 60000 маршрутов, т. е. значительный объем информации для дальнейшего анализа, поездки были совершены в период с 22 по 28 октября 2024 г.

С целью повышения точности и для удобства работы с собранными данными использовали сервис геокодирования pominatim.org. Этот инструмент позволяет преобразовывать адресные данные в географические координаты, что является необходимым шагом для визуализации маршрутов на картах. Обработка адресов через pominatim.org позволила получить структурированные данные, которые включали координаты широты и долготы, а также информацию об адресах. Для выборки координаты широты изменялись в пределах от 54.825 до 55.200 со средним квадратическим отклонением 0,035, координаты долготы — от 73.200 до 73.500 со средним квадратическим отклонением 0,061.

По завершении обработки было необходимо отобрать более управляемое количество точек для последующей кластеризации и визуализации на карте. Объем репрезентативной выборки n рассчитывали по формуле [9, 10]

$$n = \frac{\frac{Z^2 pq}{\Delta^2}}{1 + \frac{\frac{Z^2 pq}{\Delta^2} - 1}{N}},$$

где Z — аргумент функции Лапласа для заданного уровня значимости (в нашем исследовании $Z = 1,96$ для уровня значимости 0,05); p — доля объектов с наличием исследуемого признака; $q = 1 - p$ — доля объектов, у которых исследуемый признак отсутствует; N — объем генеральной совокупности (60000 поездок); Δ — предельная ошибка выборки, выраженная в относительных единицах (принята равной 0,01).

Если значения p и q неизвестны, их рекомендуется принять равными 0,5.

В результате определено, что для заданных условий минимальный объем репрезентативной выборки составит 8279 точек. После округления с учетом целей исследования и необходимости в наглядности представленных данных из общего объема генеральной совокупности случайным образом были выбраны 10.000 точек. Предельная ошибка выборки в этом случае не превышает 0,9 %.

Далее были проведены опыты кластеризации для разного количества точек, чтобы выявить устойчивую кластеризацию. По окончании экспериментов было принято, что 10000 слу-

чайню отобранных точек дают достаточно хороший результат кластеризации имеющихся данных. Этот выбор базировался на критерии репрезентативности и обеспечивал более четкую визуализацию кластеров и маршрутов.

Таким образом, была выполнена комплексная работа по сбору, обработке и отбору данных. Это обеспечило качество и точность собранной информации и создало основу последующего использования алгоритма кластеризации и анализа — определения более значимых и продуктивных зон размещения зарядных станций для электромобилей в городском пространстве.

ОПИСАНИЕ МЕТОДА КЛАСТЕРИЗАЦИИ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К АНАЛИЗУ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ ПАТТЕРНОВ ДВИЖЕНИЯ АВТОМОБИЛЕЙ НА ОСНОВЕ РЕАЛЬНЫХ ДАННЫХ О ПОЕЗДКАХ ТАКСИ В ИССЛЕДУЕМОМ РЕГИОНЕ

Обработка информации осуществлялась методом кластеризации. После обзора различных алгоритмов кластеризации был выбран алгоритм k-means. Этот алгоритм впервые был представлен Гуго Штейнгаузом [11] в 1950-х гг., а одновременно с ним и Стюартом Ллойдом [12], приобрел популярность благодаря работам Дж. Маккуина [13] и продолжает оставаться одним из лучших методов кластеризации.

Алгоритм k-means подходит для анализа конечных и начальных точек маршрутов такси по ряду причин. Во-первых, он эффективно распределяет данные по кластерам, позволяя выделять группы похожих поездок, что облегчает понимание пространственных и временных паттернов в данных. Во-вторых, он быстро обрабатывает большие объемы данных, что важно для анализа городских служб такси, у которых количество поездок может быть значительным. Наконец, k-means позволяет легко интерпретировать результаты, что делает его полезным инструментом для выявления hotspot (горячих точек) в распределении такси и для принятия стратегических решений по развитию инфраструктуры (например, по размещению зарядных станций для электромобилей).

В своем исследовании мы использовали алгоритм кластеризации k-means для анализа данных, которые представляют собой начальные и конечные координаты маршрутов такси и временные характеристики каждой поездки. Эти данные позволяют более точно оценить маршруты и подводят к областям с высокой плотностью движения такси. При помощи алгоритма k-means можно выявлять сгруппированные зоны с высокой потребностью в зарядных станциях, что, в свою очередь, позволит принимать более обоснованные решения о местах их установки.

Рассмотрим методологию применения алгоритма кластеризации k-means к данным о маршрутах такси. Цель такого анализа — получение объединения множества точек в обоснованные кластеры, что будет первым шагом для дальнейшей разработки имитационной модели движения электромобилей и функционирования зарядной сети. Обозначенная цель достигается при помощи алгоритма кластеризации k-means для выявления зон с высокой концентрацией начальных и конечных точек маршрутов такси в различных временных интервалах.

Проанализируем 10000 точек маршрутов, используя язык программирования Python и соответствующие библиотеки, такие как Pandas, NumPy, Matplotlib и TileMapBase.

Алгоритм k-means начинается с инициализации центроидов случайным образом:

$$c_j^{(0)} = x_i, i = 1, 2, \dots, k,$$

где $c_j^{(0)}$ — начальные центроиды; x_i — случайно выбранные точки из данных.

Каждая точка назначается ближайшему центроиду:

$$label_i = \left\{ j, d(x_i, c_j) = \min(d(x_i, c_k)) \right\}, k = 1, \dots, K,$$

где

$$d(x_i, c_j) = \|x_i - c_j\|^2 = (x_{i1} - c_{j1})^2 + (x_{i2} - c_{j2})^2 + \dots + (x_{im} - c_{jm})^2.$$

Центроиды обновляются как среднее всех точек в кластере:

$$c_j^{(t+1)} = \frac{1}{|C_j|} \sum_{x_i \in C_j} x_i,$$

где $C_j = \{x_i | label_i = j\}$.

Для оценки качества кластеризации используется коэффициент силуэта:

$$S(i) = \frac{b(i) - a(i)}{\max(a(i), b(i))},$$

где $a(i)$ — среднее расстояние от точки i до всех других точек в том же кластере; $b(i)$ — минимальное среднее расстояние от точки i до всех точек в ближайшем кластере.

Значение $S(i)$ варьируется от -1 до 1 , при этом значение 1 указывает на то, что точка хорошо соответствует своему кластеру; значение 0 указывает на границу между двумя кластерами; отрицательные значения указывают на неправильное назначение точки.

Для наглядного представления результатов кластеризации разные кластеры, в том числе координаты центров кластеров, визуализируются разными цветами.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОГО АНАЛИЗА ДВИЖЕНИЯ АВТОМОБИЛЕЙ

В результате использования алгоритма k-means выделены кластеры с учетом пространственно-временных данных.

Количество кластеров ($n_clusters=23$) определено по результатам предварительных исследований — по кластеризации пространственно-временных данных поездок такси с варьированием числа кластеров от 8 до 23. Таким образом, было получено 384 результата, для каждого из которых рассчитан коэффициент силуэта — индикатор качества кластеризации. Далее были выполнены визуальный анализ распределения кластеров и сравнительный анализ коэффициентов силуэта. По

полученным результатам установлено, что наиболее оптимальное количество кластеров равно 23.

Визуализация на карте демонстрирует географические контексты кластеров, что позволяет более наглядно оценить результаты и принять обоснованные решения для развития зарядной инфраструктуры. Кластеризация выполнена для поездок, совершенных в соответствующий временной период продолжительностью 1 ч.

Анализ кластеров маршрутов такси позволяет идентифицировать зоны и временные периоды, в которых сосредоточено наибольшее количество поездок (рис. 1). Коэффициенты силуэта находятся в интервале 0,4–0,47 (математическое ожидание 0,426, рис. 2), т. е. объекты в кластере имеют умеренное соответствие своим группам, что является приемлемым значением при кластеризации географических данных. Важно отметить, что на текущем этапе исследования при кластеризации геопространственных данных маршрутов такси не учитывались природные и искусственные барьеры (такие как железнодорожные пути, реки) и элементы городской инфраструктуры, и это является недостатком модели.

Для визуализации результатов кластеризации использовались библиотеки Matplotlib и TileMapBase. Кластеры были представлены различными цветами, исключая шумовые точки, которые обозначены черным цветом. Кроме того, центры кластеров выделены символами «х». Визуализация результатов кластеризации получена для каждого временного интервала. В качестве примера на рис. 3 представлена карта наиболее загруженного временного интервала 19:00–19:59.

В данном временном интервале самыми плотными кластерами являются № 8, № 14 и № 22: они занимают наиболее активное место среди всех маршрутов такси и демонстрируют высокую плотность поездок, что указывает на значительное использование такси в этих зонах. Перечисленные кластеры расположены вблизи крупных транспортных узлов и деловых центров и, следовательно, подходят для размещения зарядных станций.

В том же временном интервале (19:00–19:59) вторая по плотности груп-

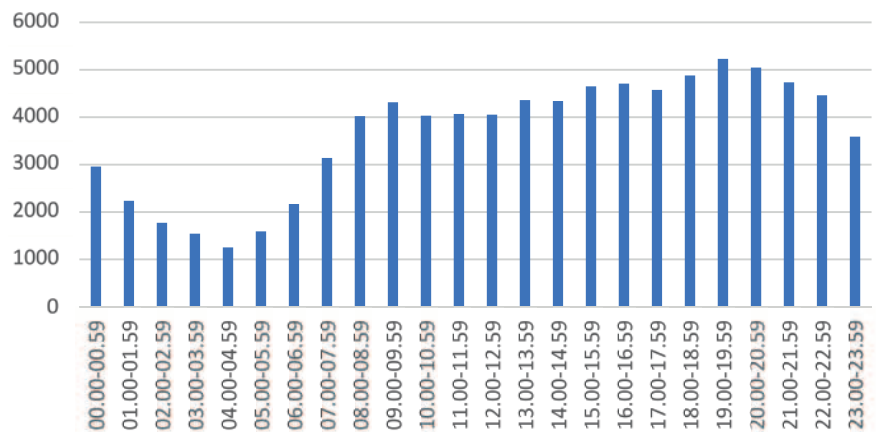


Рис. 1. Распределение количества точек по временным интервалам

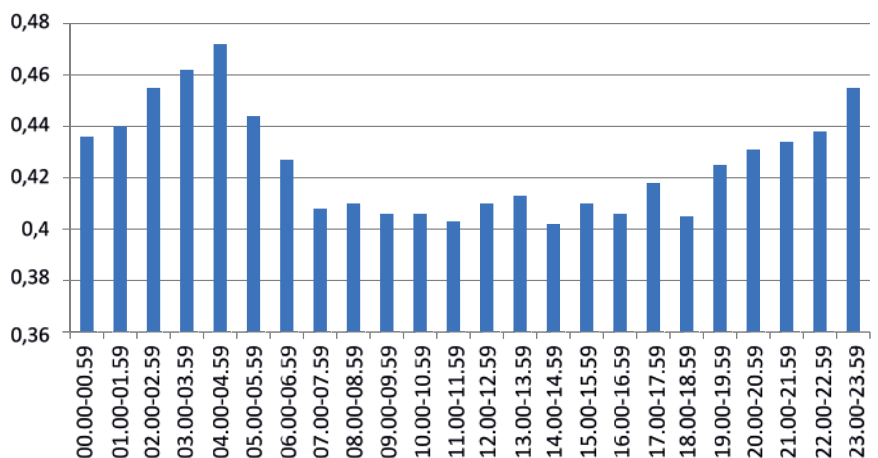


Рис. 2. Значения коэффициентов силуэта для различных временных интервалов

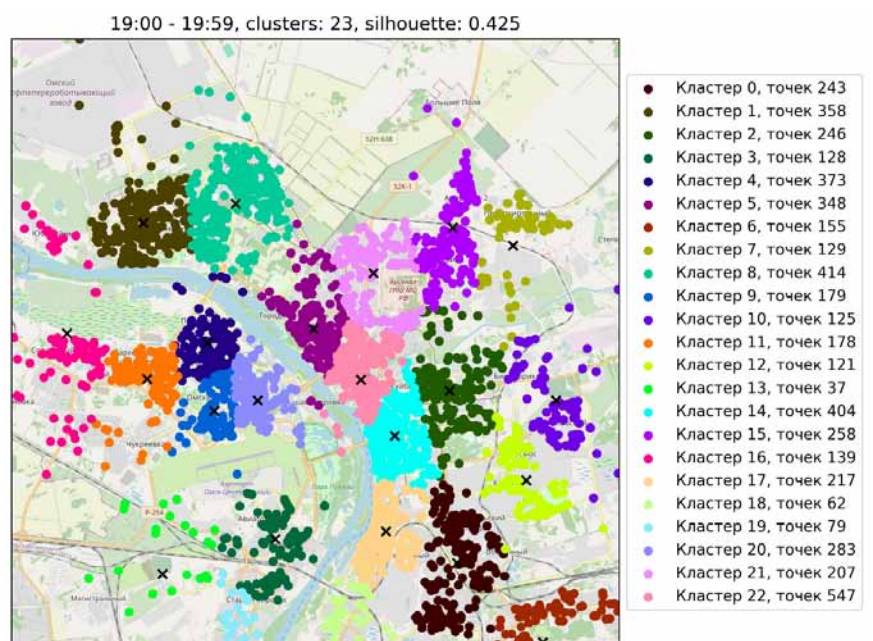


Рис. 3. Визуализация результатов кластеризации на примере временного интервала 19:00–19:59

па представлена кластерами № 1, № 4 и № 5. В этом районе также наблюдается активность поездок на такси, сопоставимая с потенциальной потребностью в зарядных станциях для электромобилей.

Таким образом, проведенный анализ позволил выявить в заданной области характерные зоны движения такси. Кластеризация смогла определить не только распределение маршрутов такси, но также их ключевые временные и пространственные закономерности. В частности, как показал анализ, максимальная активность движения наблюдается в вечерний временной интервал 19:00–19:59, а минимальная — в ночной временной интервал 04:00–04:59. Отсюда можно сделать вывод, что зарядную инфраструктуру наиболее целесообразно использовать во временные интервалы с наименьшей активностью движения такси.

Сведения об авторах:

Александр Анатольевич Комяков, доктор технических наук, профессор кафедры «Теоретическая электротехника» Омского государственного университета путей сообщения

Антон Сергеевич Голубков, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта» Омского государственного университета путей сообщения

Юлия Викторовна Заренкова, аспирант кафедры «Теоретическая электротехника» Омского государственного университета путей сообщения

ВЫВОДЫ

В рамках выполненного исследования при использовании алгоритма кластеризации k-means решена задача по объединению начальных и конечных пунктов отправления такси на территории Омска в обоснованные кластеры, что является первым шагом для дальнейшего описания движения автотранспорта с целью размещения зарядной инфраструктуры.

Дальнейшие исследования будут направлены на создание имитационной модели, описывающей движение электромобилей и функционирование эффективной зарядной сети. Для этого планируется построить граф поездок в соответствии с вероятностью заявки такси в конкретный кластер (где в качестве вершин графа будут использованы центроиды «х» образовавшихся кластеров) с учетом ограничений со стороны энергосистемы и городской инфраструктуры.

Authors information:

Alexander A. Komyakov, DSc in Engineering, Professor of Theoretical Electrical Engineering Department, Omsk State Transport University

Anton S. Golubkov, PhD in Engineering, Associate Professor of Electric Power Supply of Railway Transport Department, Omsk State Transport University

Yuliya V. Zarenkova, postgraduate student of Theoretical Electrical Engineering Department, Omsk State Transport University

Литература

1. Транспортная стратегия РФ на период до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года : утв. распоряжением Правительства Российской Федерации от 27.11.2021 г. № 3363-р. URL: <https://rosavtodor.gov.ru/docs/transportnaya-strategiya-rf-na-period-do-2030-goda-s-prognozom-na-period-do-2035-goda> (дата обращения: 24.12.2024).
2. Trofimenko Yu., Komkov V., Donchenko V. Problems and prospects of sustainable low carbon development of transport in Russia. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 177 (2018) 012014. DOI: 10.1088/1755-1315/177/1/012014.
3. Стимулирование развития электротранспорта как инструмент развития территории / Ю. С. Валеева, М. В. Калинина, Т. Г. Зорина, И. Г. Ахметова // Вестник КГЭУ. 2022. № 1 (53). С. 156–173. ISSN 2072-6007.
4. Мишкина А. А., Егоров И. И., Анохин А. Г. Решение задачи размещения-распределения зарядных станций для электромобилей на картах с помощью машинного обучения // *International Journal of Open Information Technologies*. 2024. Vol. 12. No. 3. Pp. 114–121. ISSN 2307-8162.
5. Яковлева Ю. С., Поживилов Н. В. Распределение зарядной инфраструктуры в зависимости от экологических показателей различных районов города Москвы // Современная техника и технологии в электроэнергетике и на транспорте: задачи, проблемы, решения : сборник трудов VII Всероссийской (национальной) научно-практической конференции научных,

References

1. Transport strategy of the Russian Federation for the period up to 2030 with a forecast for the period up to 2035 : approved by the Order of the Government of the Russian Federation dated 27.11.2021 No. 3363-r. URL: <https://rosavtodor.gov.ru/docs/transportnaya-strategiya-rf-na-period-do-2030-goda-s-prognozom-na-period-do-2035-goda> (access date: 24.12.2024). (In Russian).
2. Trofimenko Yu., Komkov V., Donchenko V. Problems and prospects of sustainable low carbon development of transport in Russia. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 177 (2018) 012014. DOI: 10.1088/1755-1315/177/1/012014.
3. Valeeva J. S., Kalinina M. V., Zorina T. G., Akhmetova I. G. Encouraging the development of electric transport as a tool for territorial development. *Vestnik of Kazan State Power Engineering University*. 2022. No. 1 (53). Pp. 156–173. ISSN 2072-6007. (In Russian).
4. Mishkina A., Egorov I., Anyukhin A. Solving the location-allocation problem of charging stations for electric vehicles on maps using machine learning. *International Journal of Open Information Technologies*. 2024. Vol. 12. No. 3. Pp. 114–121. ISSN 2307-8162. (In Russian).
5. Yakovleva Yu. S., Pozhivilov N. V. Distribution of charging infrastructure depending on environmental indicators of various districts of Moscow. *Modern equipment and technologies in the electric power industry and transport: tasks, problems, solutions : proceedings of the 7th All-Russian scientific and practical*

научно-педагогических работников, аспирантов и студентов. Челябинск : Южно-Уральский технологический университет, 2023. С. 237–242.

6. Разработка модуля размещения зарядных станций для электротранспорта на основе использования геоинформационных систем / П. Ю. Бучацкий, С. В. Теплоухов, С. В. Онищенко [и др.] // Вестник Адыгейского государственного университета. Сер.: Естественно-математические и технические науки. 2023. № 3 (326). С. 81–88. DOI 10.53598/2410-3225-2023-3-326-81-88.
7. Piedra-de-la-Cuadra R., Ortega F. A. Bilevel optimization for the deployment of refuelling stations for electric vehicles on road networks // *Computers & Operations Research*. 2024. Vol. 162. Article 106460. DOI: 10.1016/j.cor.2023.106460.
8. Fang H., Yafeng Y., Jing Z. Deploying public charging stations for electric vehicles on urban road networks // *Transportation Research. Part C: Emerging Technologies*. 2015. Vol. 60. Pp. 227–240. DOI: 10.1016/j.trc.2015.08.018.
9. Комяков А. А., Никифоров М. М., Эрбес В. В. Обоснование выбора непараметрических методов математической статистики для оценки эффективности внедрения энергосберегающих устройств на железнодорожном транспорте // Наука, творчество и образование в области электроэнергетики и электротехники — достижения и перспективы : труды Всероссийской научно-практической конференции, Хабаровск, 19–20 ноября 2015 г. Хабаровск : Дальневосточный государственный университет путей сообщения, 2015. С. 86–89.
10. Наркевич А. Н., Виноградов К. А. Методы определения минимально необходимого объема выборки в медицинских исследованиях // *Социальные аспекты здоровья населения*. 2019. № 6 (65). DOI: 10.21045/2071-5021-2019-65-6-10.
11. Steinhaus H. Sur la division des corps matériels en parties // *Bull. Acad. Polon. Sci.* 1956. Vol. IV. No. 12. Pp. 800–804.
12. Lloyd S. Least square quantization in PCM // *Trans. Inf. Theory*. 1982. Vol. IT-28. No. 2. Pp. 120–137.
13. MacQueen J. Some methods for classification and analysis of multivariate observations // *Proc. 5th Berkeley Symp. on Mathematical Statistics and Probability*. 1967. Pp. 281–297.

conference of scientific, scientific and pedagogical workers, postgraduates and students. Chelyabinsk, 2023. Pp. 237–242. (In Russian).

6. Buchatskiy P. Yu., Teploukhov S. V., Onishchenko S. V. [et al.]. The development of a geoinformation system-based module for the placement of charging stations in the context of electric transportation. *The Bulletin of the Adyghe State University. Series «Natural-Mathematical and Technical Sciences»*. 2023. No. 3 (326). Pp. 81–88. DOI 10.53598/2410-3225-2023-3-326-81-88. (In Russian).
7. Piedra-de-la-Cuadra R., Ortega F. A. Bilevel optimization for the deployment of refuelling stations for electric vehicles on road networks. *Computers & Operations Research*. 2024. Vol. 162. Article 106460. DOI: 10.1016/j.cor.2023.106460.
8. Fang H., Yafeng Y., Jing Z. Deploying public charging stations for electric vehicles on urban road networks. *Transportation Research. Part C: Emerging Technologies*. 2015. Vol. 60. Pp. 227–240. DOI: 10.1016/j.trc.2015.08.018.
9. Komyakov A. A., Nikiforov M. M., Erbes V. V. Justification of the choice of nonparametric methods of mathematical statistics for evaluating the effectiveness of the introduction of energy-saving devices in railway transport. *Science, creativity and education in the field of electric power and electrical engineering — achievements and prospects* : proceedings of the All-Russian scientific and practical conference, Khabarovsk, November 19–20, 2015. Khabarovsk : FESTU, 2015. Pp. 86–89. (In Russian).
10. Narkevich A. N., Vinogradov K. A. Methods for determining the minimum required sample size in medical research. *Social aspects of population health*. 2019. No. 6 (65). DOI: 10.21045/2071-5021-2019-65-6-10. (In Russian).
11. Steinhaus H. Sur la division des corps matériels en parties. *Bull. Acad. Polon. Sci.* 1956. Vol. IV. No. 12. Pp. 800–804.
12. Lloyd S. Least square quantization in PCM. *Trans. Inf. Theory*. 1982. Vol. IT-28. No. 2. Pp. 120–137.
13. MacQueen J. Some methods for classification and analysis of multivariate observations. *Proc. 5th Berkeley Symp. on Mathematical Statistics and Probability*. 1967. Pp. 281–297.

Объем статьи 0,73 авторских листа

Научная статья

УДК 656.085

Интегральная оценка состояния безопасности дорожного движения регионального уровня (на примере Удмуртской Республики)

Елена Валерьевна Сорокина¹, Егор Викторович Голов¹, Станислав Сергеевич Евтюков¹¹ Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербург, Россия

Integrated assessment for state of road safety at the regional level (using the example of the Udmurt Republic)

Elena V. Sorokina¹, Egor V. Golov¹, Stanislav S. Evtyukov¹¹ Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, St. Petersburg, Russia

Аннотация

В статье представлены результаты исследования, посвященного обеспечению безопасности дорожного движения на региональном уровне. На примере Удмуртской Республики с использованием двухфакторного дисперсионного анализа выполнена комплексная оценка состояния безопасности дорожного движения, установлена значимость ряда факторов, влияющих на вероятность возникновения дорожно-транспортных происшествий.

Ключевые слова: безопасность дорожного движения, автомобильный транспорт, диагностика автомобильных дорог, дорожно-транспортное происшествие, ровность дорожного покрытия

Abstract

The article presents results of research on ensuring road safety at the regional level. Using the example of the Udmurt Republic, a comprehensive assessment of the state of road safety was carried out using two-factor analysis of variance, and the importance of a number of factors influencing the likelihood of road accidents was established.

Keywords: road safety, road transport, road diagnostics, traffic accident, roughness of road surface

DOI: 10.20291/1815-9400-2025-1-89-96

Современный социально-экономический уровень Российской Федерации характеризуется стремительными темпами автомобилизации, качественным и количественным развитием дорожной сети. Российские дороги становятся безопаснее, однако темпы автомобилизации населения иногда опережают дорожное строительство [1–3]. Общая протяженность дорожной сети страны составляет 1 575,55 тыс. км, в том числе дороги федерального значения — 64,479 тыс. км, регионального — 503,049 тыс. км, местного — 1 008,025 тыс. км [4]. Протяженность автомобильных дорог с распределением по годам (2012–2022 гг.) представлена на рис. 1.

К началу 2000-х гг. стремительные темпы автомобилизации привели к несоответствию транспортно-эксплуатационного состояния сети действующих автомобильных дорог растущим потребностям автомобильного транспорта, что, в свою очередь, провоцирует рост числа и тяжести дорожно-транспортных происшествий (ДТП).

Согласно докладу Всемирной организации здравоохранения о состоянии безопасности дорожного движения (БДД), представленному 13 декабря 2023 г., в период с 2010 г. в мире показатель смертности в дорожно-транспортных происшествиях снизился на 5 % [5], в частности, количество погибших в результате ДТП за 2022 г. составило 1,19 млн чел. Несмотря на это, инциденты на автомобильных дорогах по-прежнему остаются одной из существенных причин смертности трудоспособного населения во всех странах мира. Причем более 60 % случаев гибели в результате ДТП приходятся на граждан трудоспособного возраста 18–59 лет, что наносит колоссальный демографический и, как следствие, социально-экономический ущерб. Наряду с этим от 20 до 50 млн чел. получают травмы различной степени тяжести, что во многих случаях приводит к инвалидности.

Проблема смертности и дорожно-транспортного травматизма остается важнейшей социально-экономической проблемой и для нашей страны [6–10]. Так, за 12 месяцев 2023 г. в России зафиксировано более 130 тыс. ДТП, при этом число погибших превысило 14 тыс. чел., раненых — 166 тыс. чел., что превысило значения аналогичных абсолютных показателей 2022 г. Количественная характеристика аварийности в период с 2019 по 2023 г. представлена на рис. 2 [11].

Управление безопасностью дорожного движения представляет собой комплексную меру, которая должна реализовываться как

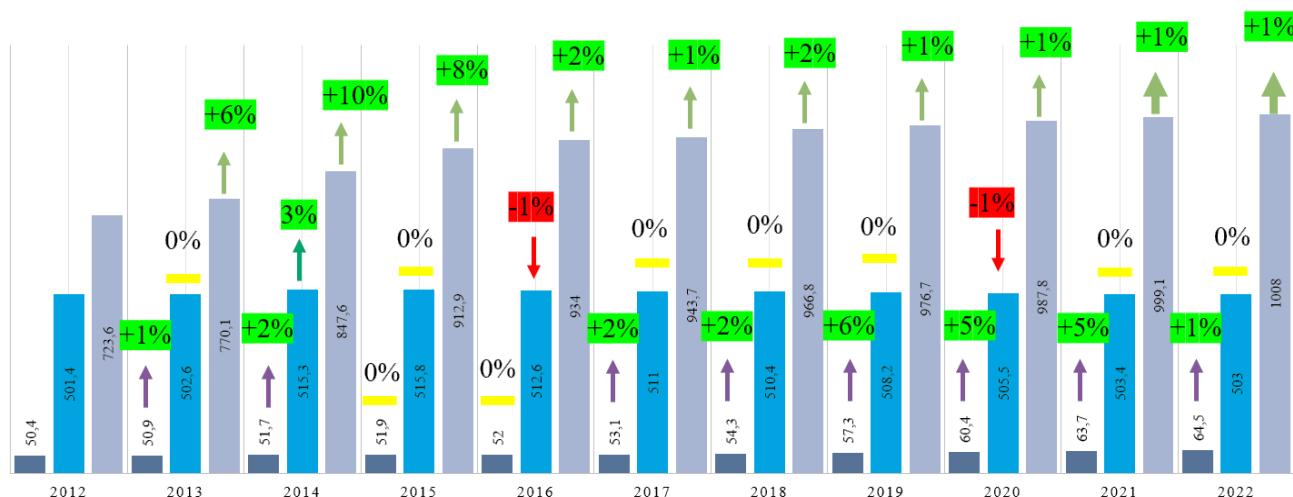


Рис. 1. Протяженность автомобильных дорог Российской Федерации с 2012 по 2022 г., тыс. км:

■ Федерального значения ■ Регионального или межмуниципального значения ■ Местного значения

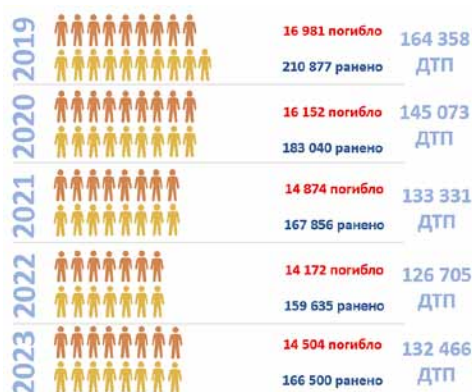


Рис. 2. Показатели аварийности на дорогах России за 2019–2023 гг.

на федеральном, так и на региональном и муниципальном уровнях [12, 13]. В рамках нашего исследования на примере Удмуртской Республики выполнена интегральная оценка состояния БДД регионального уровня. Общая протяженность автомобильных дорог республики — 1771 тыс. км, динамика протяженности автомобильных дорог в период с 2012 по 2022 г. представлена на рис. 3 [4].

В 2023 г. на территории Удмуртской Республики зафиксировано 1 211 ДТП, в которых погибли 129 чел., получили ранение 1 423 чел. За последние пять лет количество дорожных происшествий снизилось на 42 %, число погибших — на 29 %, раненых — на 47 %. Такие положительные результаты достигнуты в первую очередь благодаря всестороннему эффекту от реализации мер, направленных в республике на обеспечение БДД, и улучшению условий на дорогах общего пользования. Динамика основных показателей аварийности в Удмуртской Республике в период с 2019 по 2023 г. представлена на рис. 4 [14].



Рис. 3. Протяженность автомобильных дорог Удмуртской Республики в период с 2012 по 2022 г., тыс. км:

■ Федерального значения ■ Регионального или межмуниципального значения ■ Местного значения

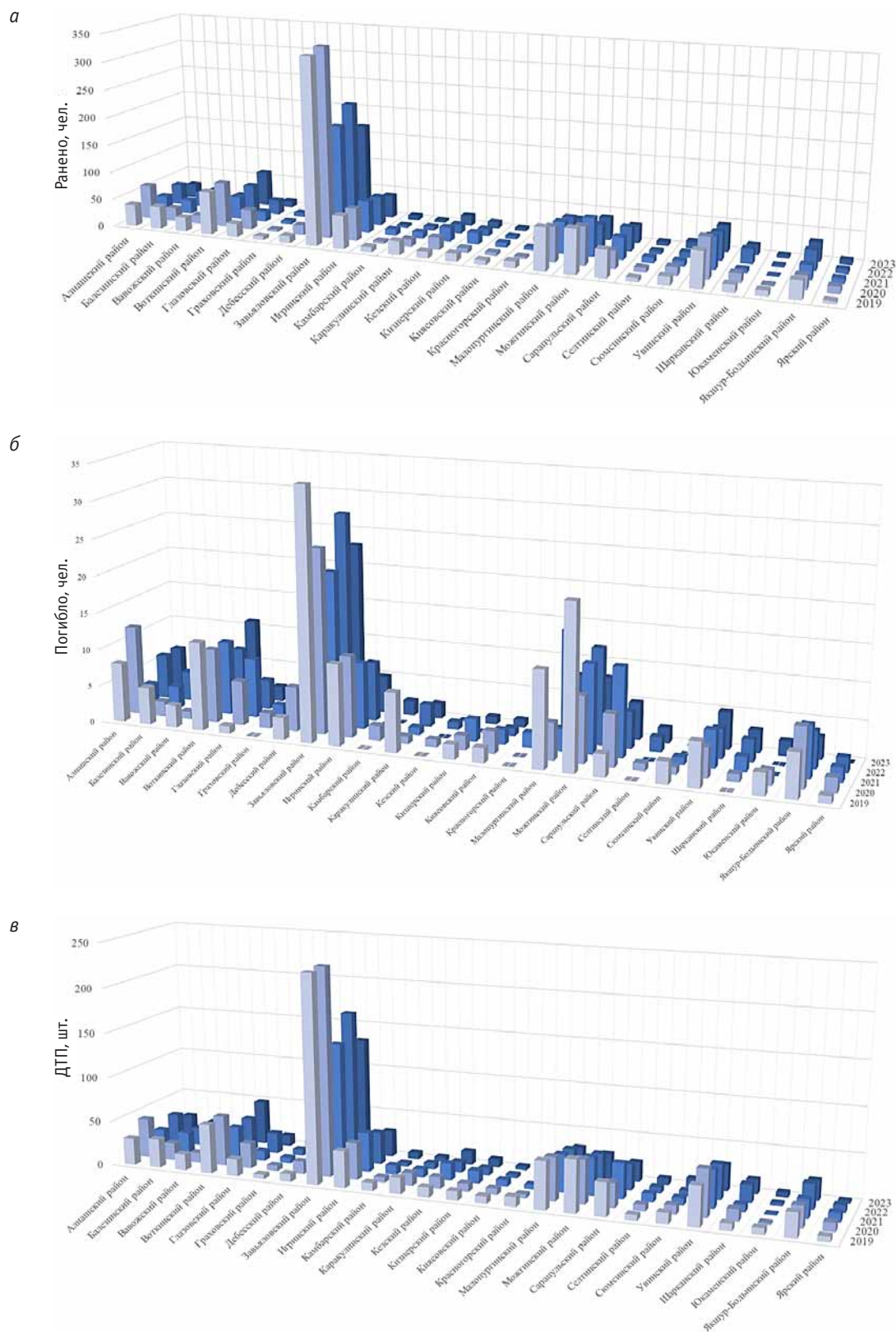


Рис. 4. Динамика основных показателей аварийности в Удмуртской Республике за 2019–2023 гг. с распределением по районам:

а и б — число раненых и погибших в результате ДТП соответственно; *в* — количество ДТП

Как видно из рис. 4, районами, в которых традиционно происходит наибольшее количество ДТП всех видов, являются Завьяловский (в том числе столица республики — Ижевск), Воткинский, Можгинский, Малопургинский, Глазовский, Сарапульский, Увинский, Якшур-Бодьинский. В первую очередь это объясняется близостью расположения городов Ижевска, Глазова, Воткинска, Можги, Сарапула и пос. Увы, а следовательно, более высокой интенсивностью транспортного потока по сравнению с отдаленными от городов районами.

Согласно общепринятым в мировой практике нормативам и стандартам, основной показатель, характеризующий уровень БДД, — число погибших в результате ДТП. Наряду с ним выделяются также и некоторые другие индикаторы различного уровня (макро- и микроскопические).

Среди них:
показатель тяжести ДТП

$$T = \frac{\chi_{\text{погибших}}}{\chi_{\text{раненых}}}, \quad (1)$$

где $\chi_{\text{погибших}}$ и $\chi_{\text{раненых}}$ — соответственно число погибших и раненых в результате ДТП, чел.;

показатель социального риска ДТП (на 100 тыс. населения)

$$C = \frac{\chi_{\text{погибших}}}{N} \cdot 100000, \quad (2)$$

где N — численность постоянного населения субъекта (района), чел.;

показатель транспортного риска ДТП

$$C = \frac{\chi_{\text{погибших}}}{\chi_{\text{ТС}}} \cdot 100000, \quad (3)$$

где $\chi_{\text{ТС}}$ — число зарегистрированных легковых транспортных средств, шт.

Характер изменения основных индикаторов БДД в Удмуртской Республике в течение 2019–2023 гг. представлен на рис. 5.

Как видно из анализа рис. 5, худшие показатели социального и транспортного риска ДТП зафиксированы в Воткинском и Можгинском, наибольшая тяжесть ДТП — в Каракулинском и Юкаменском районах.

С 2000-х гг. в Российской Федерации наблюдается стремительный рост автомобилизации населения. По состоянию на начало 2023 г. на 1000 наших граждан в среднем приходилось 326,9 легковых автомобиля [15]. В Удмуртской Республике этот показатель составил 306,8 транспортных средства (для сравнения: в 2019 г. в республике на 1000 граждан приходилось 299,4 легковых автомобиля).

Увеличение числа транспортных средств провоцирует рост ДТП на автомобильных дорогах и соответственно повышает уровень дорожно-транспортного травматизма. Отсутствие необходимых мер по предотвращению негативного влияния автомобилизации приводит к практической невозможности сдерживать его последствия. При этом, как показывает мировой опыт, использование на государственном уровне программно-целе-

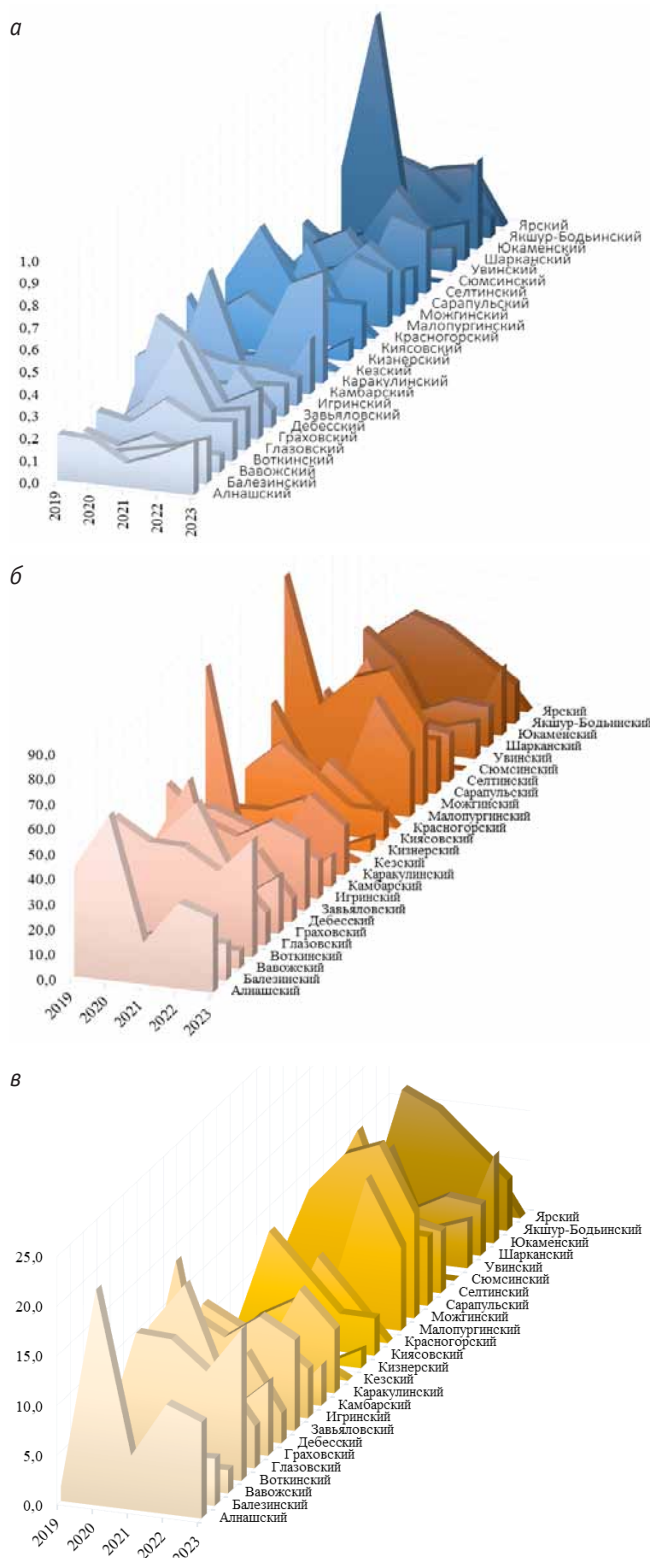


Рис. 5. Динамика основных индикаторов уровня БДД в Удмуртской Республике на автомобильных дорогах регионального или межмуниципального значения за 2019–2023 гг.:

а — в — соответственно показатели тяжести, социального риска, транспортного риска ДТП

вого подхода может обеспечить устойчивое сокращение числа летальных исходов в ДТП на 4–8 % ежегодно даже при росте автопарка.

За последнее десятилетие государственная политика в области обеспечения безопасности дорожного движения в Российской Федерации претерпела существенные изменения. Ключевыми событиями, которые способствовали позитивным переменам, стали Федеральная целевая программа «Повышение безо-

пасности дорожного движения в 2013–2020 годах», а также реализация национального проекта «Безопасные качественные автомобильные дороги» на период с 2019 по 2030 г. Одна из главных целей национального проекта заключается в создании современной, комфортной и надежной транспортной инфраструктуры.

Критически важным компонентом обеспечения БДД являются дорожные условия, а залогом достижения макси-

мального эффекта от реализации обозначенных задач — в первую очередь высокий уровень содержания эксплуатируемой сети автомобильных дорог [16–18].

При проведении дорожно-транспортной экспертизы анализируется множество параметров, от которых зависят безопасность и комфорт движения транспортных средств в границах проезжей части [19–22]. Одним из наиболее значимых факторов является ровность дорожного покрытия. В мировой практике существует более десятка типов показателей ровности, однако в последние годы в экспертном сообществе принята единая система оценки, где в качестве главного критерия принимается международный индекс ровности — International roughness index (IRI), м/км, мм/м. В основе алгоритма определения величины IRI лежит моделирование перемещения эталонной двухмассовой модели со скоростью 80 км/ч, т. е. моделирование реакции на неровности дорожного покрытия со стороны автомобиля. Доли автомобильных дорог общего пользования регионального или межмуниципального значения, не отвечающих нормативным требованиям, для территории всей Российской Федерации и территории Удмуртской Республики в динамике представлены на рис. 6 [4].

Статистические модели распознавания участков дорожной сети с повышенным риском возникновения ДТП представляют собой неотъемлемую часть общей системы выделения ресурсов на повышение безопасности дорожного движения. Чтобы установить прочие признаки, формирующие риск возникновения ДТП, было проанализировано влияние на него интенсивности дорожного движения (рис. 7).

Полученная корреляционная зависимость подтверждает, что интенсивность движения транспортных средств в значительной степени влияет на вероятность возникновения аварии (величина достоверности аппроксимации $R^2 = 0,84$).

Чтобы определить влияние совокупности факторов (интенсивности дорожного движения и ровности дорожного покрытия) на вероятность возникновения ДТП авторами был выполнен двухфакторный (А и В) дисперсионный анализ. В обобщенном случае наблюдения прово-

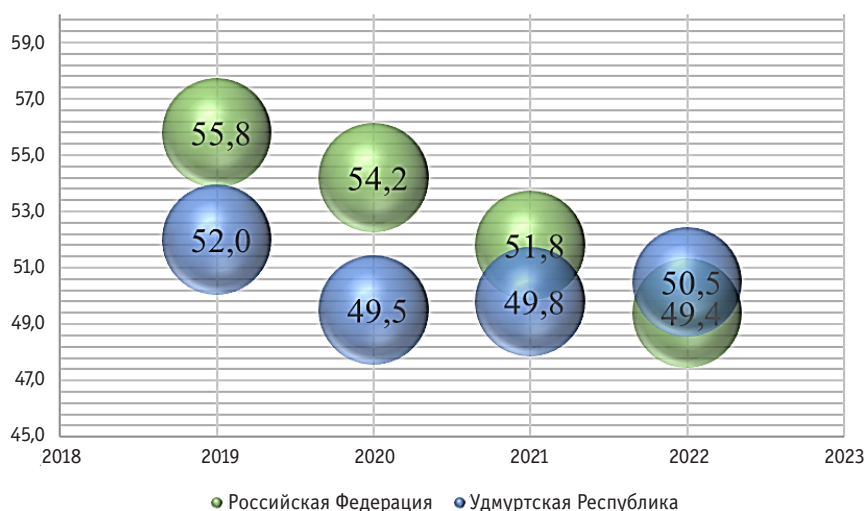


Рис. 6. Доля автомобильных дорог общего пользования Российской Федерации и Удмуртской Республики (регионального и межмуниципального значения), не отвечающих нормативным требованиям

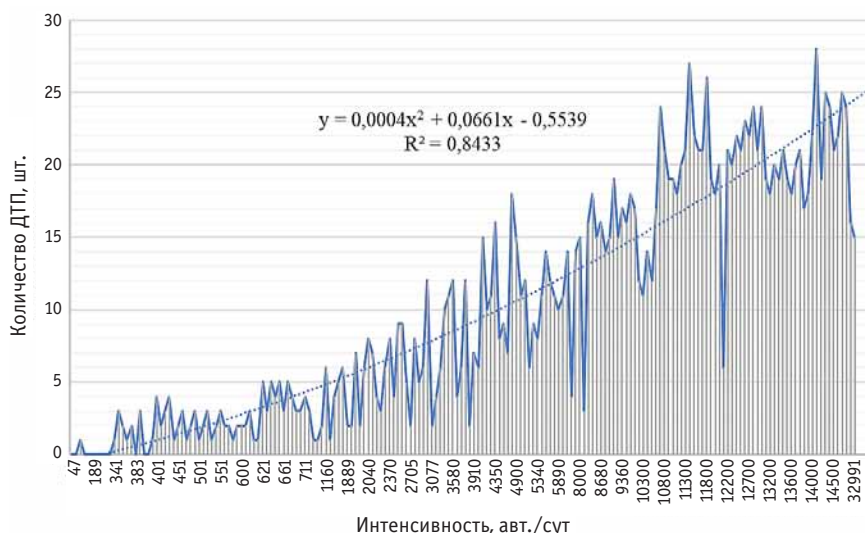


Рис. 7. Влияние интенсивности дорожного движения на риск возникновения дорожно-транспортных происшествий

дятся при I уровнях фактора A и J уровнях фактора B . В каждой ячейке ij имеется n наблюдений. Набор наблюдений в факторном эксперименте с двумя факторами приведен в табл. 1.

Таблица 1

Набор наблюдений в факторном эксперименте

Факторы		Уровни фактора B				
Уровни фактора A	1	1	...	j	...	J
	...	y_{111}, \dots, y_{11n}	...	...	...	...
	i	...	...	y_{ij1}, \dots, y_{ijn}	...	...

	I	...	...	...	...	y_{IJ1}, \dots, y_{IJn}

Для рассматриваемой зависимости в качестве фактора A принималась величина ровности покрытия по шкале IRI, в качестве фактора B — интенсивность дорожного движения (табл. 2).

Таблица 2

Набор наблюдений в факторном эксперименте с двумя факторами

Факторы		В (интенсивность движения), а.м./сут				
		до 500	500–1000	1000–5000	5000–10000	более 10000
A (IRI)	0–2	0	1	1	1	3
	2–4	2	4	2	2	4
	4–6	3	5	4	6	6
	> 6	1	1	2	1	1

В табл. 3 для соответствующих сумм использовались обозначения $x_{i**}, x_{i*j*}, x_{***}$, а для удобства вычислений применялся множитель 10^{-1} количества ДТП на 1 км автомобильной дороги (табл. 3).

Таблица 3

Расчет влияния совокупности факторов на вероятность возникновения ДТП

Факторы	B_1	B_2	B_3	B_4	B_5	x_{i**}
A_1	0	1	1	1	3	6
A_2	2	4	2	2	4	14
A_3	3	5	4	6	6	24
A_4	1	1	2	1	1	6
x_{ij*}	6	11	9	10	14	$50 = x_{***}$

На следующем этапе $\alpha = 0,05$ была выполнена проверка гипотезы о зависимости вероятности наступления ДТП от величины значения ровности дорожного покрытия и интенсив-

ности движения транспортного средства. Результаты вычислений приведены в табл. 4 и 5.

Таблица 4

Числовые параметры для каждой строки и каждого столбца системы

Итоги	Счет	Сумма	Среднее	Дисперсия
Строка 1	5	6	1,2	1,2
Строка 2	5	14	2,8	1,2
Строка 3	5	24	4,8	1,7
Строка 4	5	6	1,2	0,2

Столбец 1	4	6	1,5	1,666667
Столбец 2	4	11	2,75	4,25
Столбец 3	4	9	2,25	1,583333
Столбец 4	4	10	2,5	5,666667
Столбец 5	4	14	3,5	4,333333

Таблица 5

Результаты дисперсионного анализа

Источник вариации	SS	df	MS	F	P -значение	F критическое
Строки	43,8	3	14,6	20,13793	0,000056249	3,490294819
Столбцы	8,5	4	2,125	2,931034	0,066404997	3,259166727
Погрешность	8,7	12	0,725			
Итого	61	19				

Примечание. SS — сумма квадратов, df — степень свободы, MS — оценка дисперсии уровней, F — статистическая значимость.

Основной вывод из полученных результатов заключается в том, что конкурирующая гипотеза может быть принята для фактора A (источник вариации — «выборки»), при этом выполнено неравенство $F > F_{кр}$. P -значение удовлетворяет условию $p < 0,05$. Таким образом, в случае исследования системы, состоящей из этих факторов, вероятность возникновения ДТП в большей степени зависит от ровности дорожного покрытия, чем от интенсивности движения. В свою очередь, следует подчеркнуть, что обеспечение БДД зависит не только от двух рассмотренных нами факторов.

Таким образом, результаты исследования подтверждают, что реализуемые на территории России государственные программы по снижению аварийности на автомобильном транспорте и по обеспечению безопасности дорожного движения эффективны и приводят к позитивным изменениям в транспортном комплексе и дорожной инфраструктуре. В частности, с начала реализации национального проекта в Удмуртской Республике количество дорожно-транспортных происшествий снизилось более чем на 40 %, а число погибших и раненых в результате ДТП — на 29 и 49 % соответственно.

Расчеты веса (коэффициента значимости) факторов, влияющих на вероятность возникновения ДТП (фактор «ровность

дорожного покрытия» и фактор «интенсивность дорожного движения»), позволили определить, что в большей степени вероятности наступления аварии способствует показатель ровности. В целом результаты исследования, выполненного на примере Удмуртской Республики, могут быть взяты за основу принципиально новой методики. Эта методика позволит комплексно оценивать уровень безопасности дорожного движе-

ния на любой территории при условии влияния одновременно совокупности факторов, повышающих риск возникновения ДТП в конкретной критической точке, в том числе с использованием многокритериального метода анализа решений (аппроксимации идеального решения), многофакторного анализа, инструментов и методов кластеризации.

Сведения об авторах:

Елена Валерьевна Сорокина,

аспирант кафедры транспортных систем и дорожно-мостового строительства Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета

Егор Викторович Голов,

кандидат технических наук, доцент кафедры транспортных систем и дорожно-мостового строительства Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета

Станислав Сергеевич Евтюков,

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой транспортных систем и дорожно-мостового строительства Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета

Authors information:

Elena V. Sorokina,

postgraduate student of Transport Systems and Road and Bridge Construction Department, Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering

Egor V. Golov,

PhD in Engineering, Associate Professor of Transport Systems and Road and Bridge Construction Department, Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering

Stanislav S. Evtyukov,

DSc in Engineering, Professor, Head of Transport Systems and Road and Bridge Construction Department, Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering

Литература

1. Evtukov S., Golov E. Adhesion of car tires to the road surface during reconstruction of road accidents // *E3S Web of Conferences : Topical Problems of Green Architecture, Civil and Environmental Engineering, TPACEE-2019*. EDP Sciences, 2020. Vol. 164. DOI: 10.1051/e3sconf/202016403022.
2. Солодкий А. И., Евтюков С. С., Черных Н. В. Цифровая трансформация транспортной отрасли Российской Федерации. Перспективы развития // *Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ)*. 2024. № 1 (76). С. 91–99. ISSN 2079-1364.
3. Новиков А. Н., Шевцова А. Г. Информационное обеспечение транспортно-дорожного комплекса для повышения безопасности дорожного движения : материалы XVI Всероссийской мультиконференции по проблемам управления (МКПУ-2023), Волгоград, 11–15 сентября 2023 г. Волгоград : Изд-во ВГТУ, 2023. Т. 4. С. 158–162.
4. Федеральная служба государственной статистики. URL : <https://rosstat.gov.ru/statistics/transport> (дата обращения: 15.03.2024).
5. Доклад ВОЗ о состоянии безопасности дорожного движения в мире. URL: <https://www.who.int/ru/news/item/13-12-2023-despite-notable-progress-road-safety-remains-urgent-global-issue> (дата обращения: 01.03.2024).
6. Evaluating Road Performance and Condition as Part of Arctic Road and Transport Studies / E. Golov, A. Novikov, S. Evtyukov [et al.] // *International Conference on Engineering Management of Communication and Technology (EMCTECH)*, Vienna, Austria, 2022. DOI: 10.1109/EMCTECH55220.2022.9934041.
7. Evtyukov S., Golov E., Rajczyk Ja. Improving the accuracy of stiffness coefficient calculation when estimating the kinetic energy spent on vehicle deformation // *Architecture and Engineering*. 2020. Vol. 5. No. 1. Pp. 45–50. DOI: 10.23968/2500-0055-2020-5-1-45-50.

References

1. Evtukov S., Golov E. Adhesion of car tires to the road surface during reconstruction of road accidents. *E3S Web of Conferences : Topical Problems of Green Architecture, Civil and Environmental Engineering, TPACEE-2019*. EDP Sciences, 2020. Vol. 164. DOI: 10.1051/e3sconf/202016403022.
2. Solodkiy A. I., Evtyukov S. S., Chernikh N. V. Digital transformation of the transport industry of the Russian Federation development prospects. *Bulletin of the Moscow Automobile and Road Construction Institute (State Technical University)*. 2024. No. 1 (76). Pp. 91–99. ISSN 2079-1364. (In Russian).
3. Novikov A. N., Shevtsova A. G. Information support of the transport and road complex for improving road safety : proceedings of the 16th multi-conference on management issues, Volgograd, September 11–15, 2023. Volgograd, 2023. Vol. 4. Pp. 158–162. (In Russian).
4. Federal Service for State Statistics. URL : <https://rosstat.gov.ru/statistics/transport> (access date: 15.03.2024). (In Russian).
5. WHO report on the state of road safety in the world. URL: <https://www.who.int/ru/news/item/13-12-2023-despite-notable-progress-road-safety-remains-urgent-global-issue> (access date: 01.03.2024). (In Russian).
6. Golov E., Novikov A., Evtyukov S. [et al.]. Evaluating Road Performance and Condition as Part of Arctic Road and Transport Studies. *International Conference on Engineering Management of Communication and Technology (EMCTECH)*, Vienna, Austria, 2022. DOI: 10.1109/EMCTECH55220.2022.9934041.
7. Evtyukov S., Golov E., Rajczyk Ja. Improving the accuracy of stiffness coefficient calculation when estimating the kinetic energy spent on vehicle deformation. *Architecture and Engineering*. 2020. Vol. 5. No. 1. Pp. 45–50. DOI: 10.23968/2500-0055-2020-5-1-45-50.

8. Indicators of Road Safety as a Phenomenon of National Security of the State / A. Kvitchuk, M. Kvitchuk, S. Evtuykov, E. Golov // *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2022. Vol. 247. Pp. 159–168. DOI: 10.1007/978-3-030-80946-1_16.
9. Influence of the road surface roughness (according to the International Roughness Index) on road safety / E. Golov, S. Evtuykov, M. Protsuto [et al.] // *Transp. Res. Proc.* 2022. No. 63. Pp. 999–1006. DOI: 10.1016/j.trpro.2022.06.099.
10. Диагностика состояния подсистемы «Дорога» в системе ВАДС / Ю. Э. Васильев, Я. В. Васильев, С. А. Евтюков [и др.]. Санкт-Петербург : Петрополис, 2019. 298 с.
11. Государственный доклад о состоянии безопасности дорожного движения в Российской Федерации по итогам 2023. URL: <https://xn--90adear.xn--p1ai/upload/site1000/folder/original/downloads/gd2023.pdf> (дата обращения: 01.03.2024).
12. Голов Е. В. Фактор скорости в системе безопасности дорожного движения // *Вестник гражданских инженеров*. 2021. № 3 (86). С. 139–148. DOI: 10.23968/1999-5571-2021-18-3-139-148.
13. Формирование трехмерной пространственно-следовой базы исходных данных с использованием сканирующих беспилотных летательных аппаратов и ее интеграция в модельно-ориентированную реконструкцию дорожно-транспортных происшествий / Е. В. Голов, С. А. Евтюков, А. П. Андреев, Е. В. Сорокина // *Транспорт Урала*. 2022. № 1 (72). С. 74–79. DOI: 10.20291/1815-9400-2022-1-74-79.
14. Показатели состояния безопасности дорожного движения. URL: <http://stat.gibdd.ru/> (дата обращения: 01.03.2024).
15. Федеральная служба государственной статистики. URL: <https://rosstat.gov.ru/> (дата обращения: 20.02.2024).
16. Многомерный анализ распределения дорожно-транспортных происшествий на дорожной сети Ленинградской области / Е. В. Сорокина, В. В. Шпет, Я. Д. Гончарова, Е. В. Голов // *Транспортное дело России*. 2023. № 1. С. 294–297. DOI: 10.52375/20728689_2023_1_297.
17. Куракина Е. В., Склярова А. А. Повышение уровня безопасности дорожного движения в системе «участник дорожного движения — транспортное средство — дорога — внешняя среда» // *Вестник СибАДИ*. 2020. Т. 17. № 4 (74). С. 488–499. DOI: 10.26518/2071-7296-2020-17-4-488-499.
18. Голов Е. В., Сорокина Е. В., Евтюков С. С. Проблемные вопросы использования спутниковой навигации при оценке состояния факторов «дорога» и «среда» в системе ВАДС // *Вестник гражданских инженеров*. 2022. № 4 (93). С. 141–150. DOI: 10.23968/1999-5571-2022-19-4-141-150.
19. Доброборский Б. С., Медрес Е. Е., Солодкий А. И. Об оценке безопасности дорожного движения по критерию вероятности ошибок водителей // *Транспортное дело России*. 2023. № 2. С. 130–132. DOI: 10.52375/20728689_2023_2_130.
20. Медрес Е. Е., Черных Н. В., Солодкий А. И. Повышение эффективности управления безопасностью дорожного движения на улично-дорожной сети агломерации // *Транспортное дело России*. 2023. № 3. С. 172–174. DOI: 10.52375/20728689_2023_3_172.
21. Куракина Е. В., Кравченко П. А. Метод оценки состояния целевых показателей и индикаторов в системе безопасности дорожного движения // *Грузовик*. 2024. № 6. С. 35–38. DOI: 10.36652/1684-1298-2024-6-35-38.
22. Коломеец А. А., Куракина Е. В. Оценка влияния технических параметров дороги на вероятность возникновения ДТП // *Грузовик*. 2024. № 8. С. 38–42. DOI: 10.36652/1684-1298-2024-8-38-42.
8. Kvitchuk A., Kvitchuk M., Evtuykov S., Golov E. Indicators of Road Safety as a Phenomenon of National Security of the State. *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2022. Vol. 247. Pp. 159–168. DOI: 10.1007/978-3-030-80946-1_16.
9. Golov E., Evtuykov S., Protsuto M. [et al.]. Influence of the road surface roughness (according to the International Roughness Index) on road safety. *Transp. Res. Proc.* 2022. No. 63. Pp. 999–1006. DOI: 10.1016/j.trpro.2022.06.099.
10. Vasiliev Yu. E., Vasiliev Ya. V., Evtuykov S. A. [et al.]. Diagnostics for condition of the «Road» subsystem in the «driver — car — road — environment» system. St. Petersburg : Petropolis, 2019. 298 p. (In Russian).
11. State report on the state of road safety in the Russian Federation by the end of 2023. URL: <https://xn--90adear.xn--p1ai/upload/site1000/folder/original/downloads/gd2023.pdf> (access date: 01.03.2024). (In Russian).
12. Golov E. V. Speed factor in the road safety system. *Bulletin of Civil Engineers*. 2021. No. 3 (86). Pp. 139–148. DOI: 10.23968/1999-5571-2021-18-3-139-148. (In Russian).
13. Golov E. V., Evtuykov S. A., Andreev A. P., Sorokina E. V. Creation of 3D spatial and tracking base of initial data with the use of scanning unmanned aerial vehicles and its integration into model-oriented reconstruction of traffic accidents. *Transport of the Urals*. 2022. No. 1 (72). Pp. 74–79. DOI: 10.20291/1815-9400-2022-1-74-79. (In Russian).
14. Road safety indicators. URL: <http://stat.gibdd.ru/> (access date: 01.03.2024). (In Russian).
15. Federal Service for State Statistics. URL: <https://rosstat.gov.ru/> (access date: 20.02.2024). (In Russian).
16. Sorokina E. V., Shpet V. V., Goncharova Ya. D., Golov E. V. Multi-dimensional analysis of the distribution of road accidents in the Leningrad region road network. *Transport business of Russia*. 2023. No. 1. Pp. 294–297. DOI: 10.52375/20728689_2023_1_297. (In Russian).
17. Kurakina E. V., Sklyarova A. A. Road safety improvement in road traffic participant — vehicle — road — external environment system. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2020. Vol. 17. No. 4 (74). Pp. 488–499. DOI: 10.26518/2071-7296-2020-17-4-488-499. (In Russian).
18. Golov E. V., Sorokina E. V., Evtuykov S. S. Problematic issues of using satellite navigation in assessing the state of the «Road» and «Environment» factors in the DCRE system. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2022. No. 4 (93). Pp. 141–150. DOI: 10.23968/1999-5571-2022-19-4-141-150. (In Russian).
19. Dobroborsky B. S., Medres E. E., Solodky A. I. On the assessment of road safety by the criterion of the probability of driver errors. *Transport business of Russia*. 2023. No. 2. Pp. 130–132. DOI: 10.52375/20728689_2023_2_130. (In Russian).
20. Medres E. E., Chernykh N. V., Solodky A. I. Improving the efficiency of road safety management in the agglomeration's road network. *Transport business of Russia*. 2023. No. 3. Pp. 172–174. DOI: 10.52375/20728689_2023_3_172. (In Russian).
21. Kurakina E. V., Kravchenko P. A. Method for assessing the state of targets and indicators in the road safety system. *Gruzovik*. 2024. No. 6. Pp. 35–38. DOI: 10.36652/1684-1298-2024-6-35-38. (In Russian).
22. Kolomeets A. A., Kurakina E. V. Assessment for impact of technical parameters of road on the likelihood of a traffic accident. *Gruzovik*. 2024. No. 8. Pp. 38–42. DOI: 10.36652/1684-1298-2024-8-38-42. (In Russian).

Научная статья

УДК 621.315.65 (08)

Результаты экспериментальных исследований работы RFID-системы контроля изоляторов в опытно-промышленной эксплуатации

Татьяна Анатольевна Несенюк¹¹ Уральский государственный университет путей сообщения, Екатеринбург, Россия

Results of experimental studies of RFID insulator control system in pilot operation

Tatyana A. Nesenyuk¹¹ Ural State University of Railway Transport, Ekaterinburg, Russia

Аннотация

В статье представлены результаты исследования, выполненного на участке Свердловской железной дороги по программе и методикам в рамках проекта «Система RFID-контроля штыревых изоляторов для линий СЦБ». Цель исследования — опробование и анализ опытно-промышленной эксплуатации системы RFID-контроля, определение зоны уверенного считывания. Рассмотрены принципы и особенности работы системы RFID-контроля. Сделана выборка результатов измерений дистанций от считывателя до опоры при устойчивой фиксации отклика RFID-индикатора. Выполнено распределение результатов измерений по частичным интервалам. Построена гистограмма относительных частот, получено уравнение линии тренда. Определены основные направления использования RFID-системы для контроля изоляторов на воздушных линиях электропередачи.

Ключевые слова: воздушная линия электропередачи, бесконтактная диагностика изоляторов, автоматизированная система RFID-контроля и учета изоляторов, штыревой изолятор, RFID-индикатор, RFID-регистратор

Abstract

The article presents the results of a study conducted according to the program and methods within the framework of the project «RFID control system of pin insulators for signalling, centralization and blocking lines» on the site of the Sverdlovsk railway. Purpose of study is to test and analyze the pilot operation of the RFID control system, to determine the zone of confident reading. The principles of operation and research features of the RFID control system are given. A sample of measurement results of the distances from the reader to the support was made with a stable fixation of the response of the RFID indicator. The distribution of measurement results over partial intervals has been performed. A histogram of relative frequencies is constructed, and the equation of the trend line is obtained. The main directions of using the RFID system for monitoring insulators on overhead power lines have been determined.

Keywords: overhead power line, contactless diagnostics of insulators, automated RFID monitoring and metering system for insulators, pin insulator, RFID indicator, RFID recorder

DOI: 10.20291/1815-9400-2025-1-97-101

ВВЕДЕНИЕ

Задача, связанная с поиском дефектов в изоляторах воздушной линии (ВЛ) электропередачи, до сих пор остается актуальной, так как неисправные изоляторы приводят к аварийным ситуациям в системе электроснабжения, что наносит значительный (в десятки миллионов рублей) ущерб энергосетевым компаниям.

Автор в своих предыдущих статьях [1, 2] проанализировала классические способы контроля изоляции и рассмотрела особенности разработанной ею бесконтактной автоматизированной системы RFID-контроля для изоляторов воздушной линии электропередачи с учетом принципов использования и преимуществ RFID-системы [3, 4].

Отличие автоматизированной системы RFID-контроля изоляторов заключается в том, что ее можно внедрять не только на действующих линиях электропередачи, но и при монтаже новых линий различного уровня напряжения, а также вносить результаты технического обслуживания, полученные во время эксплуатации, в базу данных паспорта изделий. Благодаря уникальному коду RFID-индикатора обеспечивается автоматический учет и контроль оборудования, фиксируется дата обхода бригадой линии электропередачи, определяется точное место расположения исправного и дефектного оборудования, могут устанавливаться сроки технического обслуживания и ремонта по состоянию оборудования, согласовываться наряды-допуски с определением квалификации персонала, графика движения поездов, климатических и эксплуатационных факторов.

Особенности разработки RFID-индикаторов для штыревых изоляторов и результаты лабораторных испытаний образцов изделий рассмотрены в [5–7]. Исследования проводились Уральским центром диагностики оборудования совместно с Южноуральским арматурно-изоляторным заводом в сертифицированных лабораториях завода и в испытательном центре технических средств железнодорожного транспорта Уральского государственного университета путей сообщения. При разработке RFID-индикатора предусматривалось выполнение общетехнических условий ГОСТа 1232–2017 [8], осуществлялся пробой изоляторов, изучались срабатывание индикатора и работа регистрирующего устройства в автоматическом режиме. В результате исследования пассивные RFID-индикаторы для штыревых фарфоровых линейных изоляторов на напряжение 10 и 20 кВ типа ШФ-10, ШФ-20, ШФ-20Е, ШФ20-Г, выпускаемых

заводом, и штыревых стеклянных изоляторов типа ШС-10, ШС-20, а также прототипы регистратора и программное обеспечение, демонстрирующее диэлектрическое состояние изоляторов. RFID-индикатор крепился к изолятору и передавал регистратору данные о местоположении (номере опоры, геолокации) и о диэлектрическом состоянии изоляторов (нормальном или с нарушением диэлектрических свойств).

В данной статье рассмотрены результаты опытно-промышленных испытаний системы автоматизированного RFID-контроля на действующих участках линий сигнализации, централизации и блокировки (СЦБ) Свердловской дистанции электроснабжения — структурного подразделения Свердловской дирекции по энергообеспечению — структурного подразделения Трансэнерго — филиала ОАО «РЖД». Цель испытаний — опробование работоспособности системы автоматизированного RFID-контроля в условиях эксплуатации.

При проведении испытаний проверялись основные характеристики системы: регистрация считывающим устройством RFID-индикаторов, закрепленных к штыревым изоляторам линий СЦБ;

определение зоны действия установленных RFID-индикаторов на опорах воздушной линии прототипом переносного считывающего устройства при включенной и отключенной линии;

соответствие монтажа индикаторов на штыревых изоляторах технологической карте;

фиксация отклика индикаторов на площадках (участках) переносным считывающим устройством;

визуализация отклика индикаторов с применением программного обеспечения.

Для измерения диаграммы направленности индикаторов, установленных на опорах ВЛ, включали переносной считыватель, оператор двигался вокруг опоры, где на изоляторах были закреплены RFID-индикаторы, и через каждые 30° измерял максимальную длину, при которой осуществлялось считывание RFID-индикатора (рис. 1). Считывание определялось звуковыми сигналами и индикацией уникального номера на экране считывающего устройства. Дополнительно визуализация отклика индикаторов

фиксировалась с помощью программного обеспечения. На экране монитора в онлайн-режиме появлялось изображение опоры с изоляторами, при отклике индикатора начальный красный цвет менялся на зеленый.

Результаты измерений были проанализированы с использованием метода математической статистики. Так как опытные данные носят характер случайных явлений, то необходимый минимальный объем выборки, обеспечивающий точность измерений, определяли по формуле [9]

$$n = \frac{t^2 \cdot \sigma^2}{\delta^2}, \quad (1)$$

где аргумент t находится из равенства по таблице функции Лапласа $\Phi(t)$

$$\Phi(t) = \gamma/2, \quad (2)$$

при этом $2\Phi(t) = 0,95$, тогда $\Phi(t) = 0,475$ и $t = 1,96$ [2].

Исходное множество данных составило $N = 371$ измерение. Тогда при требу-

емой точности $\delta = 0,5$ м с надежностью $\gamma = 0,95$ и при среднем квадратичном отклонении $\sigma = 3$

$$n = \frac{1,96^2 \cdot 3^2}{0,5^2} = \frac{3,84 \cdot 9}{0,25} = 138,3.$$

Таким образом, исследовали выборку при $n = 140$ измерений, которую определили произвольным образом по результатам, полученным на опорах линии СЦБ (табл. 1).

На основании данных табл. 1 получены две случайные величины — угол измерений (α) и расстояние приема сигнала (S), связанные корреляционной зависимостью. Распределение результатов измерений по частичным интервалам (рядом), которые определяют количество числовых попаданий в заданном интервале, приведено в табл. 2.

Условные средние рассчитаны по формуле [6]

$$\tilde{S}_{ca} = \frac{\sum S_{ci} \cdot m_{ai}}{\sum m_{ai}}. \quad (3)$$

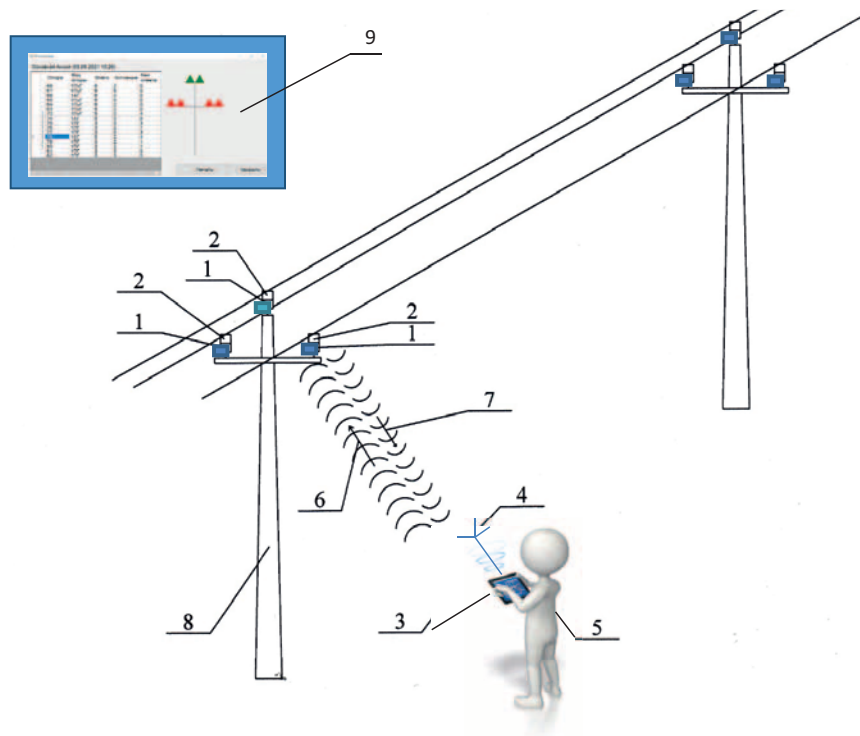


Рис. 1. Автоматизированная система RFID-контроля изоляторов:

- 1 — RFID-индикатор; 2 — изолятор; 3 — регистратор; 4 — антенна регистратора; 5 — обходчик; 6 — зондирующий сигнал от регистратора; 7 — сигнал от RFID-индикатора; 8 — опора воздушной линии электропередачи; 9 — экран монитора

Таблица 1

Выборка результатов измерения расстояний от считывателя до опоры при устойчивой фиксации отклика RFID-индикатора

№ опоры	№ индикатора	Угол измерений, град						
		0	30	60	90	120	150	180
63	1C5B	3	7,6	10	15,3	12,7	11,5	8
64	4C5B	3	6,5	7	10,7	10,4	8,8	8
65	545B	5	12	14,5	9,1	6,5	6,5	8,7
67	CC5D	5	7,4	12,3	8,4	8	6,5	5
	C45D	5	10,9	11,6	5	10,3	9,4	3,2
	205B	3	7,3	7,6	11,5	8	6,5	8,9
73	645B	13,7	15	7,8	4,5	4,7	5,7	5
74	C85D	15	4,4	8,9	3,7	4	4,5	6,2
	D45D	15	13,4	10,4	3,7	4	6,4	5,6
75	C45D	2,3	6,7	7,2	13,3	11	5,7	8
	D85D	5,7	6,7	7,2	13,3	5	6,2	11
77	E52C	11	12,3	11,8	6	8,1	8,1	11,3
	052C	11	12,4	11	7,3	8,4	8	11,3
78	392C	6,5	7,3	6,2	7,5	7,4	7,8	8,5
79	B526	9,6	9	8,4	13,3	12,8	11,5	12,3
80	B92C	8	12	11,5	10,4	10	7	7,8
81	092C	6,5	7,1	8,5	13,6	15,4	13,1	12,5
	D52B	9	7,1	8,4	13,6	15,4	13,1	11,4
	D52C	6	1,1	8,4	14	13,2	11	9
82	5D2B	10,1	5,2	6,5	8,4	5,7	5	2,2

Таблица 2

Распределение результатов измерений по частичным интервалам (разрядам)

Частичные интервалы (разряды) S_i	Середина разряда S_{ci}	Угол измерений α_i , град/рад							Сумма частоты по строкам $\sum m_{si}$
		0	30	60	90	120	150	180	
2–4	3	4	1	0	2	2	0	2	11
4–6	5	5	2	0	3	3	4	3	20
6–8	7	3	9	7	2	4	8	5	38
8–10	9	2	1	6	3	3	3	4	22
10–12	11	3	3	5	3	3	3	4	24
12–14	13	1	3	1	7	3	2	2	19
14–16	15	2	0	1	1	2	0	0	6
Сумма частоты по столбцам $\sum m_{ai}$		20	19	20	21	20	20	20	140
Условные средние \tilde{S}_{ca}		7,6	8,26	9,3	7,67	8,9	8,1	8,1	

Таблица 3

Характеристики результатов измерений

Выборочная характеристика	Значение характеристики						
Середина интервала S_{ci}	3	5	7	9	11	13	15
Середина интервала в квадрате S_{ci}^2	9	25	49	81	121	169	225
Число наблюдений $\sum m_{si}$	11	20	38	22	24	19	6
Частота P_i	0,08	0,14	0,27	0,15	0,17	0,14	0,04
Плотность относительной частоты b_i	0,04	0,07	0,135	0,075	0,085	0,07	0,02

Исходя из распределения результатов измерений по частичным интервалам (разрядам) (см. табл. 2) определены выборочные характеристики:

выборочный начальный момент — выборочная средняя \tilde{S}_{bc} — статистический аналог математического ожидания;

выборочная дисперсия σ — аналог дисперсии — выборочное среднее квадратичное отклонение.

Частота P_i и плотность относительной частоты b_i рассчитаны по формулам:

$$P_i = \frac{\sum m_{si}}{n}; \quad b_i = \frac{P_i}{h}, \quad (4)$$

где $h = 2$ — длина частичного интервала.

С использованием данных табл. 3 была построена гистограмма распределения (рис. 2).

Построенная гистограмма относительных частот имеет вид нормального характера теоретического распределения.

Выборочная средняя вычислена следующим образом:

$$\tilde{S}_{bc} = \sum S_{ci} \cdot P_i. \quad (5)$$

Выборочная дисперсия рассчитана по формуле [1, 2]

$$\sigma^2 = \sum S_{ci}^2 \cdot P_i - (\tilde{S}_{bc})^2, \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \sigma^2 &= (0,5143 + 4,7321 + 13,3 + 17,6464 + \\ &+ 15,125 + 16,2964 + 9,6429) - 8,472^2 = \\ &= 9,1946. \end{aligned}$$

Выборочная средняя равна $\tilde{S}_{bc} = 8,47$ и является статистическим анализом математического ожидания. По выборочной дисперсии определено выборочное среднее квадратичное отклонение $\sigma =$

$= \sqrt{\sigma^2} = \sqrt{9,1946} = 3,03$. Таким образом, доверительный интервал для оценки математического ожидания составил

$$(8,25 - 0,5; 8,25 + 0,5) = (7,75; 8,75).$$

Зависимость между средними \tilde{S}_{ca} и углами α_i изображена на рис. 3.

Точечная линия регрессии устанавливает форму корреляционной связи между переменными α_i и \tilde{S}_{ca} . По результа-

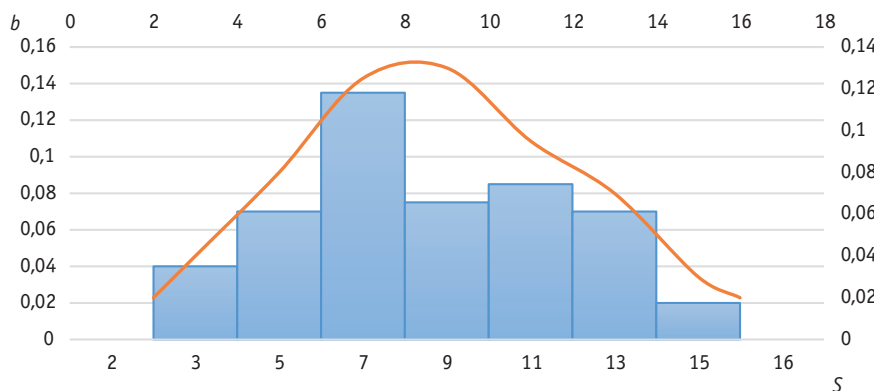


Рис. 2. Гистограмма частоты и плотности распределения в заданных интервалах

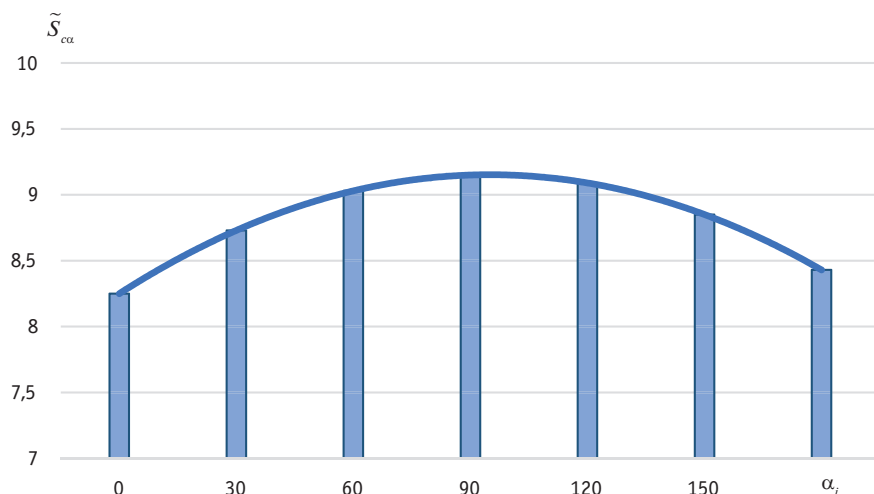


Рис. 3. Эмпирическая линия регрессии $\tilde{S}_{св} = f(\alpha_i)$

там исследований получено уравнение линии тренда

$$\tilde{S}_{св} = 0,0093x^2 + 0,0676x - 0,0133. \quad (7)$$

Результаты исследования показали, что среднее $\tilde{S}_{св}$ имеет наибольшее значение при угле 90° . Углы измерений от 0 до 180° были выбраны исходя из того, что расположение железнодорожного пути будет составлять примерно 90° по

отношению к опоре линии СЦБ, сама линия СЦБ проложена вдоль железнодорожного пути. При проезде вагон-испытательной лаборатории контактной сети уверенное считывание будет производиться с наибольшей вероятностью за счет максимального попадания в зону приема-передачи сигнала.

Исследования подтвердили регистрацию RFID-индикаторов штыревых изоляторов линий СЦБ в качестве прототипа

считывающего устройства на действующей линии, о чем свидетельствуют результаты измерений с зонами действия приема-передачи сигналов между RFID-индикаторами и переносным считывающим устройством при включенной и отключенной действующей линии.

Как показали исследования, бесконтактную радиочастотную диагностику следует производить под углом $90 \pm 30^\circ$, где определена максимальная дальность считывания, что соответствует уверенному считыванию. Наивысшая вероятность считывания при проезде на вагон-испытательной лаборатории контактной сети определяется выявленной зоной приема-передачи сигнала. Для расширения зоны следует увеличить сигнал от считывающего устройства за счет усиления его мощности, а также за счет выбора антенн и их размещения в сторону изоляторов.

При испытаниях были выявлены некоторые нарушения в технологии крепления RFID-индикаторов к изолятору. В качестве решения предложены разработка технологической карты по креплению RFID-индикаторов и обучение персонала. В настоящее время проводятся исследования по усовершенствованию индикаторов и их монтажа для установки на новых и действующих линиях высокого, среднего, низкого напряжения воздушной линии электропередачи, а также по применению индикаторов на изоляторах контактной сети постоянного и переменного тока и по диагностике искрового промежутка. На основе использования разработанных алгоритмов анализа данных результаты RFID-контроля, поступающие в интеграционную платформу [10], помогут снизить эксплуатационные расходы, сократить время на поиск неисправности, перейти от периодических ремонтов к ремонтам по состоянию, снизить количество аварийных ситуаций.

Автор выражает благодарность Николаю Павловичу Чуеву — за помощь в анализе полученных результатов опытно-промышленных испытаний, а также Игорю Александровичу Пятецкому, начальнику Дорожной электротехнической лаборатории, и Максиму Владимировичу Григорьеву, главному инженеру Свердловской дистанции электроснабжения — структурного подразделения Свердловской дирекции по энергообеспечению — структурного подразделения Трансэнерго — филиала ОАО «РЖД», — за организацию установки RFID-индикаторов на изоляторы участков линий СЦБ и проведения опытно-промышленных испытаний.

Сведения об авторе:

Татьяна Анатольевна Несенюк,

кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрические машины» Уральского государственного университета путей сообщения

Author's information:

Tatyana A. Nesenjuk,

PhD in Engineering, Associate Professor of Electric Machinery Department, Ural State University of Railway Transport

Литература

1. Несенюк Т. А., Галкин А. Г. Эксплуатационный аэромобильный контроль воздушной линии электропередачи беспилотным летательным аппаратом // Транспорт Урала. 2017. № 2 (53). С. 64–72. DOI: 10.20291/1815-9400-2017-2-64-72.
2. Несенюк Т. А. Радиочастотная идентификация для автоматизированного контроля изоляторов // Энергетическая безопасность и энергосбережение. 2018. № 5. С. 45–51. DOI: 10.18635/2071-2219-2018-5-45-51.
3. Maderböck M., Ussmueller T. Multicarrier communication for UHF RFID: increased reliability and coverage for UHF RFID systems // IEEE Microwave Magazine. 2023. Vol. 24. No. 10. Pp. 51–58. DOI: 10.1109/MMM.2023.3293636.
4. Chatzistefanou A. R., Sergiadis G., Dimitriou A. G. Taglocalization by handheld UHF RFID reader with optical and RFID landmarks // IEEE Journal of Radio Frequency Identification. 2023. Vol. 7. Pp. 330–340. DOI: 10.1109/JRFID.2023.3238822.
5. Способ контроля состояния изоляторов в труднодоступных участках линии электропередачи и система для его осуществления / Т. А. Несенюк : патент 2771083 Российская Федерация. № 2021120455; заявл. 12.07.2021; опубл. 26.04.2022, Бюл. № 12.
6. Несенюк Т. А., Соколов В. Н. Исследование влияния климатических факторов на штыревые изоляторы с RFID-индикаторами // Известия Транссиба. 2021. № 2 (46). С. 31–40. ISSN 2220-4245.
7. Несенюк Т. А., Соколов В. Н., Гончарь П. С. Опыт-но-промышленные испытания системы RFID-контроля изоляторов // Транспорт Урала. 2022. № 2 (73). С. 103–110. DOI: 10.20291/1815-9400-2022-2-103-110.
8. ГОСТ 1232–2017. Изоляторы линейные штыревые фарфоровые и стеклянные на напряжение от 1 до 35 кВ. Москва : Стандартинформ, 2017. 32 с.
9. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика. Москва : Юрайт, 2024. 479 с.
10. Несенюк Т. А. Разработка платформы системы контроля и учета объектов технической эксплуатации // Железнодорожный транспорт и технологии : сборник трудов Международной научно-практической конференции. Екатеринбург : Изд-во УрГУПС, 2024. С. 398–402.

References

1. Nesenjuk T. A., Galkin A. G. Operational aeromobile control of the overhead transmission line with the unmanned aerial vehicle. *Transport of the Urals*. 2017. No. 2 (53). Pp. 64–72. DOI: 10.20291/1815-9400-2017-2-64-72. (In Russian).
2. Nesenjuk T. A. Radio frequency identification for automated control of insulators. *Energy Safety and Energy Economy*. 2018. Issue 5. Pp. 45–51. DOI: 10.18635/2071-2219-2018-5-45-51. (In Russian).
3. Maderböck M., Ussmueller T. Multicarrier communication for UHF RFID: increased reliability and coverage for UHF RFID systems. *IEEE Microwave Magazine*. 2023. Vol. 24. No. 10. Pp. 51–58. DOI: 10.1109/MMM.2023.3293636.
4. Chatzistefanou A. R., Sergiadis G., Dimitriou A. G. Taglocalization by handheld UHF RFID reader with optical and RFID landmarks. *IEEE Journal of Radio Frequency Identification*. 2023. Vol. 7. Pp. 330–340. DOI: 10.1109/JRFID.2023.3238822.
5. Nesenjuk T. A. Method for monitoring the condition of insulators in hard-to-reach sections of a powerline and a system for its implementation : patent 2771083 Russian Federation. No. 2021120455; filed 12.07.2021; publ. 26.04.2022, Bulletin No. 12. (In Russian).
6. Nesenjuk T. A., Sokolov V. N. Study of the influence of climatic factors for pin insulators with RFID indicators. *Journal of Transsib Railway Studies*. 2021. No. 2 (46). Pp. 31–40. ISSN 2220-4245. (In Russian).
7. Nesenjuk T. A., Sokolov V. N., Gonchar P. S. Pilot tests of system for RFID-control of insulators. *Transport of the Urals*. 2022. No. 2 (73). Pp. 103–110. DOI: 10.20291/1815-9400-2022-2-103-110. (In Russian).
8. GOST 1232–2017. Porcelain and glass pin type insulators for voltage from 1 to 35 kV. General specifications. Moscow : Standardinform, 2017. 32 p. (In Russian).
9. Gmurman V. E. Probability theory and mathematical statistics. Moscow : Yurayt, 2024. 479 p. (In Russian).
10. Nesenjuk T. A. Development of a platform for monitoring and accounting of technical operation facilities. *Railway transport and technologies : proceedings of International scientific and practical conference*. Ekaterinburg : Publishing House of USURT, 2024. Pp. 398–402. (In Russian).

Объем статьи 0,54 авторских листа

Научная статья

УДК 621.332.33(043)

Совершенствование методов исследований консолей контактных подвесок электрических железных дорог

Олеся Андреевна Лукьянова¹, Олег Алексеевич Сидоров¹,
Александр Владимирович Тарасенко¹, Иван Евгеньевич Чертков¹

¹ Омский государственный университет путей сообщения, Омск, Россия

Improving research methods for console contact suspensions of electric railways

Olesya A. Lukyanova¹, Oleg A. Sidorov¹, Alexander V. Tarasenko¹, Ivan E. Chertkov¹

¹ Omsk State Transport University, Omsk, Russia

Аннотация

Формирование современной технологичной транспортной железнодорожной сети страны невозможно без обновления инфраструктуры железнодорожного транспорта и внедрения новейших достижений науки и техники. При этом особое внимание должно уделяться развитию высокоскоростного движения, что требует соблюдения стандартов безопасности движения, повышения надежности работы всех элементов и подсистем железной дороги при одновременном улучшении ее экономических показателей. К таким подсистемам инфраструктуры железнодорожного транспорта относится контактная сеть, в составе которой можно выделить опорно-поддерживающие устройства, оказывающие существенное влияние на надежность ее работы и безопасность движения поездов и требующие дальнейшей модернизации и совершенствования.

В статье представлена методика исследования работы консолей контактной сети. Она базируется на усовершенствованном методе расчета одного из основных параметров контактной подвески — натяжения несущего троса — и его изменения вдоль анкерного участка за счет трения в узлах крепления консоли к опоре при различных эксплуатационных факторах (таких как наклон опоры, типы узлов крепления, их несоосность и др.).

Методика позволяет повысить точность исследований, которые в дальнейшем могут быть использованы при проектировании и эксплуатации контактной сети.

Ключевые слова: высокоскоростное движение, контактная сеть, несущий трос, натяжение, опора контактной сети, консоль контактной сети, трение, узел крепления консоли

Abstract

The formation of a modern technological railway network in the country is impossible without the renewal of railway transport and the introduction of the latest achievements of science and technology. At the same time, special attention is paid to the development of high-speed traffic, which requires compliance with traffic safety standards, increasing the reliability of all elements and subsystems of the railway while improving its economic performance. Such subsystems of the railway transport infrastructure include the contact network, which includes support and supporting devices that have a significant impact on the reliability of its operation and train safety, as well as requiring further modernization and improvement.

The article presents a methodology for investigating the operation of catenary consoles. It is based on an improved method for calculating one of the main parameters of catenary — the tension of the supporting cable — and its changes along the anchor section due to friction in the console attachment points to the support under various operational factors (such as inclination of the support, types of attachment points, their misalignment, etc.).

The use of the proposed methodology makes it possible to increase the accuracy of the research, which can later be used in the design and operation of the contact network.

Keywords: high-speed movement, contact network, supporting cable, tension, contact network support, overhead system console, friction, console attachment point

DOI: 10.20291/1815-9400-2025-1-102-107

Транспортная стратегия Российской Федерации [1] предусматривает формирование современной опорной транспортной сети страны, а также ускоренное обновление ее инфраструктуры, к числу основных элементов которой относятся и устройства электроснабжения.

При этом ключевое значение имеет внедрение скоростного и высокоскоростного движения совместно с реализацией планов по электрификации железных дорог. Становление и расширение направлений высокоскоростного движения в нашей стране связано с модернизацией существующих и строительством новых магистралей [2]. Для этого необходимо перевести часть маршрутов поездов дальнего следования на высокоскоростные магистрали, увеличить общий пассажиропоток высокоскоростных сообщений, обеспечить более полное использование потенциала подвижного состава, а также внедрить современные технические и технологические решения при реализации новых элементов инфраструктуры (создание инновационного подвижного состава, устройств контактной сети и т. д.).

Вышесказанное позволяет сделать вывод о том, что модернизация существующей инфраструктуры транспортной системы железных дорог, а также разработка и развитие новой, рассчитанной на движение подвижного состава со скоростями до 400 км/ч, — одно из важнейших направлений развития холдинга ОАО «РЖД».

Особое место в инфраструктуре железнодорожного транспорта занимает контактная сеть, к которой в связи с увеличени-

ем скоростей движения предъявляются жесткие требования по надежности и безопасности. При этом большое внимание уделяется устройствам, поддерживающим провода контактной подвески в пространстве, с учетом регламентированных геометрических размеров. К таковым относятся опорно-поддерживающие конструкции, требования к которым претерпели изменения [3, 4] в результате перехода с полукомпенсированных на компенсированные контактные подвески (табл. 1).

Как видно из табл. 1, при переходе на скорости движения 160 км/ч и выше (до 200 км/ч) отклонение некоторых параметров недопустимо. Для высокоскоростного движения (более 200 км/ч) в отношении опорно-поддерживающих конструкций регламентируются два параметра [5]: отклонения при установке опор контактной сети допускаются только в сторону увеличения габарита, но не более чем 100 мм от проектного положения; отклонение опоры от вертикали не должно превышать 1° .

Также следует отметить усиление контроля за состоянием консолей и фиксаторов в процессе эксплуатации. Для консолей контактной сети особое внимание уделяется проверке их положения (смещение конца консоли в плане в зависимости

от температуры окружающего воздуха), а для фиксаторов — проверке расстояния сближения фиксаторов на опорах разных путей.

Наличие неисправностей или недопустимых отклонений опоры от нормативных значений приводит к нарушению режима работы консолей и фиксаторов, а следовательно, к изменению параметров контактной подвески, что влияет на качество токосяема, в значительной степени — на высоких скоростях движения. При этом в процессе эксплуатации для реализации надежного и качественного токосяема консоли должны обеспечивать: стабильное положение проводов и тросов контактной подвески в пространстве (относительно уровня головки рельса и оси пути); их свободное перемещение, вызванное температурными изменениями и работой компенсирующих устройств, вдоль оси пути в процессе эксплуатации; возможность регулировки положения проводов и тросов в профиле и плане.

Проектирование конструкций консолей для требуемых условий осуществляется по результатам проверочных расчетов и натурных испытаний [6]. Проверочные расчеты дают возможность определить значения сил и изгибающего момента,

Таблица 1

Требования нормативных документов к опорно-поддерживающим конструкциям

Параметр	Правила устройства и технической эксплуатации контактной сети электрифицированных железных дорог (утратили силу)	Правила технического содержания контактной сети, питающих линий, отсасывающих линий, шунтирующих линий и линий электропередачи (2021 г.)	Указания по техническому обслуживанию и ремонту опорных конструкций контактной сети (2022 г.)
Отклонение проектного габарита установки опор контактной сети от оси пути в сторону: увеличения уменьшения	Не более 150 (100) мм Не допускается	— —	Не более 150 мм Не допускается
Наклон оси опоры относительно вертикали: в сторону в направлении «поперек пути»: в сторону поля в сторону пути	Не более 1,0 (0,5) % Не более 2 (0,5) % Не указано	— Не более 200 мм Не более 30 мм на всю высоту опоры	Не более 2 % Не более 2 % Не допускается
Отклонение по развороту опор в плане по отношению к направлению, перпендикулярному оси пути	$\pm 3^\circ$ $\text{tg } 3^\circ = 1/20$	—	—
Наклон оси анкерной опоры (после передачи на нее нагрузки) относительно вертикали в сторону: противоположную действию нагрузок от анкерки действия нагрузок от анкерки	Не более 0,5 % —	Не более 100 мм Не более 50 мм на всю высоту опоры	Не более 0,5 %, или 50 мм на всю высоту опоры Не допускается
Смещение конца консоли относительно перпендикуляра (для кривых участков — относительно нормали) к оси пути для полукомпенсированной контактной подвески при длине консоли: до 5 м более 5 м	Не менее 200 мм Не менее 300 мм	200 мм 300 мм	— —
Допустимое отклонение от графиков смещения конца консоли для компенсированной контактной подвески	Не более ± 50 мм	Не более ± 30 мм	—

Примечание. В скобках приведены данные для участков скоростного движения (161–200 км/ч).

действующих на элементы консоли. Для сравнения значений проверяемых критериев с нормативными проводят натурные испытания на специальных установках (позволяющих выполнить визуальное обследование, определить массогабаритные показатели), испытания, связанные с приложением электрических и механических нагрузок, а также климатические исследования и испытания композиционного материала консолей [7, 8]. В нормативной документации, содержащей требования к методикам расчета и испытаниям консолей контактной сети, не указана необходимость исследования трения в узлах крепления консолей и влияния на него различных эксплуатационных факторов. Однако актуальность таких расчетов и исследований доказана специалистами [9, 10].

В Омском государственном университете путей сообщения предложен усовершенствованный метод расчета изменения натяжения несущего троса. Метод учитывает не только влияние нагрузки от собственного веса проводов контактной подвески и гололеда, нагрузки от веса консоли P_K , нагрузки на провода от ветрового воздействия, нагрузок, создаваемых компенсаторами и зигзагами контактного провода $P_{КП}$ и несущего троса, в том числе вертикальной $P_{НТ1}$ и горизонтальной $P_{НТ2}$ нагрузки от несущего троса, рассматриваемых в классическом методе [11], но и влияние типа и состояния узлов крепления консолей на параметры контактной подвески. Указанные нагрузки передаются на узлы крепления консоли к опоре, в результате возникает момент сил трения $M_{тр}$, который необходимо учитывать в расчетах, поскольку он оказывает противодействие повороту консоли, ограничивая тем самым перемещение несущего троса в пролете, а следовательно, и его натяжение по длине анкерного участка. При этом меняется распределение эластичности и, как следствие, протекание волновых процессов в контактной подвеске, что приводит к изменению других статических и динамических параметров контактной подвески.

При использовании усовершенствованного метода расчета изменения натяжения несущего троса определяется следующим образом:

$$\Delta T_{\text{расч}} = \Delta T_{\text{класс}} + \Delta T_{\text{тр}}, \quad (1)$$

где $\Delta T_{\text{класс}}$ — изменение натяжения несущего троса, рассчитанное по классическому методу расчета, Н; $\Delta T_{\text{тр}}$ — изменение натяжения несущего троса, возникающее за счет трения в узлах крепления консолей, Н,

$$\Delta T_{\text{тр}} = \frac{M_{\text{тр}}}{l_1 + l_2 + l_{19} + l_{20} + l_{21}}, \quad (2)$$

где l_i — длины отдельных элементов консоли в зависимости от ее типа, м (рис. 1).

Согласно выражению (2), рассчитать величину изменения натяжения несущего троса невозможно без информации о моменте силы трения в узлах крепления консоли, теоретическое определение которого весьма затруднительно из-за множества факторов, влияющих на характеристики материалов, и сложной формы взаимодействующих элементов конструк-

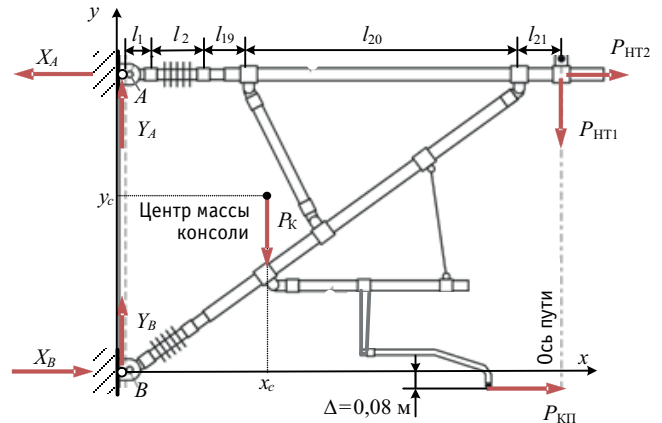


Рис. 1. Расчетная схема для определения опорных реакций: X_A и X_B , Y_A и Y_B — радиальные и осевые опорные реакции в верхнем и нижнем узлах крепления соответственно

ций узлов крепления консолей. Поэтому момент силы трения в узлах крепления консоли определяется эмпирически на основании экспериментальных данных, полученных с помощью разработанной установки:

$$M_{\text{тр}} = \frac{2(R^3 - r^2)}{3(R^2 - r^2)}(Y_A + Y_B)f + (\sqrt{X_A^2 + Z_A^2} + \sqrt{X_B^2 + Z_B^2}) \cdot r \cdot f_p, \quad (3)$$

где Z_A и Z_B — опорные реакции в верхнем и нижнем узлах крепления при наклоне опоры вдоль оси пути, Н; R , r — внешний и внутренний радиусы поверхности вращения узла крепления, м; f , f_p — коэффициенты трения по плоской и цилиндрической поверхности.

Из выражения (3) можно вычислить коэффициенты трения по плоской и цилиндрической поверхности узлов крепления и использовать эти значения в усовершенствованной методике расчета изменения натяжения по длине анкерного участка при соответствующих эксплуатационных условиях.

С помощью предлагаемой методики определены отклонения натяжения несущего троса от номинального значения по длине анкерного участка при различных режимах работы консолей и скоростях движения до 400 км/ч [12].

Результаты сравнения расчетных значений натяжений несущего троса T по длине половины анкерного участка $l_{a,y}$ с экспериментальными данными, полученными на действующем участке контактной сети КС-160-3, представлены на рис. 2.

На рис. 2 используются следующие обозначения: ΔT — изменение натяжения несущего троса; $T_{\text{ном}}$, $T_{\text{эксп}}$ — натяжение несущего троса номинальное и полученное в ходе экспериментальных исследований соответственно; $T_{\text{класс}}$, $T_{\text{расч}}$ — натяжение несущего троса, полученное с помощью классического и усовершенствованного методов расчета соответственно.

На результаты экспериментальных и расчетных исследований влияют следующие исходные данные: тип контактной подвески и ее показатели (состав, вес и натяжение проводов), тип консоли и ее массогабаритные показатели, расположение

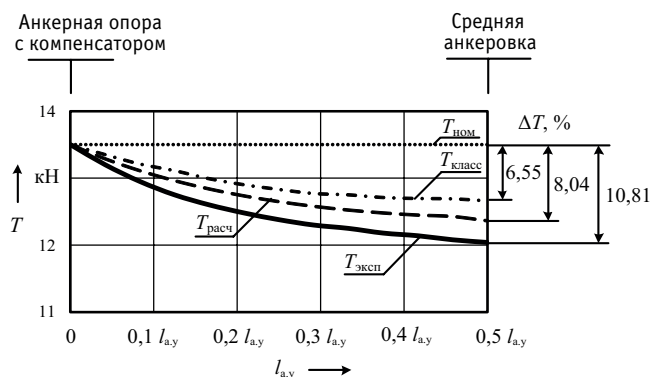


Рис. 2. Результаты расчетов и измерений натяжений несущего троса контактной подвески КС-160-3

узлов крепления на опоре, соосность узлов крепления, момент затяжки их гаек, наклон опоры (значение угла и направление в пространстве) и наклон консоли контактной сети, температура воздуха окружающей среды.

Для определения момента силы трения в узлах крепления консоли и влияния на него различных эксплуатационных факторов в ОмГУПС разработана специализированная установка (рис. 3).

В ее состав входит консоль 1, закрепленная на опоре 4, шарнирно установленной на основании 5, что позволяет при помощи оттяжек 6 и натяжных устройств 7, выполненных в виде линейных механических актуаторов [13], задавать отклонение опорно-поддерживающей конструкции от вертикального положения [14]. Для имитации влияния различных эксплуатационных факторов на работу консоли в конструкции установки предусмотрена возможность отклонения опоры минимум в восьми направлениях (угол сектора 45°) с шагом отклоне-

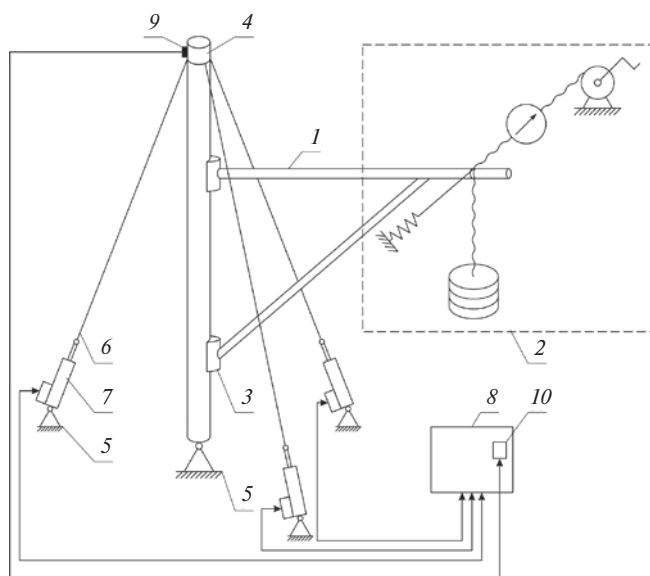


Рис. 3. Установка для экспериментального определения момента сил трения в узлах крепления консоли

ния от вертикального положения в 1° в каждом из указанных направлений. Контроль направления и угла наклона опоры с консолью в требуемом положении осуществляется при помощи датчика отклонения от вертикального положения 9, информация с которого поступает на пульт управления 8. Регулировка пространственного положения консоли производится с пульта 8 путем подачи сигналов управления на актуаторы на основании данных датчика отклонения 9 опоры от вертикального положения.

Перед началом экспериментальных исследований необходимо закрепить консоль на опоре с помощью узлов крепления 3, после чего опора переводится в вертикальное положение. В соответствии с программой испытаний для конкретного типа контактной подвески задаются вес и натяжение проводов с помощью блока имитации и измерения 2, который крепится к точке крепления несущего троса на консоли. Осуществляется плавный поворот консоли вдоль предполагаемой оси пути и ее возврат в исходное положение с одновременным измерением воздействующих на консоль сил и перемещений точки крепления несущего троса на консоли. По полученным значениям рассчитывается момент силы сухого трения в испытываемых узлах крепления консоли на опоре.

В таком же порядке происходит определение момента силы сухого трения при наклоненной опоре. При этом угол и направление наклона регулируются актуаторами, принимающими сигналы управления с пульта 8. Информация о наклоне опоры выводится на индикатор 10 с датчика отклонения 9. Кроме того, установка позволяет проводить проверку новых шарнирных узлов с использованием материалов, обладающих низким коэффициентом трения скольжения и высокой износостойкостью.

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Согласно действующим нормативным документам, при повышении скоростей движения предъявляются жесткие требования к состоянию и положению опорно-поддерживающих устройств, что доказывает необходимость совершенствования методики испытаний консолей.

2. Предложена усовершенствованная методика исследования консолей контактных сетей железных дорог, сочетающая в себе учет наклона опоры, который возникает в процессе эксплуатации под действием различных факторов, и силы трения в узлах крепления консоли, возникающей вследствие ее поворота.

3. Разработана установка, при помощи которой в автоматизированном режиме можно проводить исследования консоли контактной сети в широком диапазоне отклонений опоры от вертикального положения.

4. Использование установки позволяет охватить большое количество факторов, характерных для эксплуатации опорно-поддерживающих конструкций, снизить трудозатраты и время на проведение испытаний. Кроме того, установка дает возможность повысить точность результатов, которые будут использоваться при проектировании и эксплуатации опорно-поддерживающих конструкций контактной сети для строительства новых и модернизации существующих электрифицированных участков магистральных железных дорог.

Сведения об авторах:

Олеся Андреевна Лукьянова,

кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта» Омского государственного университета путей сообщения

Олег Алексеевич Сидоров,

доктор технических наук, профессор кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта» Омского государственного университета путей сообщения

Александр Владимирович Тарасенко,

кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта» Омского государственного университета путей сообщения

Иван Евгеньевич Чертков,

кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта» Омского государственного университета путей сообщения

Authors information:

Olesya A. Lukyanova,

PhD in Engineering, Associate Professor of Power Supply of Railway Transport Department, Omsk State Transport University

Oleg A. Sidorov,

DSc in Engineering, Professor of Power Supply of Railway Transport Department, Omsk State Transport University

Alexander V. Tarasenko,

PhD in Engineering, Associate Professor of Power Supply of Railway Transport Department, Omsk State Transport University

Ivan E. Chertkov,

PhD in Engineering, Associate Professor of Power Supply of Railway Transport Department, Omsk State Transport University

Литература

1. Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года : утв. распоряжением Правительства Российской Федерации от 27.11.2021 г. № 3363-р. Москва : ОАО «РЖД», 2021. 282 с.
2. Железнодорожное электроснабжение участка Москва — Казань высокоскоростной железнодорожной магистрали Москва — Казань — Екатеринбург. Технические нормы и требования к проектированию и строительству. Специальные технические условия. Санкт-Петербург : ПГУПС, 2016. 47 с.
3. Правила технического содержания контактной сети, питающих линий, отсасывающих линий, шунтирующих линий и линий электропередачи : утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 18.08.2021 г. № 1812/р. Москва : ОАО «РЖД», 2021. 244 с.
4. Указания по техническому обслуживанию и ремонту опорных конструкций контактной сети : утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 18.04.2022 г. № 1047/р. Москва : ОАО «РЖД», 2022. 96 с.
5. ГОСТ Р 58322–2018. Контактная сеть для высокоскоростных железнодорожных линий. Технические требования и методы контроля. Москва : Стандартинформ, 2018. 19 с.
6. ГОСТ Р 71154–2023. Конструкции поддерживающие для опор железнодорожной контактной сети и узлы их крепления. Общие технические условия. Москва : Российский институт стандартизации, 2024. 62 с.
7. Лукьянова О. А., Тарасенко А. В., Чертков И. Е. Совершенствование методов испытаний консолей контактной сети // Транспорт Урала. 2020. № 2 (65). С. 93–97. DOI: 10.20291/1815-9400-2020-2-93-97.
8. Ковалев А. А., Микава А. В. Определение максимальной продолжительности жизненного цикла консолей контактной сети // Транспорт Урала. 2019. № 4 (63). С. 86–90. DOI: 10.20291/1815-9400-2019-4-86-90.
9. Лукьянова О. А. Повышение эффективности эксплуатации контактной сети за счет совершенствования узлов крепления консолей к опорам : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Омск, 2020. 173 с.
10. Галкин А. Г., Ковалев А. А., Микава А. В. Влияние угла наклона опоры на высоту подвеса контактного провода относительно

References

1. Transport strategy of the Russian Federation until 2030 with a forecast for the period until 2035 : approved by the Order of the Government of the Russian Federation dated 27.11.2021 No. 3363-r. Moscow : JSC «Russian Railways», 2021. 282 p. (In Russian).
2. Railway power supply of the Moscow — Kazan section of the Moscow — Kazan — Ekaterinburg high-speed railway. Technical standards and requirements for design and construction. Special technical conditions. St. Petersburg : PGUPS, 2016. 47 p. (In Russian).
3. Rules for the technical maintenance of contact networks, supply lines, suctionlines, shuntlines and powerlines : approved by the Order of JSC «Russian Railways» dated 18.08.2021 No. 1812/r. Moscow : JSC «Russian Railways», 2021. 244 p. (In Russian).
4. Instructions for maintenance and repair of overhead contact network support structures : approved by the Order of JSC «Russian Railways» dated 18.04.2022 No. 1047/r. Moscow : JSC «Russian Railways», 2022. 96 p. (In Russian).
5. GOST R 58322–2018. Overhead contactline for high speed railways. Technical requirements and control methods. Moscow : Standardinform, 2018. 19 p. (In Russian).
6. GOST R 71154–2023. Supporting constructions and their fastening elements for railway overhead contact system. General specifications. Moscow: Russian Standardization Institute, 2024, 62 p. (In Russian).
7. Lukyanova O. A., Tarasenko A. V., Chertkov I. E. Development of methods for testing catenary cantilevers. *Transport of the Urals*. 2020. No. 2 (65). Pp. 93–97. DOI: 10.20291/1815-9400-2020-2-93-97. (In Russian).
8. Kovalev A. A., Mikava A. V. Determination of maximum life cycle of catenary cantilevers. *Transport of the Urals*. 2019. No. 4 (63). Pp. 86–90. DOI: 10.20291/1815-9400-2019-4-86-90. (In Russian).
9. Lukyanova O. A. Increasing the efficiency of operation of the contact network by improving the attachment points of consoles to supports : PhD in Engineering Thesis. Omsk, 2020. 173 p. (In Russian).
10. Galkin A. G., Kovalev A. A., Mikawa A.V. The effect of pole's angle inclination on contact wire position relative to the level of

уровня головки для скоростных и высокоскоростных контактных подвесок // Известия Транссиба. 2018. № 4 (36). С. 69–75. ISSN 2220-4245.

11. Фрайфельд А. В., Брод Г. Н. Проектирование контактной сети. Москва : Транспорт, 1991. 335 с.
12. Лукьянова О. А., Заренков С. В., Саля И. Л. Исследование влияния силы сухого трения в узлах крепления поворотных консолей на изменение натяжения по длине анкерного участка электрифицированной железнодорожной магистрали // Известия Транссиба. 2017. № 4 (32). С. 88–101. ISSN 2220-4245.
13. Линейные актуаторы. URL: <https://linearmotion.ru/info/> (дата обращения: 14.02.2023).
14. Устройство для исследования трения в узлах крепления консоли контактной подвески / О. А. Сидоров, А. В. Тарасенко, О. А. Лукьянова [и др.] : патент 2806292 Российская Федерация. № 2023110891; заявл. 26.04.2023; опубл. 30.10.2023, Бюл. № 31.

the rail head for speeds and high-speeds catenaries. *Journal of Transsib Railway Studies*. 2018. No. 4 (36). Pp. 69–75. ISSN 2220-4245. (In Russian).

11. Freifeld A. V., Brod G. N. Design of a contact network. Moscow : Transport, 1991. 335 p. (In Russian).
12. Lukyanova O. A., Zarenkov S. V., Salya I. L. Investigation of the dry friction power influence in the units of the mounting convoys on the change of anchor site length tension of the electrified railway. *Journal of Transsib Railway Studies*. 2017. No. 4 (32). Pp. 88–101. ISSN 2220-4245. (In Russian).
13. Linear actuators. URL: <https://linearmotion.ru/info/> (access date: 14.02.2023). (In Russian).
14. Sidorov O. A., Tarasenko A. V., Lukyanova O. A. [et al.]. Device for studying friction in the fastening points of the catenary console : patent 2806292 Russian Federation. No. 2023110891; filed 26.04.2023; publ. 30.10.2023, Bulletin No. 31. (In Russian).

Объем статьи 0,65 авторских листа

Подписка на 2025 год.
Периодичность — 4 номера в год.

✂

ф. СП-1

АБОНЕМЕНТ

на

газету

 журнал

46463

(индекс издания)

Транспорт Урала

(наименование издания)

Количество комплектов:

на 2025 год по месяцам:

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

Куда

(почтовый индекс)

(адрес)

Кому

(фамилия, инициалы)

ДОСТАВОЧНАЯ КАРТОЧКА

на

газету

 журнал

46463

(индекс издания)

Транспорт Урала

(наименование издания)

Стои- мость

подписки

руб. коп.

Количество комплектов:

переадресовки

руб. коп.

на 2025 год по месяцам:

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

Куда

(почтовый индекс)

(адрес)

Кому

(фамилия, инициалы)